

MARTÍ COUSILLAS ALMAR

L'ENERGIA MÉS NETA:



**LES CEL·LES DE
COMBUSTIBLE
MICROBIANES**

2n Bat A
Tutora: Eulàlia Amorós
INS Vilafant

L'ENERGIA MÉS NETA: LES CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES

***“Energy is the single greatest
challenge facing humanity”***

Richard Smalley

Premi Nobel de Química (1996)

AGRAÏMENTS

Al Dr. Sebastià Puig, i al seu equip de recerca per brindar-me la visita a LEQUIA i per tots els dubtes que m'ha resolt.

A la meva tutora de recerca, l'Eulàlia Amorós, per guiar-me i ajudar-me al llarg del treball.

Al Dr. Narcís Pous, investigador de LEQUIA de la UdG, per la seva inestimable ajuda.

A en Raül Lattre, cap de servei de l'EDAR de FISERSA, per la seva entrevista i facilitar-me les anàlisis de les mostres.

A la Marta Fernández Gatell, investigadora del Departament d'Enginyeria Ambiental de la UPC, per la visita virtual al laboratori i per les correccions i suggeriments del treball.

Al Dr. Abraham Esteve-Núñez, professor titular de la Universitat d'Alcalà d'Henares, per tota la informació i coneixements que m'ha transmès

Al Dr. Fabian Fischer de la Hes-so per la seva informació.

A la meva família per ajudar-me en els moments que ho necessitava i per aguantar a casa totes les molèsties dels meus experiment.

RESUM

El descobriment de bactèries capaces de convertir l'energia química de la matèria orgànica en electricitat pot portar-nos a una nova forma d'energia verda: els sistemes bioelectroquímics (BES). Aquests poden contribuir a resoldre dos dels problemes més crítics de la societat actual: la crisi energètica i la disponibilitat d'aigua no contaminada. Aconseguir que aquestes noves formes d'energia passin de la teoria a la pràctica suposa un important repte biotecnològic.

L'objectiu d'aquest treball és construir i posar en funcionament una cel·la de combustible microbiana per investigar com, variant els factors que intervenen en el seu rendiment, es pot millorar i aconseguir major generació d'electricitat.

Finalment, es projecta l'estudi cap a la recerca de noves solucions per aconseguir la seva viabilitat tècnico-econòmica i s'exposa un ventall d'aplicacions i projectes on els BES són ja una realitat.

RESUMEN

El descubrimiento de bacterias capaces de convertir la energía química de la materia orgánica en electricidad puede llevarnos a una nueva forma de energía verde: los sistemas bioelectroquímicos (BES). Éstos pueden contribuir a solucionar dos de los problemas más críticos de la sociedad actual: la crisis energética y la disponibilidad de agua no contaminada. Conseguir que estas nuevas formas de energía pasen de la teoría a la práctica supone un importante reto biotecnológico.

El objetivo de este trabajo es construir y poner en funcionamiento una celda de combustible microbiana para investigar cómo, variando los factores que intervienen en su rendimiento, se puede conseguir una mayor generación de electricidad.

Finalmente, se proyecta el estudio hacia la investigación de nuevas soluciones para conseguir su viabilidad tecno-económica y se expone un abanico de aplicaciones y proyectos donde las BES son ya una realidad.

ABSTRACT

The discovery of bacteria capable of converting the chemical energy of organic matter into electricity can lead us to a new form of green energy: Bioelectrical systems (BES). They can help solve two of the most critical problems in today's society: the energy crisis and the availability of non-contaminated water. Putting these new forms of energy into practice is a major biotechnological challenge.

This project aims to build and operate a microbial fuel cell to investigate how it is possible to improve and achieve an increased generation of electricity, by varying the factors involved in its performance.

Finally, the study is projected towards the research for new solutions to achieve their technical-economic viability and a range of applications and projects are set out where bioelectrical systems are already a reality.

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ	3
2	OBJETIUS DE LA INVESTIGACIÓ	6
3	QUÈ SÓN LES CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES?	8
4	EN QUIN PRINCIPI ES BASEN?	8
5	DE QUINES PARTS CONSTA UNA MFC?	9
6	ESTUDI DE LES REACCIONS QUE ESDEVENEN EN LA CEL·LA MICROBIANA	13
7	AVANTATGES I LIMITACIONS DE LES CEL·LES MICROBIANES	15
8	PARÀMETRES QUE INFLUEIXEN EN LA PRODUCCIÓ D'ENERGIA EN UNA MFC	16
9	EXPERIMENT Nº 1: CONSTRUCCIÓ I POSADA EN FUNCIONAMENT DE LA CEL·LA INICIAL	17
10	EXPERIMENT Nº2: DETERMINACIÓ DE LA RESISTÈNCIA INTERNA DE LA CEL·LA	22
11	EXPERIMENT Nº3 : DETERMINACIÓ DEL MATERIAL ÒPTIM PER L'ELÈCTRODE DE L'ÀNODE	28
12	EXPERIMENT Nº4: OBSERVACIÓ DELS MICROORGANISMES PRESENTS EN ELS ELÈCTRODES	34
13	EXPERIMENT Nº5: COMPARACIÓ DE TRES TIPUS D'INÒCULS	37
14	EXPERIMENT Nº 6: EFECTE DE L'ÀREA DE LA SUPERFÍCIE DE L'ELÈCTRODE ANÒDIC	40
15	EXPERIMENT Nº 7: CONSTRUCCIÓ I ESTUDI DE LA CEL·LA FINAL	42
16	SUMARI DELS RESULTATS DELS EXPERIMENTS	46
17	CONCLUSIONS GENERALS	47
18	PERSPECTIVES: COM ES PODEN MILLORAR?	49
18.1	STACKS	49
18.2	ELÈCTRODES	49
18.3	BIOCÀTODES	49
18.4	BIOCÀTODES AMB ALGUES	50
19	ANEM MÉS ENLLÀ AMB INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL... ..	50
20	BIBLIOGRAFIA	51
21	WEBGRAFIA	53
ANNEX 1		
22	LES BACTÈRIES ELECTROGÈNIQUES	ii
23	PÈRDUES EN UNA CEL·LA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA	vi

24 UNA MICA D' HISTÒRIA.....	vii
25 APLICACIONS DE LES CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES	viii
25.1 PRODUCCIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA.....	viii
25.2 TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS.....	ix
25.3 BIORREMEDIACIÓ	x
25.4 BIOSENSORS.....	x
25.5 PRODUCCIÓ DE BIOHIDROGEN	xi
25.6 ALTRES APLICACIONS	xi
26 PROJECTES REALITZATS AMB CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES	xii
ANNEX 2	
27 CONSTRUCCIÓ DE LA CEL·LA DE DUES CAMBRES	xvi
28 CONSTRUCCIÓ DE LES CEL·LES D'UNA SOLA CAMBRA	xxii
ANNEX 3	
29 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº 1: EFECTE DE L'AIREACIÓ DEL CÀTODE	xxvi
30 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº 2: CONNEXIÓ EN SÈRIE DE VÀRIES CEL·LES	xxix
31 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº3: DETERMINAR L'EFECTE DEL PH EN LES DUES CAMBRES.....	xxx
32 ANNEX 4 : VISITES AL LABORATORI D'ENGINYERIA AMBIENTAL DE LA UdG.....	xxxv
34 ANNEX 5 : DETERMINACIÓ I VALORACIÓ DE LA DEMANDA QUÍMICA D'OXIGEN EN LA CEL·LA FINAL A FISERSA.....	xliv
35 ANNEX 6 : PARLA L'EXPERT DR.ABRAHAM ESTEVE NÚÑEZ.....	xlvii
36 ANNEX 7 : TINCIÓ DE GRAM.....	li
37 ANNEX 8 : MOSTRA DELS REGISTRES DE VOLTATGE	liv

1 INTRODUCCIÓ

Segons l'última revisió de l'ONU de l'any 2019 s'estima que la població mundial superarà els 9000 milions de persones l'any 2050.¹ A mesura que la població augmenta també augmenten les seves necessitats energètiques. Els combustibles fòssils que ara representen el 80% de la producció energètica, són recursos limitats i la seva explotació genera problemes ambientals de gran importància com ara la pluja àcida, l'efecte hivernacle i l'escalfament del planeta que tots coneixem.

Paral·lelament, la població mundial genera una gran quantitat d'aigües residuals. Cada dia es produeix una mitjana de 10.500 milions de litres d'orina i per ser gestionats adequadament abans de ser evacuats al medi és necessari invertir una part important de la demanda energètica mundial amb els costos econòmics i mediambientals que això suposa.

Davant d'aquesta situació, la societat s'enfronta al desafiament de buscar noves alternatives que puguin satisfer les necessitats energètiques existents i que, al mateix temps, siguin respectuoses amb el medi ambient.

Us imagineu una energia provinent de la degradació de l'orina que la depurés simultàniament? i que com a residu donés aigua?

Doncs, d'entre les tecnologies més novadores i atractives trobem aquella dirigida a aprofitar l'energia emmagatzemada en la matèria orgànica dels residus amb la finalitat de produir energia elèctrica a través de reaccions catalitzades per microorganismes. És a dir, l'activitat metabòlica dels microorganismes, i particularment de les bactèries electrogèniques, pot ser usada per generar electricitat.

Aquest procés es desenvolupa en les anomenades **cel·les de combustible microbianes** (MFC²). Es basa en l'ús dels microorganismes per oxidar el

¹ <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>
<https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>

² De les seves sigles en anglès: Microbial Fuel Cell

combustible (matèria orgànica) i transferir els electrons resultants a un ànode que es troba connectat a un circuit elèctric.

Tenint en compte aquesta capacitat de les MFCs, vaig considerar interessant enfocar el meu treball en **la producció d'electricitat a partir d'orina**. Entendre les dificultats que troba la bioelectroquímica a l'hora d'esdevenir una font d'energia real a gran escala i com fer per superar-les era un dels objectius principals del meu treball.

La primera etapa va ser la recerca d'informació. Vaig fer una àmplia recerca bibliogràfica per poder conèixer a fons les característiques de les MFCs, les seves parts, tipus, materials, reaccions químiques que s'hi donen, els microorganismes amb què es basen, etc.

Amb els coneixements teòrics vaig decidir fabricar una MFC (veure annex 2) amb el que pogués comprovar de manera pràctica el seu funcionament i viabilitat. Es va valorar mitjançant un voltímetre digital connectat a l'ordinador que, mitjançant una aplicació, era capaç d'obtenir i enregistrar dades de voltatge a temps real durant tot l'experiment. De fet, he obtingut uns llistats amb uns quants milers de dades. Només adjunto una petita mostra en l'annex 8.

Basant-me en els resultats obtinguts en els experiments realitzats al llarg del treball, vaig construir una altra cel·la “millorada” per demostrar que, canviant alguns dels factors que influeixen en les MFCs, s'aconseguia augmentar el seu rendiment.

Al començament del meu treball de recerca (Febrer 2020), vaig contactar amb el **laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental de LEQUIA**, un centre de recerca de la Universitat de Girona, on el Dr. Sebastià Puig i el seu equip em va brindar l'oportunitat de visitar el laboratori i em van aclarir els primers dubtes que se'm van presentar sobre com construir una cel·la de combustible microbiana.

Més endavant, un dels seus investigadors postdoctorals, el Dr. Narcís Pous Rodríguez, em va oferir realitzar unes proves (**voltametries**) en diferents elèctrodes emprats en els experiments per estudiar les seves característiques electroquímiques, cosa que li agraeixo moltíssim (Veure annex 4).

En la part final del meu treball, vaig investigar sobre les aplicacions que s'estan desenvolupant a partir de les MFCs. La principal és la seva incorporació en **plantes depuradores d'aigües residuals** on, a més de generar una petita quantitat d'energia, s'aconsegueix depurar l'aigua sense el cost energètic dels tractaments convencionals.

Per saber més sobre aquesta aplicació, vaig posar-me en contacte amb l'EDAR³ de Figueres (**FISERSA**) on el cap de servei, en Raül Lattre, es va oferir a ajudar-me analitzant mostres de la meva cel·la per valorar el grau de depuració de l'orina (veure annex 5).

Per acabar voldria exposar que penso que la tecnologia de les MFCs representa un enfocament molt prometedor per a la recerca d'energies renovables. Podria arribar a solucionar dues de les crisis més grans que afronta la humanitat: l'obtenció d'energia i la gestió de residus orgànics en les aigües contaminades. En la meva opinió, s'hauria de dedicar tots els esforços possibles a fer d'aquesta tecnologia una realitat.

No és un camí fàcil, però.

³ Estació Depuradora d'Aigües Residuals

2 OBJECTIUS DE LA INVESTIGACIÓ

S'observen clares diferències en la generació d'electricitat de les MFCs degut a una gran varietat de factors que influeixen: materials, dissenys, substrats,.. Donat el caràcter experimental d'aquesta tecnologia, aquests factors encara no han estat suficientment estudiats. Cal reconèixer-los i considerar-los per tal de poder fer que aquesta tecnologia sigui potencialment escalable a un cost raonable i aconseguir un implant més ampli.

Així doncs, l'objectiu general del treball és construir i analitzar l'eficiència d'una cel·la de combustible microbiana en la producció d'electricitat a partir d'orina i poder avaluar diferents paràmetres que poden afectar-la per tal de millorar el seu rendiment.

Amb aquesta finalitat, es construirà una primera cel·la i es faran una sèrie d'experiments. Basant-nos en els resultats obtinguts, es construirà una segona cel·la canviant aquells aspectes que puguin donar-li un rendiment més òptim.

També s'estudiarà el comportament de la cel·la en funció de l'oxigenació del càtode, la connexió en sèrie de vàries cel·les i l'evolució del pH de les cambres de la cel·la final.

En el següent quadre s'exposen les diferents fases i els objectius específics del treball:

Objectiu		Mètode
PART TEÒRICA	Estudiar i analitzar en la bibliografia les característiques de les MFC, les condicions d'operació i les possibles configuracions i materials apropiats en la construcció d'una cel·la de combustible microbiana a escala laboratori.	Bibliografia Visita a Lequia UdG (Girona) Febrer 2020 
	Familiaritzar-me amb els diferents paràmetres elèctrics. Aprendre com utilitzar un multímetre i la seva captació de dades. Connectar-lo amb el PC mitjançant l'aplicació de Peak Tech®	
Experiment nº1	Construcció i posada en funcionament de la cel·la a escala laboratori. Obtenir mesures de voltatge durant 2 setmanes.	Cel·la inicial: 13 abril . 18 maig 2020 
Annex 3: Exp. nº1	Estudi de l'efecte d'airejar o no el càtode.	
Experiment nº2	Determinar l'efecte de la resistència externa variable sobre el comportament electroquímic de la MFC. Càlcul de la resistència interna de la cel·la	
Experiment nº3	Avaluar la producció elèctrica de les MFCs en funció de diferents materials de l'elèctrode de l'ànode.	Cel·les d'una cambra 16 maig- 27maig 2020 
Annex 3: Exp. nº2	Valoració de la connexió en sèrie de varies cel·les	
Experiment nº4	Observació i valoració de les bactèries presents en els ànodes	
Annex 4	Voltametries per observar canvis bioelectroquímics en els elèctrodes (LEQUIA)	
Experiment nº5	Comparació de diferents inòculs	Cel·les d'una cambra 7juny- 13 juny 2020 
Experiment nº6	Estudi de l'efecte de l'augment de la superfície de l'ànode	
Experiment nº7	Construcció d'una nova cel·la millorada en funció dels resultats obtinguts en els anteriors experiments	Cel·la final 26 juny – 27 juliol 2020 
Annex 3: Exp. nº 3	Mesurar el pH de les dues cambres i estudiar la seva relació amb la producció d'electricitat.	
Annex 5	Avaluar la degradació de matèria orgànica mesurant la DQO (Demanda química d'oxigen) inicial i final del substrat de la cel·la. (FISERSA)	
PERSPECTIVES	Projectar l'estudi cap a noves perspectives i/o investigacions. Veure aplicacions actuals.	Visites i entrevistes online.

3 QUÈ SÓN LES CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES?

Les **Cel·les de Combustible Microbianes**⁴ (MFC) són una tecnologia emergent que permet la producció d'energia elèctrica a partir de la degradació de matèria orgànica utilitzant bactèries com a catalitzadors per oxidar la matèria i generar corrent.

4 EN QUIN PRINCIPI ES BASEN?

Per entendre bé com funciona una MFC primer hem d'entendre com funcionen les bactèries i més concretament com capturen i processen l'energia.

El principi amb què es basen les MFCs és que l'energia química emmagatzemada en la matèria orgànica és alliberada en energia elèctrica quan els microorganismes la metabolitzen.

Per realitzar aquesta conversió d'energia, els microorganismes necessiten dues coses: matèria orgànica i acceptors d'electrons per poder realitzar la **respiració cel·lular**. En aquest procés la matèria orgànica és degradada en molècules més senzilles per produir energia per a la cèl·lula. Aquesta energia es troba en forma d'energia química en els enllaços de les molècules d'ATP⁵. En condicions aeròbiques, per obtenir ATP mitjançant la respiració cel·lular tenen lloc 3 processos: la glicòlisis, el cicle de Krebs i la cadena transportadora d'electrons. Mitjançant una sèrie de reaccions successives en aquests 3 processos els electrons són finalment transferits a un acceptor d'electrons. El més comú i més eficient és l'oxigen que s'uneix a protons lliures formant aigua i alliberant molècules d'ATP, essencials per a la vida d'un organisme. Si no hi ha oxigen que pugui fer d'acceptor final, hi ha molts microorganismes capaços d'utilitzar altres molècules inorgàniques realitzant el que anomenem **respiració anaeròbica**.

Un altre tipus de catabolisme és la **fermentació** que també es produeix en condicions anaeròbiques però és molt menys eficient energèticament parlant. Aquí no intervé la cadena transportadora d'electrons, fet que impedeix transferir els electrons de la matèria orgànica inicial a un compost inorgànic.

⁴ MFC per les seves sigles en anglès: Microbial Fuel Cell

⁵ ATP: adenosina-5'-trifosfat

Així doncs, és l'avantatge energètica de fer la respiració cel·lular el que porta als microorganismes a utilitzar el circuit instal·lat en les MFCs per moure i donar els seus electrons i per tant a produir electricitat.

5 DE QUINES PARTS CONSTA UNA MFC?

Les MFCs consten principalment de dues cambres, una catòdica i l'altra anòdica, separades per una membrana d'intercanvi de protons (MIP) i un circuit elèctric extern. Cada component és important per a la producció d'electricitat.

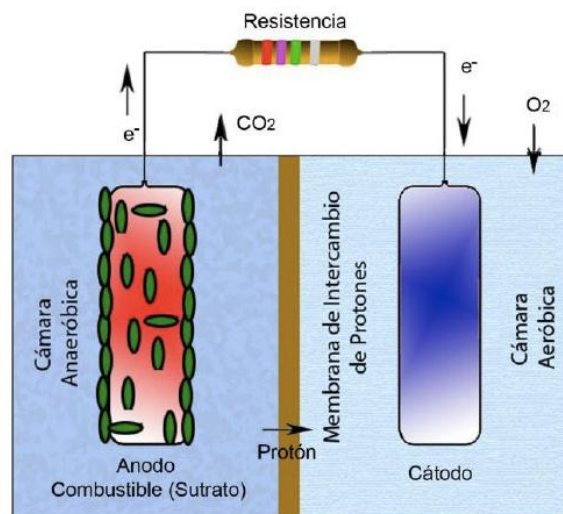


Figura 1: Esquema bàsic d'una MFC. Font: SciELO

En la **cambra anòdica**, en condicions d'anaerobiosi, s'hi troben els microorganismes i la matèria orgànica a partir de la qual es genera l'energia. La matèria orgànica és oxidada pels microorganismes. En aquest procés es generen electrons, protons i CO₂ (aquest últim s'allibera a l'exterior del sistema). Els electrons passen pel circuit elèctric extern, produint així l'energia elèctrica i finalitzant el seu recorregut al compartiment catòdic. Els protons generats es transfereixen a través d'una membrana semipermeable fins al compartiment del càtode.

La **cambra catòdica**, en canvi, és rica en oxigen i pot tenir algun altre agent oxidant capaç d'acceptar electrons. Aquí els electrons són donats a les molècules d'oxigen que són l'acceptor final de la respiració cel·lular. Els protons es combinen de nou amb l'oxigen ric en electrons per formar aigua. Es crea una diferència de potencial que pot ser mesurada amb un **voltímetre** obtenint

el voltatge que genera la MFC. Aquest voltatge estarà directament relacionat amb el creixement microbià.

Per connectar els compartiments de l'ànode i el càtode s'utilitzen uns elèctrodes i cable extern per on circularan els electrons a més d'una resistència que permetrà mesurar el voltatge i la intensitat produïts.

Sabem que l'ànode idoni per ser utilitzat en les MFCs ha de presentar les característiques específiques següents:

- ❖ Elevada conductivitat elèctrica
- ❖ Ser resistents a la corrosió
- ❖ Alta resistència mecànica
- ❖ Ser biocompatible amb els microorganismes
- ❖ Ser respectuós amb el medi ambient
- ❖ Tenir un baix cost
- ❖ Alta porositat i rugositat perquè quan més porós més fàcilment s'instal·laran els bacteris
- ❖ Ha de ser químicament estable en la solució del reactor
- ❖ Ha de poder ajustar-se a formes i mides més grans, és a dir, que sigui fàcilment escalable.

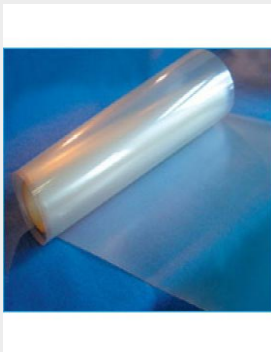
Entre els dos compartiments hi haurà una **membrana semipermeable (PEM)**.

La funció d'aquesta membrana d'intercanvi iònic és separar les cambres

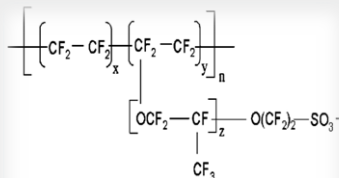
anòdica i catòdica perquè es puguin produir els processos d'oxidació i reducció, evitant que cap agent interfereixi en ells, alhora que permet als protons desplaçar-se de l'ànode cap al càtode. El separador o membrana ideal ha d'inhibir la transferència de substrat i d'oxigen a la vegada que ha de

Membrana de Nafion®

Una membrana de Nafion (Perfluorosulfonat) és un polímer lineal amb grups $-SO_3$ que estan fixes a una cadena fluorcarbonatada. És molt utilitzat per la seva resistència química i mecànica i per la seva alta conductivitat elèctrica.



Font: Fuel cell store.com



Estructura química del Nafion®.

Font: Researchgate.net

permetre el bon transport de protons. El material més freqüentment usat com a PEM és el **Nafion[®] 117** (Dupont Corp). Una alternativa al Nafion[®] és la membrana Ultrex[®] CMI-7000 que té una millor relació cost-eficiència.

També es pot usar com a PEM un **pont salí** que comparat amb les membranes d'intercanvi iònic és un mètode simple i econòmic.

Un pont salí és un tub que uneix els 2 recipients sense deixar circular ni barrejar les dues solucions. Conté un electròlit que pot ser KCl, NH₄, NO₃ o NaOH. També es pot utilitzar agar per a evitar la mescla de fluids. La difusió d'oxigen és quasi menyspreable en ponts salins amb agar i la seva durabilitat és bastant elevada. El seu principal inconvenient és la seva baixa densitat energètica resultant de la seva elevada resistència interna.

El **substrat** és un dels components més importants en una MFC ja que aporta la matèria orgànica que és el combustible a partir del qual es genera l'energia.

L'**orina** pot ser utilitzada com a electròlit i substrat orgànic en els sistemes bioelectroquímics degut a les seves propietats. Conté components orgànics que poden ser utilitzats com a combustible per a l'obtenció d'energia en les



Imatge 1: L'orina presenta una alta conductivitat i és ideal per fer de substrat.

MFCs gràcies al seu alt contingut en nutrients com el nitrogen o el fòsfor. A més, l'orina és una solució que presenta una alta conductivitat capaç de reduir les pèrdues òhmiques d'aquests sistemes millorant el seu rendiment.

L'orina humana és un fluid generat pels ronyons. Té un color àmbar - transparent. Els ronyons treballen com un filtre purificant la sang i extraient l'aigua que es troba en excés i tots els productes residuals.

Està composta principalment per aigua (93-96%), urea i sals inorgàniques de clor, potassi i sodi. També hi ha amoníac, creatinina, àcids orgànics i toxines varies. El color característic de l'orina ve donat per la presència d'urobilina. La composició varia en funció de factors com el tipus de vida de l'individu, la

condició física, les condicions ambientals (temperatura, altitud i humitat), així com la dieta.

Presenta una alta conductivitat perquè conté una àmplia gamma d'ions. Un estudi recent demostra que l'orina té una conductivitat que varia en el temps. De $7\text{-}20\text{ mS cm}^{-1}$ del primer dia passa a triplicar-se després de 24 hores. Tendeix a ser molt més alta perquè es trenca la urea en ions amoni. Així doncs, la utilització d'un electròlit que conté molècules orgàniques com l'orina beneficia el funcionament de les MFCs limitades per les altes pèrdues òhmiques que tenen.

Les MFC utilitzen **bactèries electrogèniques** per a la producció d'electricitat. Aquests microorganismes es poden definir com aquells que tenen la capacitat de transferir els electrons resultants del seu metabolisme a un acceptor terminal d'electrons extracel·lular i insoluble i produir corrent elèctrica. (Lovley, 2012).

Les denominades bactèries electrogèniques (veure annex 1) es poden trobar en quasi tots els ambients i poden créixer en quasi totes les condicions, cosa que fa que les MFCs siguin fàcil de construir i reproduir.



Imatge 2: Bactèria electrogènica

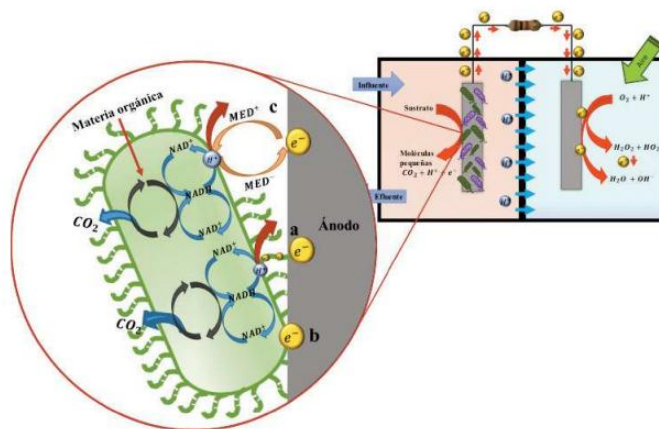
(Shewanella oneidensis)

Font: Science Photo Library.

6 ESTUDI DE LES REACCIONS QUE ESDEVENEN EN LA CEL·LA MICROBIANA

Les reaccions que es produeixen en la cel·la es poden definir com reaccions de reducció-oxidació (redox).

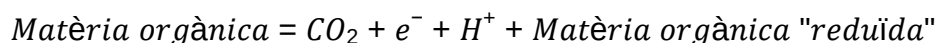
Una **reacció de reducció-oxidació**, o simplement reacció redox és aquella reacció química en la qual hi ha una transferència electrònica entre els reactius, donant lloc a un canvi en els seus estats d'oxidació pel que fa als productes.



Imatge 3: Procés bioelectrogènic d'una MFC Font: Dialnet

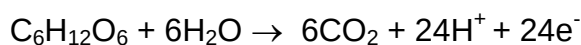
En la cambra de l'ànode s'esdevé **la reacció d'oxidació** que allibera els electrons que passaran a través del circuit extern produint així energia elèctrica. En aquesta reacció també s'obtenen com a productes de la reacció protons H^+ que passen a través del pont salí.

Com que a la cambra de l'ànode s'ha utilitzat fang i orina que és una barreja complexa de matèria orgànica i la composició d'aquest es desconeix, la reacció d'oxidació que esdevindrà es pot definir com:



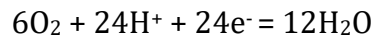
La quantitat d'electrons disponibles per ser transformats en corrent elèctric està definida com la quantitat d'electrons que aporta cada font de carboni per mol. Si s'opera per lot com en aquesta cel·la, llavors es compte amb un nombre limitat d'electrons que poden convertir-se en electricitat en una MFC.

Si imaginem que el substrat és un substrat pur de glucosa, la reacció que es donaria seria:



A la cambra del càtode s'esdevindrà **la reacció de reducció** que acceptarà els electrons i protons alliberats en l'ànode. Aquestes reaccions d'acceptació

d'electrons dependrà del catòlit utilitzat. A l'utilitzar només aigua com a catòlit la reacció de reducció seria:



En el pas dels electrons cap al càtode es produeix aigua ja que els protons produïts en la respiració passen pel pont salí i es combinen amb l'oxigen ric en electrons.

Malgrat que el voltatge màxim teòric d'una MFC és sobre el 1.2V fruit del potencial redox de les biomolècules de l'ànode que és vora els -0.4V i del potencial redox de l'oxigen del càtode que és 0.8V, el resultat de les MFC en el laboratori és més baix. L'energia convertida és el resultat de molts factors com l'estructura del sistema o els bacteris involucrats en ell. Es produeixen pèrdues que es tradueixen en una reducció del potencial essent el màxim real que s'aconsegueix d'uns 0'8V.

Per tant el potencial real es pot determinar a partir de la diferència entre el voltatge teòric i les pèrdues.

7 AVANTATGES I LIMITACIONS DE LES CEL·LES MICROBIANES



La conversió d'energia des de substrat a electricitat és directa, aconseguint així altes eficiències (80-90% d'eficiència coulòmbica, molt per sobre dels processos de combustió).

No requereix tractament posterior dels gasos donat que principalment es produeix diòxid de carboni d'origen no fòssil i no tenen valor energètic residual.

Sempre que el càtode sigui airejat passivament no és necessària aireació i per tant no necessiten energia.

Operen eficientment a temperatura ambient i, fins i tot, a baixes temperatures diferenciant-se dels altres processos bioenergètics actuals.

Tenen aplicacions potencials en llocs allunyats amb absència d'infraestructura elèctrica.

El combustible és fàcil d'obtenir i manipular. Gran avantatge davant l'hidrogen o el metanol.

Mètode silenciós, que podria ser utilitzat en zones urbanes.



El cost dels elèctrodes i les membranes d'intercanvi catiònic és molt elevat.

La seva aplicació s'ha vist impedita pels baixos voltatges aconseguits.

Varis mecanismes de pèrdua afecten el funcionament de les MFCs limitant la seva aplicació a escala industrial.

La lenta velocitat de reducció de l'oxigen, dificulta transformar amb èxit els reactius en productes, necessitant l'ús de catalitzadors d'alt cost econòmic.

8 PARÀMETRES QUE INFLUEIXEN EN LA PRODUCCIÓ D'ENERGIA EN UNA MFC

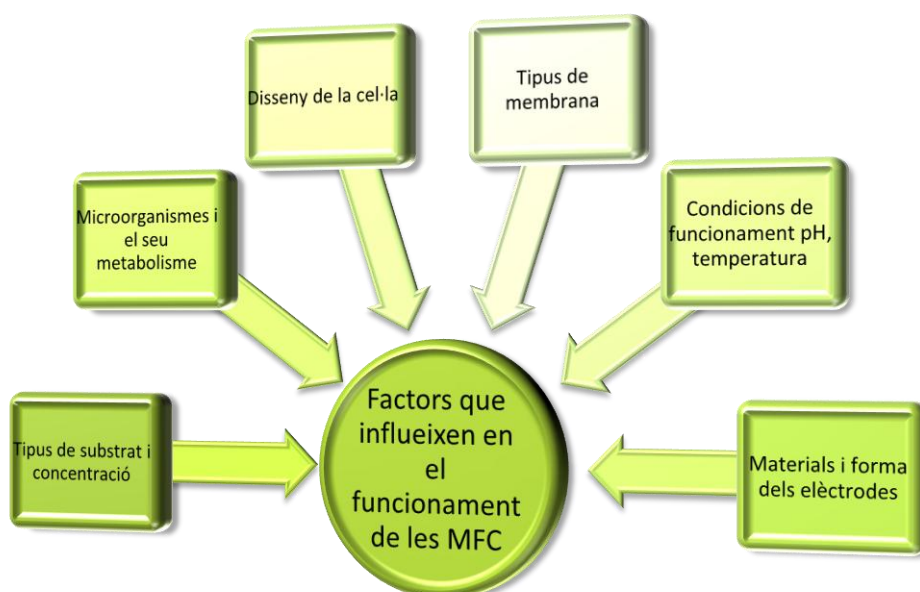
Hi ha diferents factors que afecten el funcionament de les MFCs. Cal reconèixer-los i considerar-los per tal de poder fer que aquesta tecnologia sigui potencialment escalable a un cost raonable.

El funcionament elèctric d'una MFC s'avalua de diverses maneres, però principalment s'estudia a partir de les mesures de voltatge periòdiques que es realitzen en la resistència externa connectada entre l'ànode i el càtode i els càlculs que deriven d'elles (Revelo & Hurtado & Ruiz, 2013). També es pot avaluar la densitat de potència, l'eficiència coulòmbica i la resistència interna.

Així doncs, s'observen clares diferències en la generació d'electricitat de les MFCs degut a la gran varietat de factors que influeixen: materials, disseny, substrat,... Donat el caràcter experimental d'aquesta tecnologia, molts d'aquests factors encara no han estat suficientment estudiats.

Entendre l'efecte que aquests factors i condicions tenen en la producció de voltatge pot oferir-nos millores per optimitzar les MFCs i aconseguir un implant més ampli d'aquesta tecnologia.

Figura 2: Factors que afecten el funcionament de les cel·les de combustible microbianes. Font: Pròpia.



9 EXPERIMENT Nº 1: CONSTRUCCIÓ I POSADA EN FUNCIONAMENT DE LA CEL·LA INICIAL

9.1 OBJECTIU

Construir una cel·la de combustible microbiana amb materials relativament senzills de trobar i comprovar si és possible produir electricitat a partir d'orina. Si s'aconsegueix, s'efectuaran diferents canvis per veure el comportament de la cel·la.

9.2 MATERIAL

S'ha decidit els materials i les característiques de la cel·la en base a tota la informació recollida en la revisió bibliogràfica. No sempre són els més òptims, però s'ha tingut en compte la disponibilitat i el seu cost.

Es necessita dos recipients de plàstic, tubs i rosques, tela de carboni, cable elèctric, resistors, bomba d'aire, agar, sal, fang, aigua i orina. També guants, bàscula, tisores, resina epoxi, paper d'alumini, pot, trepant, broques, alicates, regla, pala i cubell (veure annex 2 per més detall).

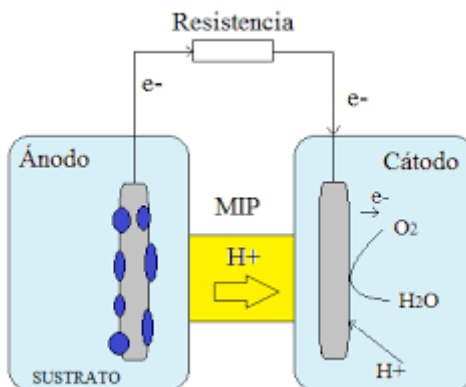
9.3 METODOLOGIA

La cel·la és construïda i posada en funcionament seguint les instruccions de l'annex nº2.

El disseny triat ha sigut el corresponent al d'una cel·la de combustible microbiana amb la configuració de **dues cambres en forma de H** amb un **pont salí** (a base d'agar i NaCl) que fa de membrana semipermeable (veure annex 2).

La variable que controlarem en aquest experiment és el **voltatge**. L'experiment durarà 2 setmanes i es faran mesures de voltatge cada 30 minuts. Aquests resultats s'aniran comparant per determinar si hi ha producció d'electricitat i com evoluciona en el temps.

Figura 3: Esquema del disseny de la cel·la utilitzada en aquest experiment. Font: Romero Ramayo, M. F.



En la bibliografia, els materials descrits per fer servir en l'ànode i el càtode són bàsicament metalls i altres conductors com el grafit o materials de carboni. En el meu treball, ambdós són de **tela de carboni**. Generalment en el càtode s'utilitza un catalitzador per accelerar la reacció a base de platí. Per motius econòmics, però, no posaré catalitzador de platí.⁶

Com inòcul es poden utilitzar cultius purs d'una sola espècie microbiana o cultius mixtes. Els mixtes són més econòmics i més resistents als canvis ambientals. Per aquest motiu els més usats són els llots anaeròbics. En la meua cel·la utilitzaré **fang**⁷. En el fang hi haurà una barreja de microorganismes aerobis i anaerobis. Els microorganismes que es necessiten són anaeròbics. Per tant, el recipient de l'ànode haurà d'estar hermèticament tancat per evitar la presència d'oxigen i evitar el creixement dels aerobis.⁸

Imatge 4: Muntatge de l'experiment. Font: Pròpia

La font de substrat serà **orina**.

Com a catòlit s'utilitzarà **aigua** potable. Afegirem 120 g de sal per augmentar la conductivitat i ajudar els ions d'hidrogen a reduir-se amb l'oxigen. La cambra del càtode on es troba el catòlit serà airejada constantment (mitjançant una bomba) per augmentar la concentració d'**oxigen** i facilitar la reacció. L'oxigen és l'acceptor d'electrons més adequat per a les MFCs degut al seu alt potencial d'oxidació, la disponibilitat, el seu baix cost i



⁶ Això segurament em donarà una velocitat de reducció de l'oxigen molt més lenta.

⁷ Recollit d'un rec que passa per darrera de casa meua. Així durant la quarantena Covid no vaig haver de sortir de casa.

⁸ En alguns estudis s'injecta gasos com el nitrogen en la cambra anòdica per tal de desplaçar qualsevol resta d'O₂.

que el residu que forma com a producte és aigua. Altres autors han utilitzat ferrocianurs i permanganats.

La temperatura d'operació serà la temperatura ambient.

9.4 OBTENCIÓ DE DADES

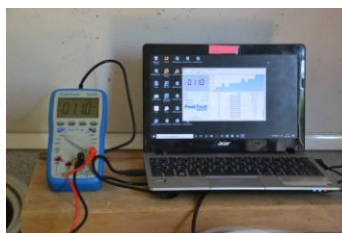
El voltatge és mesurat amb un multímetre digital. Per monitoritzar les dades es connecta de manera permanent a un ordinador per USB mitjançant l'aplicació DMMTool®. D'aquesta manera es recullen automàticament els voltatges registrats segons l'interval de temps que demanem.

La intensitat es calcularà a partir de la Llei d'Ohm ($V=I \cdot R$), també es calcularà la densitat de potència en mW/cm^2 mitjançant la fórmula $P= I \cdot V$.

Figura 4: Multímetre Font: Peak Tech



Imatge 5: Multímetre connectat al PC. Font: Pròpia



9.5 RESULTATS⁹ I DISCUSSIÓ

Es va construir la primera cel·la el 13 d'abril 2020 però al cap d'uns dies el contingut del compartiment anòdic va fermentar. Probablement degut a que la resistència externa utilitzada era massa alta i no deixava que els electrons fluïssin fàcilment pel circuit extern i els bacteris es van veure obligats a buscar una altra alternativa. Si en el substrat hi ha oxigen difós com a alternativa els electrons es desviaran fent fermentació. Per tant és molt important evitar la presència d'oxigen (bombolles d'aigua) en la cambra anòdica per evitar que reaccionin amb ell enlloc de l'elèctrode.



Imatge 6 Contingut fermentat del compartiment anòdic

⁹ Mostra dels llistats de resultats obtinguts en l'annex 8..

En la cel·la del segon intent, per evitar que fermentés, es va posar primer una resistència externa prou baixa (de 220Ω) que facilitava el pas dels electrons permetent així que els bacteris s'adaptessin i formessin una comunitat estable. Quan s'havia estabilitzat el voltatge (6è dia), es va canviar per una de 470Ω .

En primer lloc, cal destacar que la producció elèctrica d'aquesta segona MFC fou positiva durant la major part del temps, començant per uns 8 mV i incrementant progressivament. Quan la MFC va ser posada en marxa va tenir lloc una fase d'adaptació on es va produir poc voltatge al principi amb alts i baixos seguida d'un creixement ràpid en les següents hores. El seu punt màxim va ser al 5è dia, arribant a un voltatge de 88,3 mV que es va mantenir més o menys estable. Al canviar la resistència externa el màxim que es va obtenir va ser de 157,4 mV.



Imatge 7: Gràfic del comportament del voltatge en la fase d'aclimatació bacteriana. Font: DMMTool®

Els resultats dels diferents paràmetres van ser:

Resistència	220 Ω (5 primers dies)	470 Ω (a partir del 6è dia)
Voltatge màx.	88,3 mV	157,4 mV
Intensitat màx.	0.401 mA	0,335 mA
Potència màx.	35,44 mW	52,71 mW
Densitat de potència/cm² màx.	0,709 mW/cm ²	1,054 mW/cm ²

És a dir, la densitat de potència amb 470Ω fou un 48,66 % major que l'obtinguda amb una de 220Ω .

Aquests valors obtinguts es troben per sota respecte d'altres treballs reportats en la bibliografia. El baix rendiment podria ser atribuït a l'alta resistència interna del pont salí comparat amb la membrana polimèrica. En l'estudi de Min et al.

(2005) que també van utilitzar un pont salí en comptes de la membrana PEM, van obtenir igualment valors molt baixos (de $2,2 \text{ mW/m}^2$).

Com que el fang que hem utilitzat com a inòcul actua com a font de microorganismes, els voltatges que obtenim estan directament relacionats amb el creixement microbià. Podem veure que la producció de voltatge en una MFC segueix el mateix model que el creixement bacterià (adaptació, fase exponencial, fase estacionària i al final, una fase de declinació). En el nostre cas, hi ha la fase d'adaptació el primer dia on dona poc voltatge, després creix progressivament durant els 3 dies següents i a partir d'aquí s'estabilitza.

Després de 6 dies de funcionament, un cop la cel·la tenia un comportament estable, es van fer dos experiments més: el nº2 (buscar la resistència interna) i el complementari nº1 annex 3 (oxigenació del càtode).

Finalment el voltatge anava disminuint gradualment a mesura que la matèria orgànica era consumida. Al final de l'experiment encara donava uns 105 mV. Acabaria donant 0V quan el produís la mort cel·lular de la totalitat dels bacteris.

9.6 CONCLUSIONS

S'ha pogut construir una MFC de dues cambres tipus H capaç de recuperar directament l'energia de la matèria orgànica continguda en orina. La producció d'energia ha estat contínua durant 15 dies tot i que ha estat molt baixa.

Una MFC no es comporta de la mateixa manera que una cel·la de combustible convencional degut a la presència de microorganismes i els seus processos biològics. La producció de voltatge en les MFCs està directament relacionada amb el creixement bacterià.

10 EXPERIMENT Nº2: DETERMINACIÓ DE LA RESISTÈNCIA INTERNA DE LA CEL·LA

Les limitacions electroquímiques del funcionament d'una MFC són en part degudes a la **resistència interna**¹⁰ (R_{int}) que ve donada per diferents mecanismes incloent les pèrdues òhmiques, d'activació i per transport de massa (veure annex 1).

La resistència interna de la MFC és una característica essencial ja que, d'acord amb el teorema de Jacobi¹¹, la màxima potència generada per una Font Electromotriu (FEM) s'obté quan la resistència interna és igual a la resistència externa (R_{ext}). Així doncs, una MFC operada sota aquesta condició ($R_{int} = R_{ext}$) donarà la màxima potència (Logan et al., 2006).

10.1 OBJECTIU

Determinar la resistència interna de la cel·la per ajustar la resistència externa al valor ideal que ha de tenir per tal d'operar la MFC a la seva potència màxima. Amb aquesta consideració, canviant la resistència externa es buscarà els valors de voltatge i intensitat que donin la màxima potència.

10.2 MATERIAL

Aquest experiment s'efectuarà en la cel·la inicial que es troba operant amb una resistència externa de 220Ω . Es necessitaran resistors de diferents valors: 10, 100, 220, 470, 1000, 2200, 4700, 22000, 47000 i 100000 Ω .

10.3 METODOLOGIA

L'ànode i el càtode seran connectats mitjançant una resistència externa variada. S'aniran canviant els diferents resistors : 10, 100, 220, 470, 1000, 2200, 4700, 22000, 47000 i 100000 Ω avaluant el voltatge. El temps òptim que

¹⁰ Les fonts electromotrius siguin bateries, generadors, etc. no són ideals (perfectes). Una font electromotriu real està composta d'una font ideal en sèrie amb una resistència (anomenada **resistència interna**).

¹¹ El **teorema de Jacobi o de màxima transferència de potència** estableix que donada una FEM, la resistència externa que maximitza la transferència de potència és aquella amb un valor òhmic igual a la resistència interna de la font.

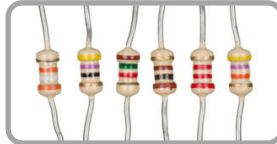
hem d'esperar entre el canvi de resistència serà el temps per a que la MFC s'equilibri de nou abans d'anotar el valor de cada resistència i canviar-la¹².



Per a identificar el valor de la resistència es fa servir un codi de colors. La major part de les resistències tenen impreses sobre la càpsula de protecció quatre bandes de colors.

color	1a banda	2a banda	multiplicador	tolerància
negre	0	0	X1	
marro	1	1	X10	
vermell	2	2	X100	2%
taronja	3	3	X1000	
groc	4	4	X10000	
verd	5	5	X100000	
blau	6	6	X1000000	
violeta	7	7	X10000000	
gris	8	8	X100000000	
blanc	9	9	X1000000000	
or				5%
plata				10%

Kitt Elegoo® amb resistors de diferents valors



Les tres primeres ens donen el seu valor en ohms i la quarta la tolerància (error relatiu) d'aquest valor en percentatge.

El voltatge es mesurarà amb el multímetre digital.

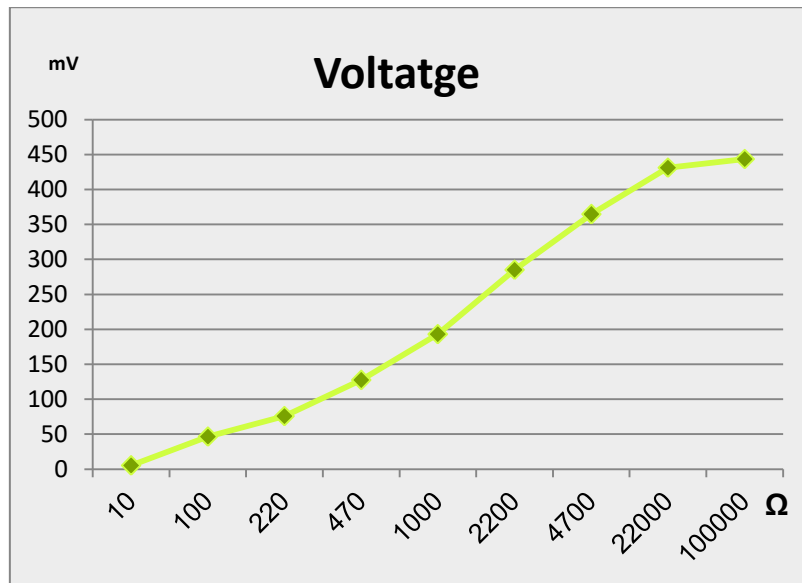
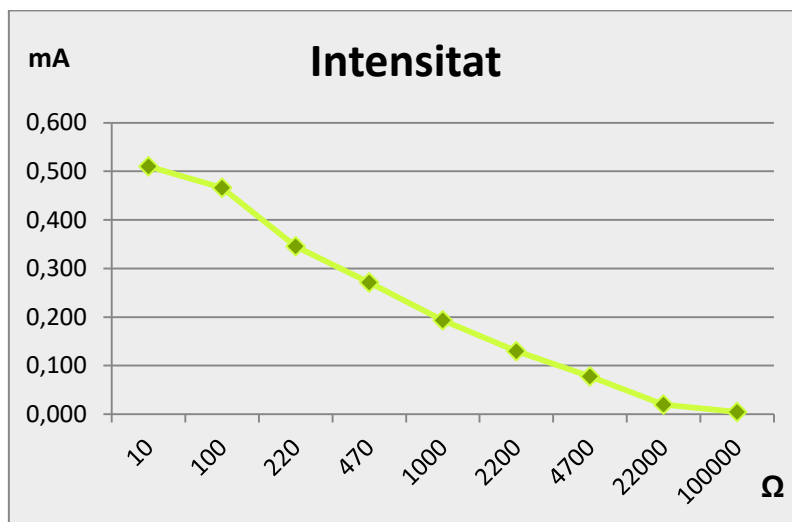
La intensitat es calcularà a partir de la Llei d'Ohm ($V=I \cdot R$), també es calcularà la densitat de potència en mW/cm^2 mitjançant la fórmula $P= I \cdot V$.

10.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

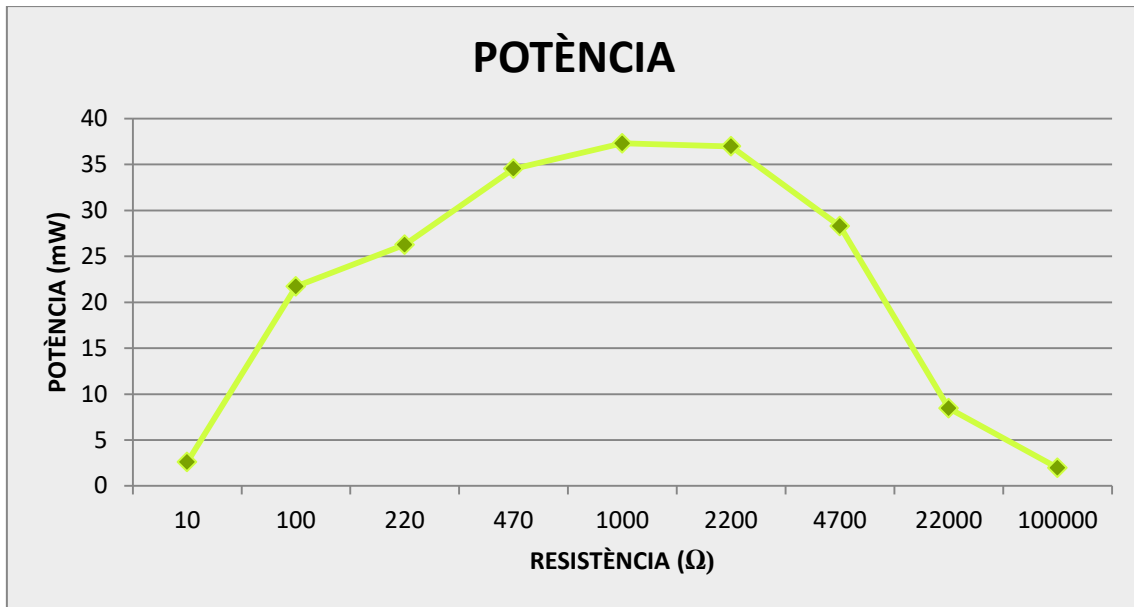
Els valors de voltatge, intensitat i potència que va donar són els següents:

Resistència (Ω)	Voltatge (mV)	Intensitat (mA)	Potència (mW)	1/Intensitat 1/mA
10	5,1	0,051	2,60	1,960
100	46,6	0,466	21,71	2,145
220	76	0,345	26,25	2,894
470	127,4	0,271	34,53	3,689
1000	193,1	0,193	37,28 (màx)	5,178
2200	285,2	0,130	36,97	7,713
4700	364,6	0,078	28,28	12,890
22000	431,3	0,020	8,45	51,008
47000	437,8	0,009	4,07	107,354
100000	443,6	0,004	1,96	225,428

¹² En el nostre cas hem canviat la resistència cada 30 minuts, temps que ha permès al voltatge estabilitzar-se.

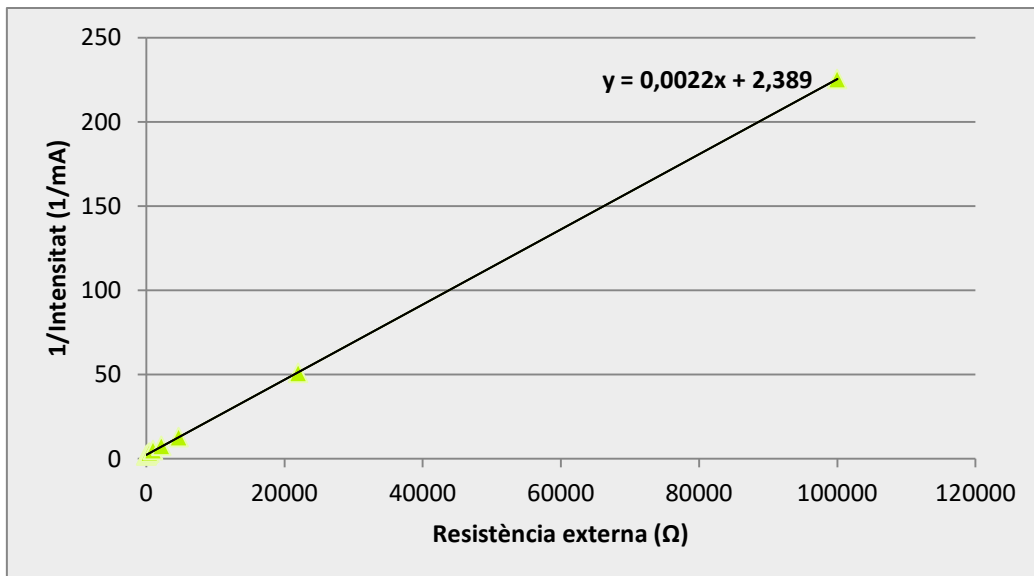
Gràfic 1: Voltatge en funció de la resistència externa**Gràfic 2: Intensitat en funció de la resistència externa.¹³**

¹³ Es va a calcular a partir de la Llei d'Ohm ($V=I \cdot R$)

Gràfic 3: Potència en funció de la resistència externa.¹⁴

10.4.1 CÀLCUL DE LA RESISTÈNCIA INTERNA:

Dels valors obtinguts es pot extreure el següent gràfic:

Gràfic 4: Invers de la Intensitat en funció de la resistència externa

¹⁴ Es va calcular mitjançant la fórmula: $P=V \cdot I$.

I mitjançant l'ús del software de càlcul de Microsoft Excel, aconseguim l'equació de la recta de regressió ($y = 0,0022x + 2,389$) que ens ajudarà a obtenir el valor de la **força electromotriu ($\mathcal{E}$)** de la MFC i la relació d'aquest valor amb la resistència interna¹⁵ (R_{int}). Es farà amb els càlculs següents:

Partint de les següents equacions:

$$V = I * R_{ext}$$

$$V = \mathcal{E} - (R_{int} * I)$$

Utilitzem el mètode d'igualació per obtenir la següent fórmula:

$$I * R_{ext} = \mathcal{E} - (R_{int} * I)$$

$$I * R_{ext} + R_{int} * I = \mathcal{E}$$

$$I(R_{ext} + R_{int}) = \mathcal{E}$$

$$I = \mathcal{E} / R_{ext} + R_{int} \quad \frac{1}{I} = \frac{R_{ext}}{\mathcal{E}} + \frac{R_{int}}{\mathcal{E}}$$

La fórmula de la línia de tendència de la gràfica és:

$$y = 0,0022x + 2,389$$

On: $y = \frac{1}{I} \quad x = R_{ext}$

Llavors obtenim que:

$$0,0022R_{ext} + 2,389 = \frac{1}{I} = \frac{R_{ext}}{\mathcal{E}} + \frac{R_{int}}{\mathcal{E}}$$

D'aquesta igualtat deduïm que:

$$0,0022R_{ext} = \frac{R_{ext}}{\mathcal{E}}$$

$$2,389 = \frac{R_{int}}{\mathcal{E}}$$

¹⁵ D'acord amb diversos autors (He et al. 2005, Kim et al.2007) la R_{int} d'una MFC es pot extreure de la recta de regressió de la intensitat respecte la R_{ext} .

Amb aquest sistema d'equacions, primer trobem el valor de la força electromotriu:

$$0,0022 R_{ext} = \frac{R_{ext}}{\mathcal{E}} \quad 0,0022 = \frac{1}{\mathcal{E}} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{0,0022} = 454,55 \text{ mV}$$

Ara, amb el valor de la força electromotriu som capaços de calcular la R_{int} :

$$2,389 = \frac{R_{int}}{\mathcal{E}} \quad 2,389 * \mathcal{E} = R_{int} \quad 2,389 * 454,55 = \mathbf{R_{int} = 1085,92 \Omega}$$

La resistència interna va ser de **1085,92 Ω** .¹⁶

Si observem la taula de valors, veiem que la potència màxima obtinguda ha estat amb la R externa de 1000 Ω que és la més propera al nostre resultat, tal com diu el teorema de Jacobi:

$$P = V * I \longrightarrow P = 193,1 * 0,193 = \mathbf{37,27 \text{ mW}}$$

Al finalitzar l'experiment de la corba, novament es va operar la MFC amb 220 Ω aconseguint de nou un estadi estacionari del sistema que coincideix amb el valor de l'inici.

10.5 CONCLUSIÓ

Es va comprovar tal com s'esperava que una resistència menor registra un menor voltatge. A baixes resistències els electrons es mouen més fàcilment a través del circuit i per tant donen una major corrent.

Es va poder demostrar el Teorema de Jacobi que postula que la potència generada en el sistema serà màxima quan la R_{int} sigui igual a la R_{ext} .

El valor de la Resistència interna obtingut ha estat de **1085,92 Ω** .

La potència màxima s'aconsegueix quan la Resistència externa és de 1000 Ω .

¹⁶ Aquesta R_{int} del sistema és força alta si ho comparem amb altres estudis.

11 EXPERIMENT N°3 : DETERMINACIÓ DEL MATERIAL ÒPTIM PER L'ELÈCTRODE DE L'ÀNODE

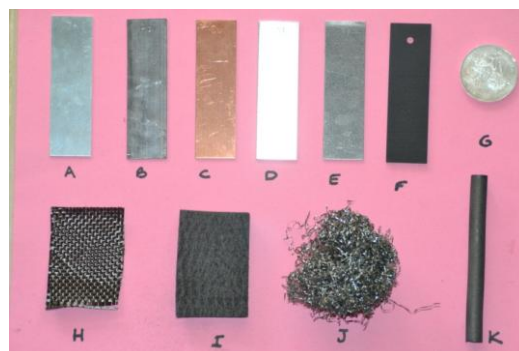
Tenint en compte la part teòrica i els antecedents estudiats sabem que el rendiment de la MFC variarà en funció del tipus de material utilitzat com a elèctrode de l'ànode. Per tant el tipus d'elèctrode usat afectarà la producció d'electricitat.

11.1 OBJECTIU

L'objectiu principal d'aquest experiment és determinar quin és el material òptim d'entre els més utilitzats en altres estudis amb el que podem construir l'elèctrode de l'ànode per tal de maximitzar la producció elèctrica d'una pila microbiana.

11.2 MATERIAL

Basant-nos en la bibliografia vàrem escollir els següents materials com a elèctrodes anòdics: coure, zinc, ferro, alumini, plom, grafit en barra, grafit en placa, plata, acer inoxidable, feltre de carboni i tela de carboni, i es va construir cel·les d'una sola cambra per cada un dels materials a testar. Veure l'annex 2: *Construcció de les cel·les*.



Imatge 8: Diferents elèctrodes utilitzats en l'experiment. Font: Pròpia

Taula 1: Dimensions i àrea total dels diferents elèctrodes

	Material	Dimensions	àrea total
A	Zinc (Zn)	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
B	Plom (Pb)	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
C	Coure (Cu)	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
D	Alumini (Al)	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
E	Ferro (Fe)	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
F	Placa grafit	Placa 2.5 cm x 8.5 cm	42,5 cm ²
G	Plata (Ag)	Moneda	27,64 cm ²
H	Tela de carboni	5 cm x 5cm	50 cm ²
I	Feltre de carboni	5 cm x 5 cm	50 cm ²
J	Acer inoxidable	*no s'ha determinat	*no s'ha determinat
K	Barra grafit	10 cm x 1 cm Ø	32,99 cm ²

11.3 METODOLOGIA

Dins d'un recipient amb fang soterrem diferents materials capaços de fer d'elèctrode durant 8 dies per facilitar el procés d'aclimatació bacteriana i la formació d'un *biofilm*¹⁷ al voltant d'aquests. Un cop passat els 8 dies, quan suposadament s'hagin aclimatat les bactèries, es procedeix a connectar aquests elèctrodes dins una cel·la d'una cambra i a mesurar el voltatge cada 3 hores durant 3 dies.

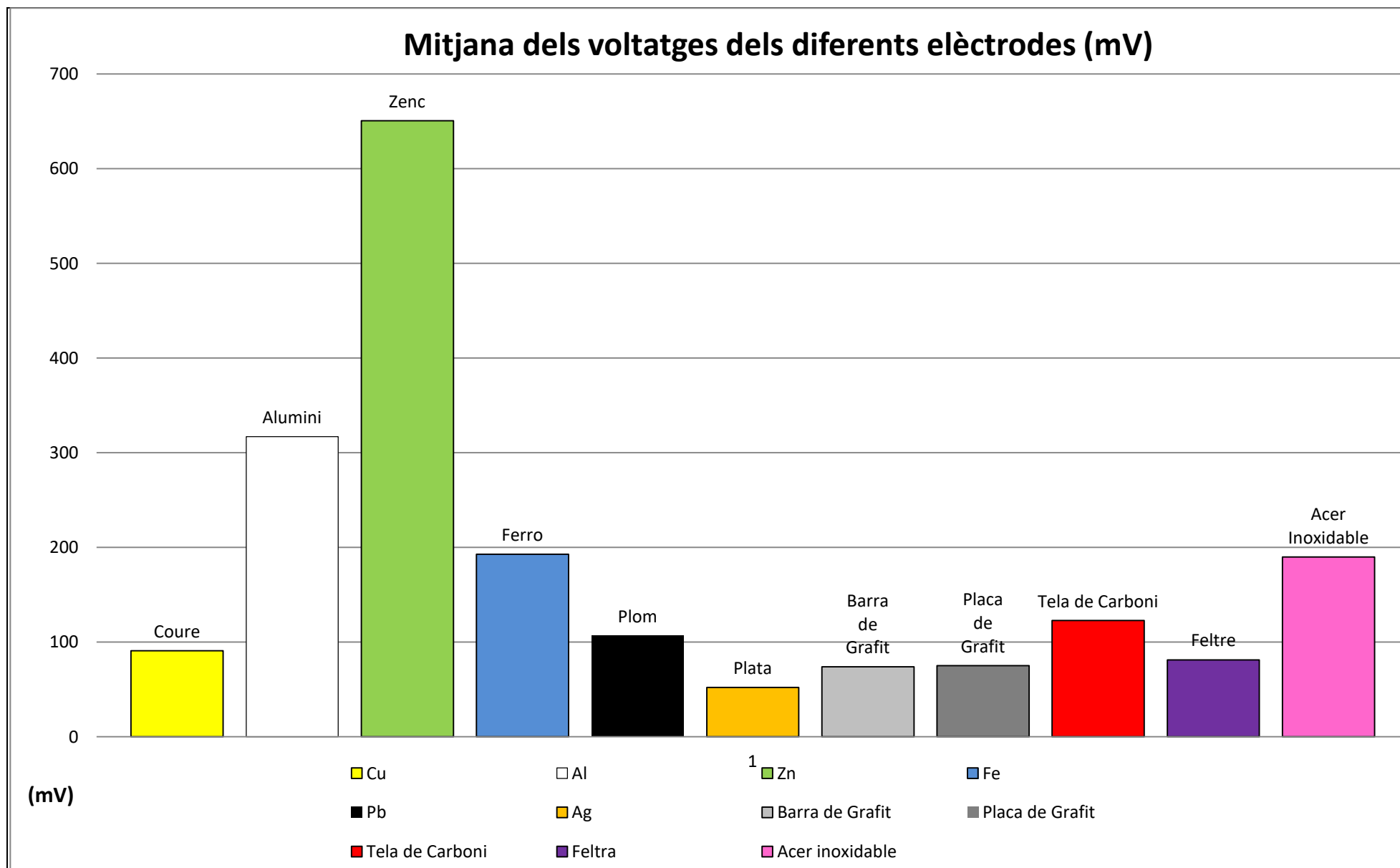


Imatge 9: Muntatge de les cel·les de l'experiment. Font: Pròpia

¹⁷ Biofilm: Comunitat complexa de microorganismes que s'adhereixen a l'elèctrode i produeixen un polímer cel·lular com a recobriment que els ajuda a retenir nutrients i a protegir-se d'agents tòxics per finalment poder produir electricitat.

11.4 RESULTATS: TAULA AMB ELS VALORS DE VOLTATGE OBTINGUTS EN L'EXPERIMENT N°3

	Cu (mV)	Al (mV)	Zn (mV)	Fe (mV)	Pb (mV)	Ag (mV)	Barra de Grafit (mV)	Placa de Grafit (mV)	Tela de Carboni (mV)	Feltre (mV)	Acer inoxidable (mV)
Día 1	106,4	238,9	789	367,4	282,3	109	23,3	78,3	132,2	116,1	263
Día 1 +3h	113,4	343,6	755	281,6	221,3	54,2	31,6	130,2	123,8	91	230
Día 1 +6h	190,5	360,3	745	249,3	186,8	41,7	36,3	71,1	124,5	92	213,5
Día 1 +9h	88,6	350,7	738	228,1	149	39,3	39,5	70,3	120,2	92,8	214,2
Día 1 +12h	107,2	259,7	729	221,6	122,9	41,1	42,1	74,5	123,3	89,3	200,3
Día 1 +15h	103,8	360,6	714	207,6	104,9	46	50,3	74,8	118,7	70	180
Día 2	89,9	339,4	642	187,6	84,7	48,2	77,9	70,9	140,9	63,2	161,5
Día 2 +3h	84,7	333,2	650	176	78,5	54,4	79,7	71,7	141,2	58,1	162,7
Día 2 +6h	86,3	331,4	646	182,2	78,3	53,6	89,9	71,4	137,9	64,3	164,4
Día 2 +9h	80,7	331,8	645	184,2	82,6	56,1	90,3	85,8	131,2	62,9	169,7
Día 2 +12h	80,1	315,3	628,9	166,2	76	60,2	94,4	76,3	108,2	69	177,1
Día 2 +15h	69,7	307,2	611	156,3	68,5	52,9	102,1	88,7	103,1	68,6	182,4
Día 3	73,1	365,1	618	164,7	73,1	53,1	95,8	84,1	135,2	103,7	196,3
Día 3 +3h	59,9	280,5	556,4	127,1	58,5	44,4	91,7	62,9	129,2	87,9	200,9
Día 3 +6h	74	303,5	574	159,1	69,7	51,7	90,3	61,8	108	83,1	202,2
Día 3 +9h	73	350,1	577	162,3	71,1	47,9	86,5	63,2	117,4	85,5	175,7
Día 3 +12h	77,5	271,3	548,6	130,5	59,2	44	113,3	60,5	106	81,9	163,3
Día 3 +15h	78,3	262,7	545,9	118,7	55,1	38,9	93,8	55,5	108,1	83,5	162,3
Mitjana mV	90,95	316,96	650,71	192,80	106,80	52,03	73,82	75,11	122,72	81,27	189,97

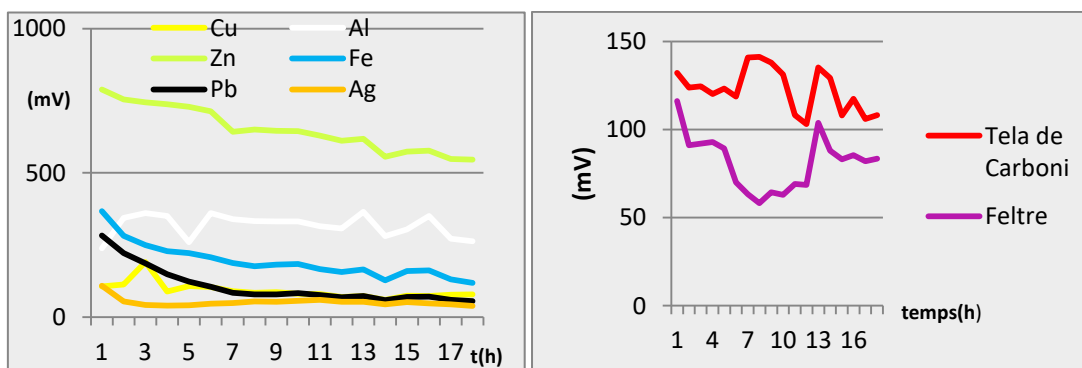


11.5 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats obtinguts ens permet observar que el material amb el que ens va donar més voltatge fou el **zinc** seguit de l'alumini. Els voltatges decreixen en aquest ordre:

Zinc > Alumini > Ferro > Acer inoxidable > Tela de carboni > Plom > Coure > Feltre de carboni > Placa de grafit > Barra de grafit > Plata

Veiem en els següents gràfics que en general, amb els materials metàl·lics aconseguim majors voltatges però es van perdre gradualment, mentre que els materials de carboni com la tela o la feltre, tot i donar valors més baixos (amb alts i baixos molt marcats), els mantenen més en el temps.



Gràfic 5: Voltatges aconseguits amb els diferents materials

També veiem que alguns materials han sofert cert grau de **corrosió** amb els dies que han estat soterrats en el fang. Els productes que es produeixen en aquest procés poden ser tòxics per les bactèries. Això pot explicar com materials tan conductors com el coure, no aconsegueixen donar-nos valors més alts.



Imatge 10: Cu, Fe, Zn, Pb oxidats. Font: pròpia

En canvi, la naturalesa no oxidativa de la tela de carboni i la feltre ofereixen estabilitat a llarg termini. Això ens fa pensar que són un bon medi per a la fixació i el creixement de les comunitats bacterianes

La barra de grafit s'ha utilitzat com a elèctrodes en molts estudis (Chaudhuri i Lovley 2003; Liu et al 2004; Reimers et al 2006), ja que a més de ser barates, són altament conductores i tenen àrees de superfície definides. Tanmateix, en el nostre experiment no ha mostrat gaire bons resultats. La placa de grafit produeix menys energia si ho comparem amb el feltre i la tela de carboni, probablement a causa de la seva estructura, ja que no és gaire porosa i té una superfície específica més petita.

Si ens fixem en estudis publicats, els materials més utilitzats són, en general, aquells que presenten carboni en la seva estructura. L'ús de materials metàl·lics en l'ànode també és freqüent ja que són molt més conductors que els materials carbonosos però més corrosius. (Santoro et al., 2017). Sabem que els materials de l'elèctrode han de ser elèctricament molt conductius però al mateix temps no han de ser corrosius, el que exclou molts metalls. Fins i tot els millors materials conductors poden no ser els més adequats

11.6 CONCLUSIONS

Els resultats del nostre experiment indiquen que el **zinc** és el material que dona les millors condicions per a que les bactèries transfereixin electrons al circuit extern de la MFC. Tot i ser un metall no presentava gaire corrosió. Així doncs, els zinc pot ser un bon material per a la construcció de la cel·la final.

12 EXPERIMENT N°4: OBSERVACIÓ DELS MICROORGANISMES PRESENTS EN ELS ELÈCTRODES

Els microorganismes juguen un paper clau en el funcionament de les MFCs que cal estudiar a fons. Per la bibliografia sabem que com a inòcul d'una MFC és millor fer ús de cultius mixtes perquè aquests generen alts potencials i són més econòmics, menys exigents i menys sensibles a variacions de temperatures i pH que els cultius purs (Du et al., 2007). Els consorcis bacterians desenvolupen una cooperació metabòlica que els permet degradar millor la matèria orgànica. Per a conèixer els microorganismes presents en els consorcis i la possible interacció metabòlica entre ells, es fan cultius anaeròbics i posterior aïllament, identificació i extracció de l'ADN. (Pant et al., 2010). Un primer pas per aquest estudi pot ser la simple observació de presència dels microorganismes sobre la superfície dels elèctrodes.

12.1 OBJECTIU

Estudiar la presència de microorganismes en els elèctrodes de les MFCs que hem construït observant-los mitjançant una tinció de Gram per avaluar la idoneïtat de cada material. Cal conèixer primer quin tipus de bacteris es troben normalment en aquests ambients i les seves característiques (veure annex 1). Caldrà també estudiar què és una tinció de Gram, per a què serveix i com es realitza (veure annex 7) .

12.2 METODOLOGIA

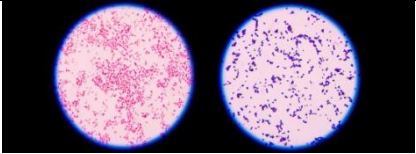
Un cop acabat l'experiment n°3, es pren una mostra de cada elèctrode amb un escovilló estèril i suament es prepara l'extensió sobre el portaobjectes. Es deixar assecar, es fixa amb metanol i es tenyeix mitjançant la tècnica de Gram. Finalment, s'observarà al microscopi per tal de determinar la presència o no de microorganismes, així com la quantitat i les



Imatge 11: Tinció de Gram. Font: Pròpia

característiques dels que s'hi trobin (morfologia, mida, color,...). Veure Annex 7: Tinció de Gram.

12.3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

<i>MATERIAL</i>	Morfologia		Tinció Gram	
	Cocs	Bacils	Gram -	Gram +
				
Acer inoxidable	+++			+++
Ferro	+	+	++	
Coure	-	-	-	-
Plom	+			+
Plata	+	+ (alguns molt grans)	+	+
Grafit barra	+	+	+	+
Feltre carboni	+	++++ (alguns molt grans)	++++	+
Zinc	++	+++ (formen cordons)	+	++++
Tela carboni		++	+	+
Grafit placa		++	+	+
Alumini		+++		+++

Les imatges observades al microscopi de les mostres preses de les superfícies dels elèctrodes mostren la presència de diferents tipus de bacteris.

Podem veure diferències entre la població bacteriana de cada un dels elèctrodes, alguns són bàsicament cocs, altres bacils i altres una barreja dels

dos. És normal que existeixen consorcis microbians ja que el fang no és un cultiu pur sinó un substrat complex amb presència de diferents tipus de bacteris.

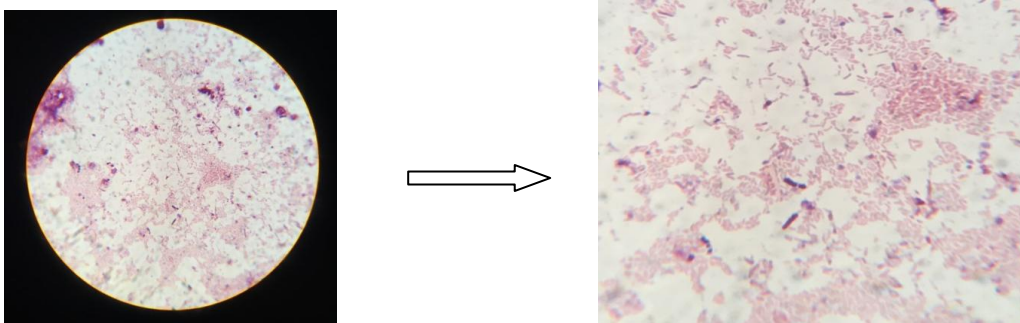
Dels materials estudiats veiem més quantitat de bacteris en l'elèctrode de feltre de carboni en comparació als metàl·lics. Això podria ser degut a que és un material més biocompatible que els metalls. En aquest elèctrode de feltre es veuen gran quantitat de bacils Gramnegatius. Amb una tinció de Gram, però, no és possible establir a quin grup particular pertanyen. Contràriament, la mostra corresponent a la tela de carboni que també es considera biocompatible, mostra pocs bacteris.

12.4 CONCLUSIONS

Els resultats ens indiquen que existeix diversitat bacteriana en els ambients estudiats tot i que en alguns d'ells predominen de forma clara els bacils Gramnegatius, cosa que fa pensar que podrien tractar-se de bacteris electrogènics. No és possible, però, determinar l'espècie només amb una tinció de Gram.

Els materials que hem observat amb més quantitat de bactèries han estat la feltre de carboni i el zinc, seguit de l'alumini i l'acer inoxidable.

Imatge 12: Tinció de Gram de la superfície del Zinc. Font: Pròpia.



13 EXPERIMENT Nº5: COMPARACIÓ DE TRES TIPUS D'INÒCULS

En les MFCs és imprescindible l'aporta de substrat com a font de matèria orgànica i de bacteris capaços de degradar-la i generar electricitat. Segons la bibliografia es pot utilitzar com a substrat qualsevol tipus de residu orgànic. S'han utilitzat una gran varietat de substrats i s'han reportat resultats molt diversos, ja siguin amb sediments marins, sòl, aigües residuals, llots activats, etc. Els substrats més complexos tenen un especial interès perquè ja aporten els microorganismes necessaris per fer d'inòcul. Aquests microorganismes es van seleccionant en funció dels nutrients presents.

13.1 OBJECTIU

L'objectiu d'aquest experiment és determinar quin tipus de substrat complexa d'entre **el fang, el compost i els fems** funciona millor en una MFC.

13.2 MATERIAL



Imatge 13: Cel·les experiment nº5. Font: Pròpia

- **Fang** (material extret d'un rec. És el mateix material utilitzat en els altres experiments).
- **Compost** (recollit d'un compostador domèstic)
- **Fems de vaca** (recollits en una granja de Vilanova de la Muga).

També 3 cel·les d'una sola cambra (Annex 2), elèctrodes de tela de carboni, cables amb pinces de cocodril, resistència 1K Ω , disc d'agar, tubs de plàstic i connectors per administrar oxigen mitjançant la bomba d'aire.

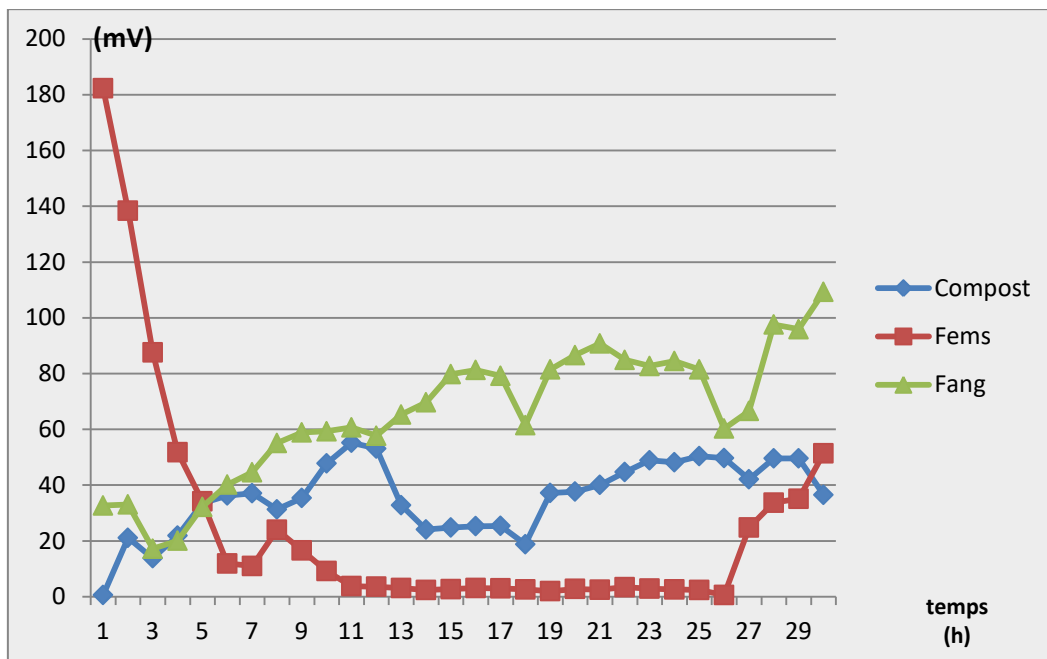
13.3 METODOLOGIA

En aquest experiment els 3 tipus de sediment (fang, compost i fems) seran utilitzats en 3 cel·les microbianes de combustible. El voltatge que es produeixi es comprovarà de manera manual cada 2 hores durant 3 dies. Les cel·les estaran a temperatura ambient (23°C).

13.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

El gràfic següent ens mostra els resultats obtinguts al llarg de l'experiment.

Gràfic 6: Voltatge obtingut amb els diferents inòculs



Els fems formen un material molt ric en matèria orgànica (conté 48-50%)¹⁸ i bacteris. Podríem pensar que un major percentatge de matèria orgànica i bacteris significaria la producció de més electrons i per tant més electricitat. Els resultats mostren que efectivament els fems comencen donant un valor molt més alt que els altres. No obstant, al cap de poques hores aquest voltatge decreix dràsticament fins arribar a valors propers a 0. Curiosament, el que dona

¹⁸ Aquests percentatges són extrets de la bibliografia. Les mostres de l'estudi poden variar.

millor resultats al llarg de l'experiment és el fang tot i tenir menys matèria orgànica (4-5%). El compost, amb un valor aproximat de 20% de matèria orgànica, és el que s'ha mantingut en segon lloc la major part del temps.

Com hem vist en aquest experiment els fems de vaca tenen un potencial limitat per servir com a matèria primera per a la producció d'electricitat a través d'una MFC. Aquests resultats són comparables al treball d'investigació de Ríos S.C.(2016) on els voltatges aconseguits en MFCs utilitzant fems de vaca eren baixos en comparació amb altres tipus de substrats complexes. Probablement per la dificultat dels bacteris a formar un bon biofilm.

El fet de generar energia sense la necessitat d'enriquir els substrats demostra que els microorganismes tenen la capacitat de generar energia utilitzant exclusivament els diferents compostos presents en els diferents substrats complexes. Això confirma la possibilitat d'operar dispositius en llocs remots sense electricitat.

13.5 CONCLUSIONS

En una MFC, els substrats complexes com els fems, el compost i el fang són capaços de fer de substrat i d'inòcul alhora.

Els voltatges produïts utilitzant fems de vaca i compost com a substrat són més baixos que els aconseguits amb el fang extret d'un rec. Per tant, el fang serà l'escollit per a la construcció de la cel·la final.

14 EXPERIMENT Nº 6: EFECTE DE L'ÀREA DE LA SUPERFÍCIE DE L'ELÈCTRODE ANÒDIC

14.1 OBJECTIU

Averiguar si a l'augmentar la superfície de l'elèctrode de l'ànode augmenta també el voltatge i el rendiment de la cel·la.

14.2 MATERIAL

Construirem les cel·les segons les instruccions de l'annex nº2. En les dues cel·les s'utilitzarà com a material per l'ànode tela de carboni. L'única diferència serà les dimensions d'aquest: un serà de 5 cm x 5 cm, i l'altre de 10 cm x 10 cm.



Imatge 14: Cel·les d'una cambra i elèctrodes anòdics. Font: Pròpia.

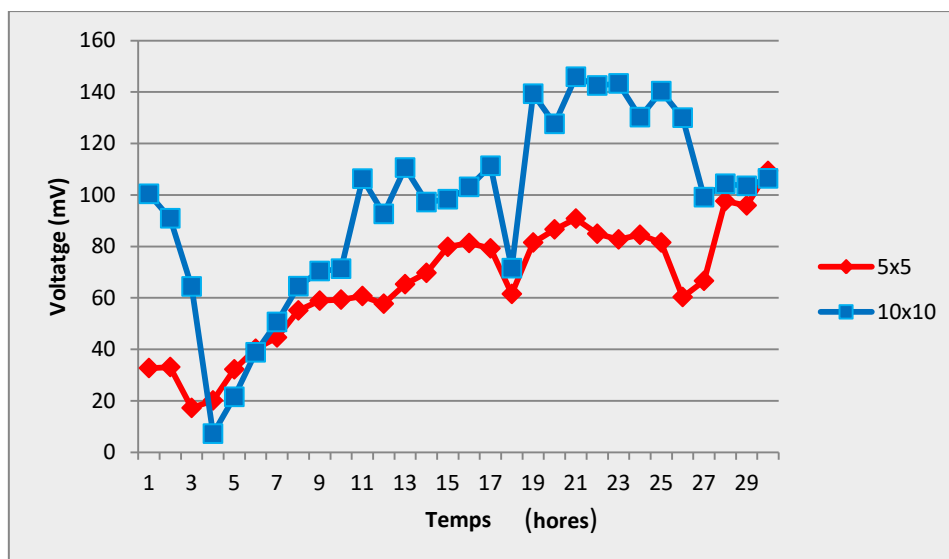
14.3 MÈTODE

El voltatge es comprovarà amb el multímetre de manera manual cada 2 hores durant 3 dies. Les cel·les estaran a temperatura ambient.

14.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Si observem el gràfic següent, a primera vista, veiem que quan augmenta la superfície de l'ànode, el voltatge també ho fa.

Podríem esperar que a l'augmentar la superfície de contacte amb l'inòcul quatre vegades, el voltatge faria el mateix. Els resultats, però, ens mostren que aquest increment no és proporcional (gairebé no representa ni el doble).

Gràfic 7: Voltatge obtingut amb 2 mides d'ànode

A més a més, si es calcula la densitat de potència de cada una de les MFCs trobem que la cel·la amb l'ànode petit produeix $0,0863 \text{ mW/cm}^2$ mentre que en la cel·la amb l'ànode gran s'obté aproximadament la meitat ($0,0462 \text{ mW/cm}^2$).

Així, malgrat la superfície sigui més gran, la quantitat de corrent i potència que es generen no són proporcionals a aquest augment per diverses raons:

- A més superfície, les pèrdues que es produeixen són majors i per tant la pila és menys eficient.

- També pot arribar a ser que hi hagi una limitació en el càtode (en la semireacció de reducció). De fet es considera que el càtode (especialment la disponibilitat de l'acceptor final d'electrons) és un gran limitant en el funcionament d'una MFC.

Un fet curiós que podem veure a la gràfica és que les dues cel·les es comporten amb un patró similar: els creixements i decreixements de voltatge es donen gairebé al mateix temps.

14.5 CONCLUSIONS

Malgrat que augmentar la superfície de l'ànode incrementa la producció de voltatge, aquest augment no es tradueix en un increment de la densitat de potència. Els resultats ens mostren tot el contrari, que hi ha una disminució.

15 EXPERIMENT Nº 7: CONSTRUCCIÓ I ESTUDI DE LA CEL·LA FINAL

15.1 OBJECTIU

L'objectiu final del treball és construir una nova cel·la del mateix tipus que la inicial tot canviant alguns elements segons els resultats obtinguts en cada experiment. Es veurà si aquests canvis ens permeten obtenir un voltatge significativament major i per tant un rendiment de la cel·la més positiu.

15.2 MATERIAL I METODOLOGIA

Basant-nos en els resultats dels experiments anteriors, la cel·la final tindrà les següents característiques:

Característica	Resultat	Nº experiment
Inòcul de bacteris	Fang	Experiment 5
Càtode	Bomba d'aire sí	Annex 3
Elèctrode de l'ànode	Zinc	Experiment 3 + Voltatge Experiment 4 + bacils G-
	Àrea petita ¹⁹	Experiment 6
Resistència externa	1000 Ω ²⁰	Experiment 2

Es construirà de la mateixa forma que la cel·la inicial (Annex 2).

¹⁹ L'àrea de l'elèctrode serà de **42,5 cm²**

²⁰ Per començar, l'ànode i el càtode es connectaran mitjançant una resistència externa de 100 Ω . Es començarà amb una resistència baixa per tal de prevenir les pèrdues d'activació al màxim i facilitar la transferència d'electrons durant el període d'aclimatació. Es busca un estat estacionari.

Imatge 15 Muntatge de la cel·la final. Font: Pròpia

També es monitoritzarà el pH de les dues cambres durant tot el període de funcionament per estudiar la relació que té amb el rendiment de la MFC (veure annex 3).

Finalment, es prendran mostres del substrat a l'inici i al final de l'experiment per avaluar si s'observen canvis en la DQO²¹. Un descens en la DQO indicarà un cert grau de depuració de l'orina (veure annex 5).

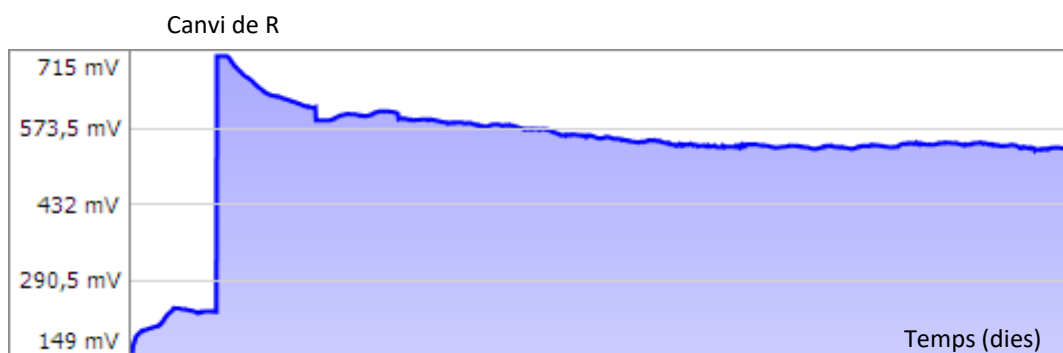
15.3 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Aquests són els resultats obtinguts durant els 31 dies de funcionament :

Cel·la	Inicial	Final
Voltatge màx.	157,4 mV	715 mV
Intensitat màx.	0,335 mA	0,715 mA
Potència màx.	52,71 mW	511,23 mW
Densitat de potència/cm² màx.	1,054 mW/cm ²	12,029 mW/cm ²

²¹ Demanda Química d'Oxigen

La MFC final va generar una densitat de potència màxima de $12,029 \text{ mW/cm}^2$. Si ho comparem amb la cel·la inicial que va donar $1,054 \text{ mW/cm}^2$ podem dir que va donar unes 12 vegades més. Per tant, el fet de millorar alguns dels factors influents en el rendiment de la cel·la ha tingut resultats positius aconseguint una millora notable.



Imatge 16: Gràfic de voltatge en tot el període del funcionament de la cel·la final. Font: DMMTool®

Les dues cel·les han operat a temperatura ambient. La MFC inicial va operar a uns 20°C de mitjana, mentre que la final va operar a uns 25°C .

La **temperatura** és un factor clau en el comportament d'una MFC. Tot i que una MFC pot operar en un gran interval de temperatura, aquesta varia l'activitat metabòlica de les bactèries (si puja la temperatura s'afavoreix les reaccions bioquímiques i s'incrementa la velocitat de creixement bacterià). A més la Rint, un altre factor influent, baixa quan augmenta la temperatura ja que la conductivitat augmenta i millora la cinètica de reducció de l'oxigen. Aquests factors milloren l'eficiència de les MFCs.

Així doncs una part d'aquesta millora del rendiment de la cel·la final envers la inicial podria venir donada per la diferència de temperatura entre els períodes en que van operar.

En l'operació de la cel·la al llarg del mes s'observa una caiguda lenta i gradual del voltatge. Aquesta pot ser per un augment de la **resistència interna** pel deteriorament dels elèctrodes (Santoro et al. 2017). Augment que podria venir per la corrosió del zinc que s'observa al finalitzar l'estudi. Encara que en

l'experiment nº4, on vàrem avaluar els diferents materials, no es va detectar corrosió en 12 dies, al final d'aquest experiment (que va durar més de 30 dies), sí que es va veure afectat. A més sabem que el zinc pot ser tòxic pels microorganismes a altes concentracions, factor que pot ajudar a la pèrdua d'activitat bacteriana i consegüentment de voltatge.



Imatge 17: Elèctrode anòdic de zinc al finalitzar l'experiment. S'observa una forta corrosió. Font: Pròpia

15.4 CONCLUSIONS

La MFC final va generar una densitat de potència màxima de $12,029 \text{ mW/cm}^2$, valor notablement més alt que la inicial. Veiem doncs que millorant els factors influents es pot millorar l'eficiència de les MFCs.

Tenint en compte la corrosió que presenta l'elèctrode de zinc, s'hauria de reconsiderar utilitzar elèctrodes basats en carboni malgrat que els voltatges aconseguits siguin menors ja que presenten una alta estabilitat electroquímica, són biocompatibles i no presenten corrosió.

16 SUMARI DELS RESULTATS DELS EXPERIMENTS

nº	Experiment	Resultat	Anàlisi
1	Funcionament de la cel·la inicial	1,054 mW/cm ²	Es pot produir electricitat a partir d'orina.
2	Resistència interna	1085,92 Ω	Operar amb R _{ext} igual a R _{int} aconsegueix màx. potència
Annex 3 nº 1	Aireació càtode	Al parar la bomba baixa el voltatge	Airejar el càtode incrementa el voltatge
3	Material elèctrodes	Zinc obté voltatge més alt	Metalls donen més voltatge però materials carboni més estabilitat química
Annex 3 nº 2	Connexió en sèrie	1496 mV	Connectant en sèrie les cel·les es sumen els voltatges
4	Observació microorganismes	Zinc i Feltre s'observen més bacteris	Bacteris molt variats però bacils gram – més abundants
5	Inòculs	Fang: voltatge més estable	Inòculs mixtes donen millor resultat
6	Augment superfície ànode	5x5cm=0,0863 mW/cm ² 10x10=0,0462 mW/cm ²	Augmentar la superfície augmenta el voltatge però disminueix la densitat de potència.
7	Cel·la final	12,029 mW/cm ²	Millorant alguns factors s'aconsegueix millorar la densitat de potència
Annex 3 nº 3	pH	Les dues cambres mantenen un pH d'entre 8 i 9	Amb l'orina el pH de l'ànode no s'acidifica
Annex 4	Voltametria dels materials de l'ànode	Zinc perd activitat bioelectroquímica Grafit millora però poca activitat Cu millora molt	S'hauria d'insistir amb materials com el Cu ja que milloren conductivitat amb l'activitat bacteriana
Annex 5	DQO	Inici: 5700 mg O ₂ /litre Final: 720 mg O ₂ /litre	S'aconsegueix “depurar” molta matèria orgànica de l'orina

17 CONCLUSIONS GENERALS

La revisió i anàlisi de la bibliografia i la part més experimental d'aquest treball realitzat permeten obtenir les següents conclusions:

- ❖ Les MFCs constitueixen el principal sistema bioelectroquímic capaç de convertir la matèria orgànica de forma espontània en electricitat, senzillament a través de l'activitat metabòlica dels microorganismes.
- ❖ La generació d'energia a partir d'una MFC individual és encara molt baixa i insuficient per a la majoria d'aplicacions. El valor de densitat de potència més alt documentat en una MFC és de $2'15 \text{ kW/m}^3$ (lluny dels 11 kWh/m^3 del gas natural o dels 9 kWh/m^3 de la benzina). Malgrat els grans avenços tecnològics queda molt camí per a seguir explorant els avantatges i superar les limitacions d'aquests sistemes.
- ❖ La generació d'energia tot i ser molt baixa és continuada en el temps i mentre hi hagi substrat per consumir no s'atura. Es pot emmagatzemar aquesta energia produïda utilitzant per exemple ultracondensadors, fins que sigui suficient per poder utilitzar-la.
- ❖ Amb aquest treball pràctic queda demostrat que hi ha molts factors que influeixen en el rendiment d'una MFC i que variant aquests factors es pot arribar a optimitzar-la i aconseguir valors més alts d'energia.
- ❖ Actualment no representen una opció viable per a la generació elèctrica a escala industrial però s'espera que en els propers anys el seu desenvolupament faci viable la producció d'energia a major escala. El major repte seria escalar aquests sistemes fent que la potència produïda també incrementés proporcionalment.
- ❖ És necessari fer un canvi d'enfocament i considerar l'energia que es pugui obtenir més aviat com una energia de suport més que una alta

producció. Així, es poden implementar en les plantes de tractament d'aigües amb l'avantatge de generar una mica d'energia elèctrica en lloc de consumir-ne. Per tant, el rendiment d'una MFC haurà d'avaluar-se tant des del punt de vista de producció d'energia com el de la depuració simultània de les aigües residuals utilitzades. És a dir, amb el càlcul de l'estalvi d'electricitat que es generi en la depuració.

- ❖ L'orina humana és un substrat interessant que conté un ampli ventall de nutrients i compostos orgànics que es poden utilitzar en una MFC. La seva alta conductivitat ($> 20 \text{ mS cm}^{-1}$) redueix les pèrdues internes dels sistemes bioelectroquímics. De fet, la conductivitat és responsable de fer disminuir la resistència òhmica i augmentar així el rendiment del sistema.

Així doncs, les Cel·les de Combustible Microbianes són una tecnologia emergent que simbolitza la unió de moltes disciplines com ara la química, la física, la tecnologia o la biologia i podrien contribuir a solucionar dos dels problemes més crítics que afronta la societat actual: la crisi energètica i la disponibilitat d'aigua no contaminada.

Considero que s'haurien de concentrar esforços per investigar nous dissenys i materials i entendre millor les interaccions entre els microorganismes i els elèctrodes per així construir MFCs més eficaces i estables en el temps. La utilització de microorganismes amb fins energètics ha de ser considerada com un autèntic repte simplement facilitant que els microorganismes realitzin el que millor saben fer: **transformar la matèria orgànica en energia!**.

18 PERSPECTIVES: COM ES PODEN MILLORAR?

En aquest apartat he recollit els aspectes amb els que es pot treballar per millorar el rendiment de les MFCs:

18.1 STACKS

Per millorar les MFCs es pot ampliar les dimensions dels reactors o connectar múltiples reactors. Però estudis fets fins ara demostren que quan s'augmenta les dimensions de les cel·les, la densitat de potència disminueix degut a la resistència interna volumètrica i al volum del reactor inactiu. La **connexió en sèrie de moltes cel·les individuals** podria ser la solució com he vist en el meu experiment.

18.2 ELÈCTRODES

La utilització de materials nanoestructurats permet l'obtenció de nous materials mitjançant el control de les seves propietats físiques i químiques a escala nanomètrica. Aquests canvis afecten molt positivament la conductivitat electrònica, la reactivitat química i les propietats mecàniques.

En els últims anys molts dels esforços han anat dirigits a desenvolupar i modificar els materials dels elèctrodes per facilitar l'adhesió bacteriana i la transferència d'electrons. S'han provat materials modificats com **Nanotubs de carboni (CNTs) i polímers conductors**.

18.3 BIOCÀTODES

Una nova àrea d'estudi i desenvolupament és el concepte d'usar bacteris com a catalitzador en el càtode, els anomenats **biocàtodes**. Un d'aquest tipus de biocàtode consisteix en la aplicació d'un *biofilm* sobre l'elèctrode per tal de fer que els microorganismes afavoreixin el transport i acceptació d'elèctrons en el càtode i així afavorir la producció de potència del sistema. El cost dels materials baixa ja que no s'utilitza catalitzador metàl·lics com el platí.

18.4 BIOCÀTODES AMB ALGUES

Amb la finalitat d'aconseguir un sistema més sostenible ambientalment favorable, es fan estudis de depuració d'aigua i producció d'electricitat amb MFCs fotosintètiques. En el càtode es podria estalviar el cost d'aïració mecànica externa substituint-lo per algues subministradores d'oxigen, per exemple un cultiu de *Chlorella vulgaris* fent un sistema totalment autosostenible i favorable al medi ambient. Les algues fan servir CO_2 com a font de carboni pel seu creixement. Es podria portar el CO_2 producte de la reacció de l'ànode al càtode i això permetria reduir les emissions de CO_2 de la respiració i del metabolisme bacterià.

19 ANEM MÉS ENLLÀ AMB INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL...

Ja hem vist que la generació d'electricitat és proporcional a la velocitat de creixement i metabolisme de les bactèries, per tant si poguéssim controlar i optimitzar aquest metabolisme es podria aconseguir que la producció d'electricitat també fos màxima.

Caldria pensar en un projecte interdisciplinari que englobi experts en química, robòtica, intel·ligència artificial, microbiòlegs i biòlegs ambientals per optimitzar mitjançant una plataforma robòtica el funcionament de les MFCs. Es controlaria a temps real paràmetres com el pH, concentració de nutrients, concentració d'ions, productes del metabolisme, etc. per així optimitzar el medi i que les comunitats bacterianes poguessin créixer i desenvolupar-se el més ràpid possible. Les dades serien recollides a través d'una interfase, serien estudiades i interpretades amb algorismes i amb un mecanisme de feed-back es podria anar corregint els paràmetres que sortissin dels nivells òptims i així mitjançant bombes dispensarien els productes químics necessaris. Amb tot això integrant un procés d'aprenentatge amb Intel·ligència Artificial es podria aconseguir maximitzar el rendiment de les MFCs.

20 BIBLIOGRAFIA

AGUILAR-GONZALEZ, M. et al. «Estado actual de los Sistemas Bioelectroquímicos:» *AGROCIENCIA*, 2016 Vol 50: 150-166.

ASEIB IDRIS, S. et al. «Electricity generation from the mud by using microbial fuel cell.» *MATEC Web of Conference*, 2016: 1-4.

AZBAR, M. Y. et al. "Development of biohydrogen production by photobiological, fermentation and electrochemical processes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014: 158-173.

BAJRACHARYA, S. et al. "An overview on emerging bioelectrochemical systems." *Renewable Energy* , 2016: 153-170.

BHARGAVI, G., VENU, V. , RENGANATHAN, S. "Microbial feul cells: recent developments in design and materials." *IOP Conf. Series: Materials Scicence and Engineering*, 2018: 1-16.

BIFFINGER, J. C. et al. "The influence of acidity on microbial fuel cells containing *Shewanella oneidensis*." *Biosensors and Bioelectronics*, 2008: 900-905.

BORJAS, Z. "Physiological and operation strategies for optimizing geobacter.based electrochemical systems." *Tesis Doctoral*, 2016.

BOULTER, J., TREVORS, J.T., BOLAND, G.J. "Microbial Studies of Compost: Bacterial Identification, and their potential for Turfgrass Patogen suppression." *Word Journal of Microbiology and Byotechnology*, 2002: 661-671.

CAPODAGILIO, A. G. et al. "Role of operating conditions on energetic pathways in a Microbial Fuel Cells." *ScienceDirect*, 2015: 728-735.

CHAUDHRUI, S.K., LOVLEY, D.R. "Electricity Generation by Direct Oxidation of Glucose in Mediatorless Microbial Fuel Cells." *Nature Biotechnology*, 2003: 1229-1232.

DONOVAN, C. et al. "Sediment microbial fuel cell powering a submersible ultrasonic reciver." *Journal of Power Sources*, 2013: 79-85.

DU, Z. , LI, H. , GU, T. "State of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy ." *Biotechnology Advances* , 2007: 464-482.

ESTEVE-NUÑEZ, A. «Bacterias productoras de electricidad.» *SEM Actualidad* , 2008: 34-39.

EWING, T. et al. "Scale-up of Sediment Microbial Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 272, 2014: 311-319.

FALCON, A. , ESTEBAN, J. , JUAREZ, K. «Bioelectricidad .» *BioTecnología* , 2009: 62-78.

FAN, L.P., LI, J.J. "Overviews on internal resistance and its." *InternationalL Journal of Circuits, Systems and SignalL Processing* , 2016: vol 10.

GAJDA, I. , GREENMAN, J. , IEROPOULOS, I. A. "Recent advances in real-world microbial fuel cells applications." *ScienceDirect*, 2018: 78-83.

GONZÁLEZ DEL CAMPO, A. «Valorización energética y tratamiento de efluentes mediante celdas de combustible microbianas.» *Tesis Doctoral Universidad Castilla-La Mancha*, 2015.

- GUDE, V. G. "Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems." *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2015: 45 52-68.
- GUDE, V. G. "Wastewater treatment in microbial fuel cells-an overview." *Journal of Cleaner Production*, 2016: 287-3067.
- HE, Z., MINTEER, S.D, ANGENENT, L.T. "Electricity Generation from Artificial Wastewater Using an Upflow Microbial Fuel Cell." *Environ. Sci. Technol.*, 2005: 5262-5267.
- HEINZELMANN, E. «A New Technology Breaks Throug: 1000-Litre Microbial Fuel Cells Generates Pure Water and Electricity.» *Biotechnet*, 2019: 334-336.
- KIM, B.H., CHANG,I.S., GADD,G.M. "Challenges in microbial fuel cell development and operation." *Applied Micobiology and Biotechnology*, 2007: 76 485-494.
- LI, J. "An Experimental Study of Microbial Fuel Cells for Electricity Generating: Performance Characterization and Capacity Improvement." *Sientific Research*, 2013: 171-178.
- LIU, H., RAMNARAYANAN, R., LOGAN, B.E. "Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell." *Environ Sci Technol*, 2004: 2281-2285.
- LOGAN, B. E. et al. "Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology." *Environmental Siceince & Tecnology*, 2006: 5181-5192.
- LOGAN, B. E., REAGAN, J. M. "Microbial Fuel Cells, Challenges and Aplications." *Environmental Science & Technology*, 2006: 5172-5180.
- LOVLEY, D. R,. "The microbe electric: conversion of organic matter to electricity." *Curr Opin Biotechnology*, 2008: 564-571.
- LOVLEY, D. R. "Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches." *Current Opinion in Biotechnology*, 2006: 327-332.
- LOVLEY, D.R. " Electromicrobiology." *Annual Review of Microbiology*, 2012: 391-409.
- MIN, B. et al. "Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells." *Water Res.*, 2005: 39:4961–4968.
- NAVA-DIGUERO, P. , CASTILLO-JUÁREZ, M. «Celdas de combustible microbianas como alternativa para atender los retos de la sostenibilidad: Agua, energia y contaminación.» *Revista de Ingeniería Innovativa*, 2018: VOL.2 Nº5 18-34.
- OH, S. T. et al. "Sustainable waste water treatment: how might microbialfuel cells contribute." *Biotechnology*, 2010: 871-881.
- PUIG, S. , SERRA, M. , COMA, M. CABRÉ, M. BALAGUER, M. D. , COLPRIM, J. «Effect of pH on Nutrient Dinamycs and Electricity Production Using Microbial Fuel Cells.» *Bioresource Technology*, 2010: 9504-9500.
- RABAEY, K. , ANGENENT, L. , SCHRÖRDER, U. "Bioelectrochemical Systems." *IWA Publishing*, 2010: 524.
- REDONDO, J. J. «Microorganismos Electrogénicos: Células de Combustible Microbianas.» Alcalà: Facultad de Ciencias, 2018.

- REIMERS, C.E. GIRGUIS, P., STECHER, H.A., TENDER, L.M. "Microbial fuel cell energy from an ocean cold seep." *Geobiology*, 2006: 123-136.
- REVELO, D. M. , HURTADO, N. H. , RUIZ, J. O. «Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica.» *Información Tecnológica*, 2013: 17-28.
- RÍOS, S.C. «Generación de Bioelectricidad con Estiércol de Ganado Vacuno mediante Celdas de Combustible Microbianas.» *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo*, 2016.
- SALA-GARCIA, M. J. et al. «Pilas de Combustible Microbianas: Factores Clave para su diseño.» *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 2014: 1-11.
- SANTORO, C. et al. "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review." *Journal of Power Source*, 2017: 225-244.
- SANTORO, C. et al. "Urine in Bioelectrochemical Systems: An Overall Review". *Chemelectrochem* 2020: 1312-1331.
- SHANMUGANATHAN, P. , RAJASULOCHANA, P. «Factors Affecting The Performance of Microbial Fuel Cells.» *IJMET*, 2018: vol. nº9 137-148.
- SRIKANTH, S. et al. "Synergistic interaction of biocatalyst with bio-anode as a function of electrode materials." *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011: 2271-2280.
- THARALI, A. D. , SAIN, N. , OBSORNE, J. "Microbial fuel cells in bioelectricity production." *Frontiers in Life Science*, 2016: 252-266.
- ZHAO, F. SLADE, R.C., VARCOE, J.R. "Techniques for the study and development of microbial fuel cells: an electrochemical perspective." *Chemical Society Reviews*, 2009: 38 1926-1939.
- ZHOU, T. et al. "Microbial fuels cell-based biosensor for toxicity detectiron: A review." *Sensors*, 2017: 2230.

21 WEBGRAFIA

- AMBIENTE, RETEMA REVISTA TECNICA DE MEDIO. *Sistemas bioelectroquímicos para incrementar la sostenibilidad en procesos de tratamiento de aguas*. <https://www.retema.es/noticia/sistemas-bioelectroquimicos-para-incrementar-la-sostenibilidad-en-procesos-de-tratami-xv9Cl> (Consultat el: 24 de 07 de 20).
- Análisis del suelo agrícola: Guía práctica*. <https://www.agroptima.com/es/blog/analisis-de-suelos-agricolas/> (Consultat el: 30 de 6 de 2020).
- Bacterias productoras de electricidad*. <http://crinoidea.sem microbiologia.org/pdf/actualidad/45/Geobacter.pdf> (Consultat el: 3 de 4 de 2020).
- Demanda química d'oxigen Viquipèdia*. https://ca.wikipedia.org/wiki/Demanda_qu%C3%ADmica_d%27oxigen (últim accés: 06 / 07 / 2020).

El estiércol: material de desecho, de provecho y algo más.

https://www.researchgate.net/publication/297760569_El_estiercol_material_de_desecho_de_provecho_y_algo_mas (Consultat el: 30 de 6 de 2020).

Generalitat de Catalunya. *Manual Operatiu de Disseny*. 2007.

http://www.gencat.cat/mediamb/publicacions/monografies/monografies_univ_8.pdf (últim accés: 28 / 7 / 2020).

Introducció a l'electrònica i els seus components.

<https://niobio.github.io/raspi/electronica/electronica.html> (Consultat el 04 8, 2020).

Kapital Inteligente. <https://www.kapitalinteligente.es/tincion-de-gram/> (Consultat el: 19 de Maig de 2020).

Manual de Compostaje del Agricultor. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf> (Consultat el: 30 de 6 del 20).

Microbial Fuel Cells: An organic way of Energy.

<https://dianapham34.wixsite.com/microbialfuelcells/history> (últim accés: 06/ 27/ 2020).

MUSTAKEEM. *Electrode material for microbial fuel cells: nanomaterial approach*. 11 05, 2015.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s40243-015-0063-8> (Consultat el 4/6/20)

Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html> (Consultat el: 04 de 08 de 2020).

Rosa Codolà, Edurne Narbaiza. *xtec.cat*. 09 / 11 / 2012. <https://apliense.xtec.cat/arc/node/29216> (últim accés: 05 / 08 / 2020).

Sutterstock. <https://www.shutterstock.com/image-illustration/antibiotic-resistant-bacteria-inside-biofilm-3d-734835721> (Consultat el 23 05, 2020).

Viquipèdia, Projecte. *Geobacter metallireducens* *Viquipèdia*.

https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uSzJvFO36yYJ:https://ca.wikipedia.org/wiki/Geobacter_metalireducens+&cd=1&hl=ca&ct=clnk&gl=es (últim accés: 9 / 4 / 20).

Waste Not, Want Not: Use a Microbial Fuel Cell to Create Electricity from Waste.

https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Energy_p026/energy-power/use-a-microbial-fuel-cell-to-create-electricity-from-waste (Consultat el 11/ 11,/2019).

ANNEX 1: BASE TEÒRICA

22 LES BACTÈRIES ELECTROGÈNIQUES

La gran revolució en el camp de les MFCs se ha produït en els últims anys amb el descobriment de les bactèries electrogèniques capaces de transferir electrons a l'ànode amb l'absència de mediadors redox. (Lovley 2006).

Existeix una gran diversitat de bactèries electrogèniques depenent de la naturalesa de l'inòcul, del combustible i del tipus de MFC utilitzada (Logan i Regan 2006).

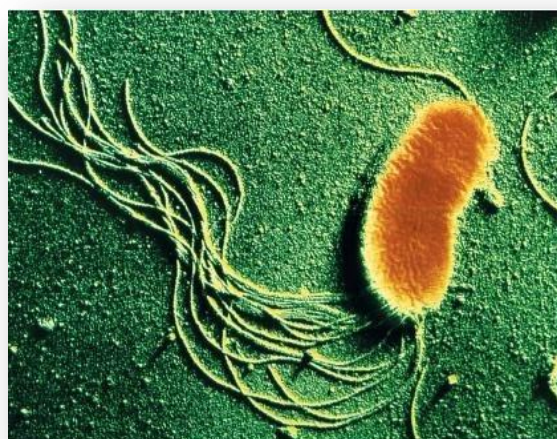
S'ha descobert que els grups més abundants són les α -Proteobacteria, les β -Proteobacteria, les δ -Proteobacteria, les Rhizobials i Clostridia (Biffinger et al., 2008; Lovley, 2008). Altres bacteris amb activitat electrogènica són *Rhodospirillum rubrum*, *Aeromonas hydrophila*, *Clostridium butyricum* i *Enterococcus gallinarum* (Esteve-Núñez, 2008).

Els dos gèneres que s'han estat estudiat en major profunditat són *Shewanella* i *Geobacter*, sent en particular el *G.sulfurreducens* el representant dels microorganismes electrogènics.

Geobacter sulfurreducens

És una Proteobactèria mesòfila gramnegativa que forma part de la biota del sòl i sediments anaerobis i acopla l'oxidació de diferents compostos orgànics a la reducció d'ions metàl·lics com Fe(III).

Una de les soques amb majors capacitats electrogènica és la soca KN400.



Com a inòcul per a les MFCs es poden utilitzar cultius d'una espècie microbiana o cultius mixtes.

En el primer cas, existeix la possibilitat de modificar genèticament l'espècie microbiana i així interpretar més fàcilment estudis respecte la genòmica (estudi del genoma de l'organisme) i proteòmica (estudi del conjunt sencer de les proteïnes expressades per l'organisme) dels microorganisme emprats com a cultiu.

En el segon cas de cultius mixtes, els bacteris més comuns pertanyen als gèneres: *Shewanella*, *Geobacter*, *Proteobacter* i *Pseudomonas*, i d'aquestes espècies destaquen *S.putrefaciens*, *P. aeruginosa*, *G.sulfurreducens* i *G.metallireducens*.

El procés pel qual els elèctrons derivats de l'oxidació de compostos orgànics són transferits a la superfície externa de la cèl·lula per reduir un acceptor terminal d'electrons es pot definir com **transferència extracel·lular d'electrons**.

El ***Geobacter metallireducens*** és un bacteri gramnegatiu que es pot fer servir per digerir els residus d'urani.

Geobacter metallireducens va ser descobert per Derek Lovely a UMass Amherst el 1993. Es tracta d'un bacteri reductor de ferro que li creix un flagel i es converteix en mòbil quan és necessari. Li permet adaptar-se i prosperar en diferents condicions ambientals.



Per a que es doni aquest intercanvi d'electrons, s'ha d'afavorir la colonització i l'assentament en els elèctrodes dels microorganismes a través de la formació d'una **biopel·lícula** o **biofilm**. Segons un estudi realitzat per Watanabe et al. 2008, la formació d'una biopel·lícula sobre l'elèctrode millora la producció d'energia. Però aquesta biopel·lícula complica d'una forma notable l'estudi i el funcionament d'una MFC.

23 DIFERENTS MECANISMES DE TRANSFERÈNCIA D'ELECTRONS DELS MICROORGANISMES.

Es proposen varis mecanismes de transferència d'electrons per part dels bacteris (Lovley 2008)

- Indirecte: mitjançant mediadors que poden ser aportats al medi (per exemple blau de metilè) o secretats per la pròpia bactèria (riboflavina).
- Directe: a través dels citocroms de la membrana cel·lular i/o amb pili o nanowires que són estructures que es troben sobre la superfície d'algunes bactèries i que pot facilitar la transferència d'electrons en distàncies molt llargues i servir d'interconnexió entre elles.

Així doncs podem distingir varis tipus de bactèries electrogèniques segons els seu mètode de transferència d'electrons:

- aquelles que produeixen els seus propis mediadors redox, que són secretats al medi i reaccionen amb l'elèctrode. El principal representant d'aquest grup són les bactèries reductores de Fe(III) del gènere *Shewanella* que secreta una riboflavina com a mediador redox.
- aquelles que interaccionen de forma directa amb l'elèctrode sense cap mediador soluble. Són capaces de transferir els seus electrons per contacte directe amb l'ànode sent el gènere *Geobacter* el model més estudiat. També ho veiem en *Shewanella*.
- I per últim aquelles que tenen apèndix conductius fora la membrana anomenats nanowires o pili, com per exemple, el gènere *Geobacter*. Aquestes transferències però no són exclusives i es poden donar simultàniament depenent de la bactèria. Així per exemple la *Shewanella oneidensis* pot fer transferència mediada o directa.

Exemple de tipus de bactèries segons el tipus de transferència d'electrons.

Bactèries que requereixen mediador	Bactèries de transferència directa
<i>Actinobacillus succinogenes</i>	<i>Aeromonas hydrophila</i>
<i>Shewanella oneidensis</i>	<i>Geobacter metallireducens</i>
<i>Proteus vulgaris</i>	<i>Shewanella putrefacens</i>
<i>Enterococcus gallinarum</i>	<i>Geobacter sulfurreducens</i>

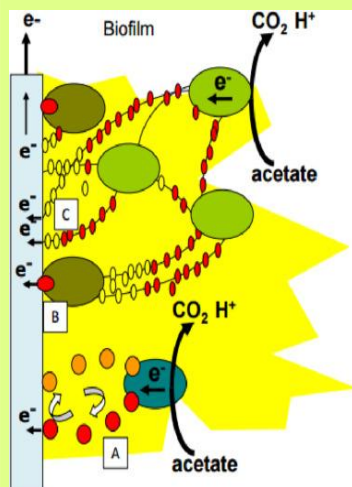
Estudiar les interaccions de les bactèries, identificar-les i establir les seves funcions en el procés de funcionament d'una MFC ens dona un coneixement bàsic i una millora en els sistemes.

MECANISMES INVOLUCRATS EN LA TRANSFERÈNCIA D'ELECTRONS:

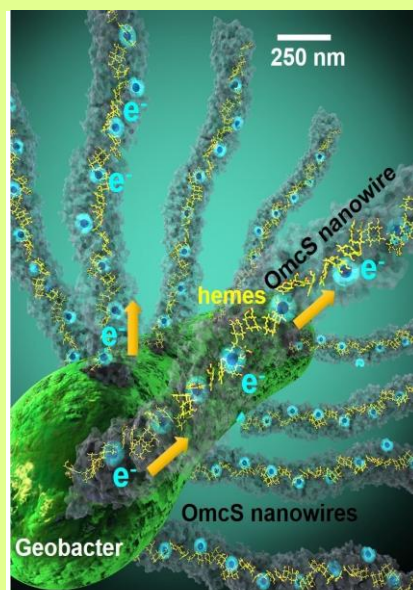
A Transf. Indirecta via mediadors externs o productes del metabolisme bacterià

B Trans. directa via proteïnes Citocrom C

C Transf. directa via *nanowires*. (pili)



Alguns bacteris del gènere *Geobacter* tenen *nanowires* que tenen alta conductivitat com el metall. Els *nanowires* mesuren només de 3 a 5 nanometres (10000 vegades més petit que un cabell humà!).



24 PÈRDUES EN UNA CEL·LA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA

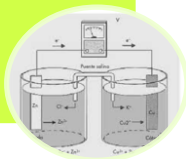
Varis mecanismes afecten la pèrdua de rendiment de les MFC.

- **Pèrdues per transmissió de massa.** Pèrdues que ocorren quan no hi ha prou matèria orgànica disponible o acceptors d'electrons finals. Es limita la reacció i la MFC no treballa a la seva capacitat màxima.
- **Pèrdues òhmiques.** Inclou la resistència al flux d'electrons a través dels elèctrodes i les interconnexions. Poden ser reduïdes minimitzant l'espai entre els elèctrodes o augmentant la conductivitat de la solució al màxim tolerat per la bactèria.
- **Pèrdues per activació.** Es produeixen durant la transferència d'electrons entre els compostos de reacció (bactèries i oxigen) i la superfície de l'elèctrode. Es poden reduir augmentant la superfície de l'elèctrode, augmentant la temperatura de funcionament o establint un biofilm enriquit a l'elèctrode (Logan, et al., 2006). Alguns dels compostos del substrat orgànic són consumits pels microorganisme per al seu creixement i no per a la generació d'electricitat.
- **Pèrdues pel metabolisme bacterià.** Per generar energia metabòlica, les bactèries transporten els electrons des del substrat, amb un baix potencial, fins l'acceptor final d'electrons, amb un potencial alt. En una MFC, el potencial de l'ànode determina l'energia guanyada per la bactèria. Com més gran sigui la diferència de potencial, més gran és el guany, però menor és el voltatge assolit per la MFC. Per tant, per maximitzar el voltatge de la MFC el potencial de l'ànode ha de ser el més baix possible (negatiu). No obstant, un potencial d'ànode massa baix inhibeix el transport d'electrons i afavoreix la fermentació del substrat (Logan, et al., 2006).

25 UNA MICA D'HISTÒRIA...

- El botànic anglès M.C. Potter M. C. Potter University of Durham,
- El 1910, el botànic anglès M.C. Potter va dur a terme el primer intent d'utilitzar microorganismes per a produir electricitat (Potter, 1910). Va recórrer a cultius de *E.coli* i electrons de platí per generar corrents elèctriques de petita magnitud sent la primera MFC documentada (Ieropoulos et al., 2005).

1910



- Barnet Cohen desenvolupa una MFC i les connecta en sèrie aconseguint uns 35 V. però només 2 miliampers.
- Posteriorment DelDuca et al. utilitzaren hidrogen provinent de la fermentació de la glucosa per *Clostridium butyricum* com a reactiu en l'ànode d'una cel·la d'hidrogen i aire, el problema va ser la inestable producció d'hidrogen per part del microorganisme.^[4] Aquest problema va ser resolt per Suzuki et al. el 1976^[5]

1931

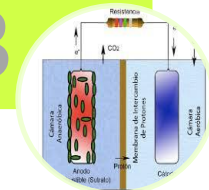


1950



- La NASA s'interessa per les MFCs pel seu programa espacial per la gestió de residus orgànics en llançaments espacials.

1973



- S. Suzuki construeix el primer prototip de MFC similar a les actuals.
- No fou fins la dècada dels 80 que aquest tipus de processos van despertar l'interès amb la utilització de mediadors redox solubles que augmentaven la producció de corrent i la potencia d'aquests sistemes.

- M.J. Allen i H. Peter Bennetto del King's College London van començar a concebre els sistemes com una opció complementària per la generació d'electricitat, especialment en països en desenvolupament (Bennetto, 1993).

1990



- Es demostra que és possible depurar aigua residual i extreure simultàneament electricitat de la matèria orgànica contaminant.
- En aquesta etapa, microorganismes amb la capacitat de transferir per si mateixos (sense mediadors) els electrons al elèctrode com acceptador final van ser identificats, es van explorar diferents aplicacions de les CCMs com biosensors

2000



- La primera MFC a escala pilot va ser instal·lada en 2007 a Brisbane, Austràlia (Chem. Eng., 2007) i petites empreses comencen a emergir fruit de l'avenç d'aquesta tecnologia (ex: Emefcy. Sistemes de bioenergia.)
- Les MFCs poden utilitzar-se com font d'electricitat per impulsar dispositius que requereixin baixa potència, com telèfons i ordinadors portàtils, o per sustentar dispositius de monitorització en sediments marins (Tender et al., 2008).

2007



- En els últims anys el nombre de publicacions en aquesta àrea d'investigació ha augmentat de forma exponencial i el fenomen de bioelectrogènesis (producció d'electricitat fent ús de tecnologies amb organisme viu) ha donat lloc a variants de les MFCs amb diferents aplicacions com l'eliminació d'altres contaminants en aigües residuals (ex: nitrats, sulfats), bioremediació de sòls o la síntesis de compostos orgànics.

2015



26 APLICACIONS DE LES CEL·LES DE COMBUSTIBLE MICROBIANES

L'electromicrobiologia té el potencial d'alleugerir les necessitats energètiques de la societat actual. Inicialment els esforços es van enfocar cap a l'optimització de les MFCs per a obtenir energia elèctrica, altres aplicacions prometedores de les interaccions microorganisme-elèctrode han sortit els últims anys. Aquesta interacció ofereix un gran nombre d'aplicacions potencials pràctiques en bioenergia, bioremediació, etc. Dins la tecnologia de les BES²², el model més estudiat és la MFC i de la que deriven les altres: cel·les d'electròlisi microbiana, cel·les de dessalinització microbiana, cel·les d'electrosíntesis, ..

A continuació detallem algunes de les aplicacions pràctiques més importants d'aquests fenomen:

26.1 PRODUCCIÓ D'ENERGIA ELÈCTRICA.

Aquesta tecnologia es pot aplicar en petits sistemes elèctrics que no precisen de grans requeriments energètics i les aplicacions de les quals no consumeixin grans quantitats d'energia com per exemple les boies meteorològiques que són



Imatge 18: Boia- sensor alimentat per una MFC. Font: Ptolomeu unam

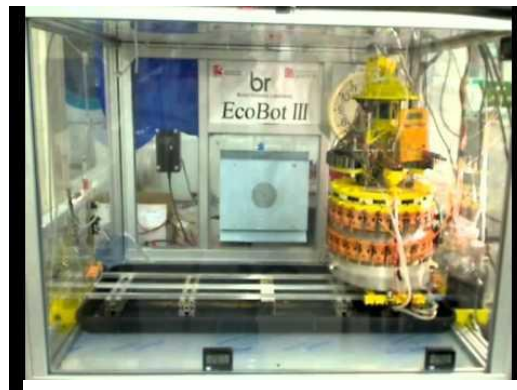
alimentades per MFC, és a dir, que generen energia a través de l'oxidació bacteriana de substrats orgànics en sediments marins anòxics o per alimentar diversos sensors ambientals (com sensors per mesurar la temperatura o el sensor subaquàtic SUIR per a la investigació de la pesca, activar un rellotge digital, alimentar sensors inhalàmbrics i inclús recarregar telèfons mòbils (Donovan et al.

2013; Papaharalabo et al., 2013; Santoro et al., 2017).

En països subdesenvolupats és important la possibilitat de generar electricitat a partir de matèria orgànica sobretot en llocs molt apartats on la instal·lació elèctrica és inexistent. Existeixen empreses innovadores que ja treballen desenvolupant les

²² Sistemes bioelectroquímics

MFCs en aquests països. Al ser una tecnologia versàtil, fàcil de dissenyar, autònoma i barata fa que sigui ideal per llocs amb baixos recursos on l'acumulació de residus orgànics i la seva eliminació suposa un problema.



Imatge 19: EcoBot. Font: Bristol Robotics Laboratory.

A més existeixen avanços prometedors en l'aplicació de les MFCs en el camp de la **robòtica**. Per exemple, s'han utilitzat en el robot *EcoBot* que utilitza per al seu funcionament una MFC alimentada amb glucosa sense necessitat d'utilitzar cap altre tipus de bateries. A la llarga es creu que es podrà usar en molts dispositius (González del Campo, 2015).

26.2 TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS

Els processos de depuració i manteniment de les aigües residuals requereixen una alt cost econòmic i energètic sobre tot associat al procés d'aireació i producció de fangs que poden suposar un 75% dels costos d'energia de la planta mentre que el tractament i l'eliminació de fangs pot arribar fins al 60% dels costos totals de l'operació (Gude, 2016). Les MFCs s'han mostrat com una opció real en el tractament de quasi tot tipus de residus, incloses les aigües residuals municipals, agrícoles i de refinaria, de destil·leries, de reciclatge de paper e inclús de llixiviats d'abocadors transformant les desfetes en electricitat i eliminant els olors (Kim et al., 2008).



Imatge 20: Investigadors del Departament d'Enginyeria Química han obtingut energia elèctrica i hidrogen depurant aigües residuals mitjançant les anomenades cel·les microbianes d'electròlisi, una evolució de les MFC.

UAB

En altres paraules, les MFCs poden recuperar l'energia continguda en aigües residuals transformant-les en energia elèctrica neta. La quantitat d'energia generada

per les MFCs en el procés de tractament d'aigües residuals poden reduir a la meitat l'electricitat necessària en un procés de tractament convencional (Oh et al., 2010).

Gràcies a les diferents formes a les que van evolucionant els sistemes bioelectroquímics, les estacions depuradores d'aigües residuals poden deixar de ser una font de recursos desaprofitats. Són “fàbriques” capaces de recuperar a partir de les aigües residuals, energia i nutrients com el fòsfor o el nitrogen a més de metalls pesats.

26.3 BIORREMEDIACIÓ

Cada cop més els científics s'estan enfocant més a aquesta via ja que permetrien tractar grans superfícies de terrenys afectats per contaminants. Amb l'estudi de biocàtodes que són capaços de fer servir com a acceptor d'electrons no només l'oxigen sinó altres compostos com contaminants, permet la **remoció de nutrients i contaminants** juntament amb la producció d'electricitat. D'aquesta manera han sigut tractats diferents ambients contaminats amb compostos orgànics com el fòsfor o el nitrogen i amb metalls pesats en forma soluble com l'urani, el cadmi o el crom, reduint-los a formes insolubles per a la seva eliminació, evitant la seva filtració a les capes freàtiques (Hong y Gu, 2009; Rabaey et al., 2010; Franks, 2014; González del Campo, 2015).

26.4 BIOSENSORS

Els anomenats **biosensors** s'han creat per la detecció i anàlisi dels contaminants que suposen un risc per a la salut de les persones i el medi ambient. Com que les bactèries són molt sensibles als canvis de l'ambient, es pot mesurar les variacions del corrent elèctric que tenen lloc com a conseqüència de l'afectació de l'activitat bacteriana a aquests canvis. (Bajracharya et al., 2016; Zhou et al., 2017).

26.5 PRODUCCIÓ DE BIOHIDROGEN

Modificant l'estructura d'una MFC es pot produir hidrogen aprofitant l'energia generada, transformant la MFC en **una cel·la d'electròlisis microbiana o MEC**. (Du et al., 2007; Azwar et al., 2014).

S'ha demostrat com, augmentant el potencial electroquímic utilitzant un voltatge addicional al que es genera després de l'oxidació microbiana de la matèria orgànica, es pot sintetitzar hidrogen a partir dels electrons i protons produïts (Borjas, 2016).

D'aquesta forma en les MECs, l'hidrogen pot ser produït amb un baix cost, ja que la major part de l'energia requerida procedeix de l'obtinguda per l'oxidació microbiana de la matèria orgànica en l'ànode. Encara que és necessari utilitzar un voltatge addicional és molt menor que el que es requereix en l'electròlisis de l'aigua, demostrant el gran potencial d'aquesta tecnologia.

26.6 ALTRES APLICACIONS

La utilització potencial de les MFC en biomedicina és un repte pel futur. Basant-se en la implantació de MFCs en miniatura a l'interior del cos humà es podria utilitzar com a marcapassos o en mesures de glucosa en sang (González del Campo, 2015).

En regions costeres on la disponibilitat d'aigua dolça és baixa es pot utilitzar una versió de les MFCs per dessalar aigua de mar, les denominades **Cel·les de Dessalació Microbianes** (Borjas, 2016).

En l'actualitat són nombrosos els projectes d'investigació realitzats en el camp de la bioelectroquímica per part d'empreses i institucions de tot el món. Per exemple en el marc de la producció d'electricitat i depuració d'aigües residuals trobem:



Bristol BioEnergy Centre

És un dels projectes que ens mostren que l'electricitat produïda gràcies a una MFC alimentada per orina pot il·luminar la pròpia instal·lació. Moltes vegades els vàters de llocs com ara camps de refugiats no disposen de llum artificial provocant una gran incomoditat sobretot per les dones.

L'equip d'investigació que lidera el projecte està dirigit pel professor **Ioannis Ieropoulos**, director del Centre de Bioenergia de la UWE Bristol. El 2013 el mateix equip va presentar una fase del projecte demostrant que una MFC alimentada amb orina pot alimentar un telèfon mòbil. Al mateix temps depura l'aigua i produeix fertilitzants naturals per a les plantes.

Aquest projecte intenta portar aquesta tecnologia al món real i fer que la utilització d'aigües residuals per fer energia sigui una realitat. A més, el fet de generar electricitat amb matèria orgànica pot donar a la robòtica més autonomia d'operació en ambients inaccessibles o perillosos pels humans.

Dels estudis fets per aquesta universitat, va sorgir *Robial*. Una empresa social creada per comercialitzar la tecnologia de les MFCs desenvolupada per la University of the West England (UWE Bristol) que converteix orina en electricitat.



Imatge 21: Projecte de MFCs en stack Font: Robial.

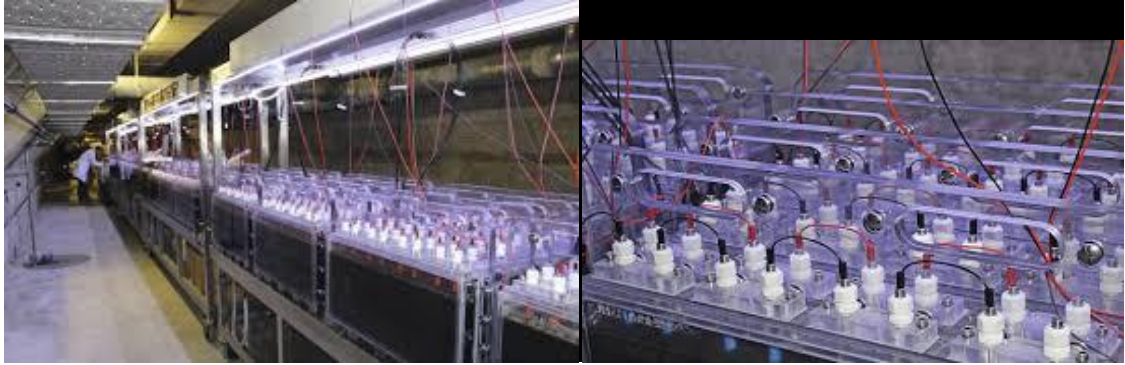
Fundada per **Bill & Melinda Gates Foundation**, aquesta tecnologia és capaç de canviar les vides de milions de persones que no tenen accés al sanejament en xarxa de les aigües residuals.

Robial ha portat al mercat diferents solucions, inclòs el **PEE POWER®**, un producte que pot transformar l'orina amb l'electricitat suficient per il·luminar una estància. Aquest prototip de vàter és el resultat de la cooperació de la universitat amb OXFAM, on s'aconseguí il·luminar els cubicles dels sanitaris dels camps de refugiats que sovint estan a la foscor i són llocs perillosos, especialment per a les dones.



Un altre grup d'investigació es troba a Sion (Suïssa) a l' Engineering School (HEI) of the University of Applied Sciences and Arts Western Switzerland. Allà han construït un reactor d'uns 1000 L i una sèrie de MFCs connectades d'uns 14 metres (64

unitats) sota uns túnels de la planta depuradora. Els resultats encara no els han publicat però segons el Dr.Fabian Fischer, director del projecte, estan aconseguint depurar l'aigua fins a valors legalment acceptables per poder transvasar-la al riu més proper (riu Rhone).



Imatge 22: Projecte de la Engineering School a Suïssa amb múltiples MFCs connectades. Font: Hes.so.

ANNEX 2: CONSTRUCCIÓ DE LES CEL·LES

28 CONSTRUCCIÓ DE LA CEL·LA DE DUES CAMBRES

28.1 OBJECTIU

Dissenyar i construir una cel·la de combustible microbiana de doble compartiment tipus H de “batch” o discontinua que utilitzarem en els diferents experiments.

28.2 MATERIAL

2 Recipients plàstic tipus Tatay© 35 x 20 x 19 cm	
Tub de PVC 20 cm i 5 cm Ø Amb 2 Rosques de desguàs	
Tela de carboni	
Cable elèctric de coure multifilament recobert de 2,5mm	
Resina epoxi	

Parafilm®	
Agar	
Sal	
Trepant i broca, alicates, regla, ulleres de seguretat, guants, tisores, paper d'alumini, cinta aïllant,	
Multímetre PeakTeck® 2025	
Bomba d'aire	

28.3 MÈTODE

28.3.1 L'ESTRUCTURA:

Agafar un dels recipients de plàstic i amb un rotulador permanent marcar el centre d'un dels seus costats més amples i amb un regla marcar el mateix lloc de l'altre recipient per a que coincideixin exactament en costats oposats. Utilitzant la broca de perforació, fer un forat de 20 cm de Ø en la marca dels 2 costats.



Imatge 23: Estructura de la MFC. Font: Pròpia

Muntar el tub dins els forats i collar-lo amb les rosques. Per comprovar que no hi hagi pèrdues d'aigua, omplir els recipients d'aigua de l'aixeta.

Amb el trepant fer un forat d'uns 2 mm de diàmetre en la tapa dels dos recipients. En una d'elles, a més, fer un altre forat igual per poder passar el tub de la bomba d'aire.

28.3.2 ELÈCTRODES:

Amb unes tisores, tallar la tela de carboni en 4 quadrats iguals de 5 x 5 cm.

Tallar 4 trossos de cable de coure i amb unes alicates treure la coberta plàstica uns 15 cm en un costat de cada un d'ells. Preparar la resina epoxi.

Cobrir els 15 cm del cable elèctric sense cobertura amb resina epoxi i enganxar-lo al voltant dels quadrats de tela de carboni.

Un cop sec, comprovar la connexió entre el quadrat de tela de carboni i el cable de coure amb un multímetre. Hauria d'haver molt poca resistència (1-3 ohms).



Imatge 24: Construcció de l'ànode Font: Pròpia

28.3.3 PONT SALÍ:

Cobrir un dels extrems del tub de PVC amb paper d'alumini. Posar-lo amb l'extrem descobert cap amunt.

Mesurar 300 mL d'aigua en un pot. Utilitzant una bàscula digital mesurar 30 g d'agar. A part, mesurar 6 g de NaCl.



Imatge 25: Elaboració del pont salí. Font: Pròpia

Escalfar l'aigua del pot i portar-la a ebullició. Quan bulli afegir l'agar i barrejar amb una vareta fins que l'agar es dissolgui.

Una vegada dissolt, treure del foc i afegir els 6 g de sal. Barrejar fins que la sal estigui ben dissolta.

Mentre la dissolució sigui encara calenta, abocar-ho amb compte dins del tub de PVC fins que el tub sigui ple. Deixar 10 minuts i posar dins la nevera durant tota la nit.

Al dia següent, estarà a punt per utilitzar per a la construcció de la cel·la dels diferents experiments.

28.3.4 RECOLLIDA DE L'INÒCUL



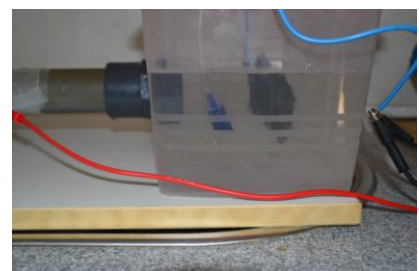
Imatge 26: Recollida de fang en un rec. Font: Pròpia

Recollir fang del rec utilitzant guants. Intentar agafar el fang més profund per a que presenti condicions més anaeròbiques.

28.3.5 MUNTATGE FINAL DE LA CEL·LA

Ajuntar els 2 containers amb el pont salí que hem tret de la nevera.

Com a catòlit s'utilitza aigua potable extreta directament de la aixeta sense necessitat de cap tractament previ.



Imatge 27: Construcció de la cambra catòdica. Font: Pròpia

Fer una dissolució salina amb 4 litres d'aigua i 120 de sal. Barrejar fins dissolució. Omplir amb ella la cambra catòdica.

Passar el cable d'un dels elèctrodes pel forat petit de la tapa i tancar la cambra catòdica. Assegurar que l'elèctrode es troba submergit sense tocar les parets.

Connectar el tub de sortida de la bomba d'aigua fent-lo passar pel seu forat. Assegurar que l'extrem del tub està submergit.

Amb guants i ulleres, omplir el recipient de l'ànode amb el fang. Volum final: 6650 cm^3 . Aixafar la mostra perquè no quedin bombolles.



Imatge 28: Construcció de la cambra anòdica. Font : Pròpia

Soterrar l'elèctrode de l'ànode sota el fang. Quan el tinguem ben cobert de fang, acabar d'omplir amb l'orina que haurem recollit prèviament.

Passar l'extrem lliure del cable elèctric pel forat de 2 mm de la tapa i tapar. Segellar la tapa amb Parafilm[®] per a aconseguir el màxim de condicions anaeròbiques possibles.



Imatge 29 Muntatge experimental. Font: Pròpia

29 CONSTRUCCIÓ DE LES CEL·LES D'UNA SOLA CAMBRA

29.1 OBJECTIU

Dissenyar i construir cel·les de combustible microbiana d'una sola cambra que utilitzarem en els diferents experiments.

29.2 MATERIAL

Llistat del material utilitzat per a la construcció de les cel·les:

11 Recipients de plàstic 3 L	
Feltre de carboni	
Cables connexió tipus cocodril	
Diferents materials pels ànodes	

Tub i connexions per la bomba d'aire	
Agar	
Bomba d'aire	

29.3 MÈTODE

Agafar els containers de plàstic i amb un rotulador permanent identificar-los marcant al costat.

Amb unes tisores, tallar el feltre de carboni fent 2 quadrats iguals de 5 x 5 cm per cada cel·la.

Preparar l'agar segons les instruccions de l'apartat anterior. Mentre la dissolució sigui encara calenta, abocar-ho amb compte sobre la tapa del recipient que farà de motlle. Deixar 10 minuts i posar dins la nevera durant tota la nit.



Imatge 30: Disc d'agar per a les cel·les. Font: Pròpia.

Com a substrat i inòcul agafar fang del rec i omplir cada un dels 11 recipients amb 1'5 l de fang aproximadament. Soterrar l'elèctrode de l'ànode connectat a un cable tipus cocodril fins que quedi ben cobert però que el cable surti. Aixafar la mostra perquè no quedin bombolles



Imatge 31: Recollida de fang en un rec. Font: Pròpia



Imatge 32: Construcció de les cel·les. Font: Pròpia.

Posar el disc d'agar sobre el fang i omplir la resta de recipient amb aigua de l'aixeta, sense necessitat de cap tractament previ.

Introduir dins l'aigua el feltre de carboni connectat amb un cable cocodril que serà l'elèctrode catòdic.

Connectar els dos cables que surten mitjançant una resistència de 1000 Ω per tancar el circuit.

Finalment connectar un tub de sortida de la bomba d'aigua per a cada cel·la. Assegurar que l'extrem del tub està submergit.

ANNEX 3: EXPERIMENTS COMPLEMENTARIS

30 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº 1: EFECTE DE L'AIREACIÓ DEL CÀTODE

Basant-nos en els antecedents estudiats en la part teòrica sabem que en el càtode ha d'haver molta presència d'oxigen per no resultar ser un factor limitant de la reacció, per tant el funcionament de la cel·la dependrà de la quantitat d'oxigen present en el càtode que anirà minvant a mesura que els protons vagin arribant de l'ànode per formar H_2O . Si no s'administra més O_2 airejant el càtode, el voltatge també anirà disminuint.

30.1 OBJECTIU

En aquest experiment comprovem l'efecte que té l'aireació del càtode en el funcionament de la cel·la.

30.2 MATERIAL

Aquest experiment es realitzarà amb el mateix material que l'experiment nº 1.

30.3 METODOLOGIA

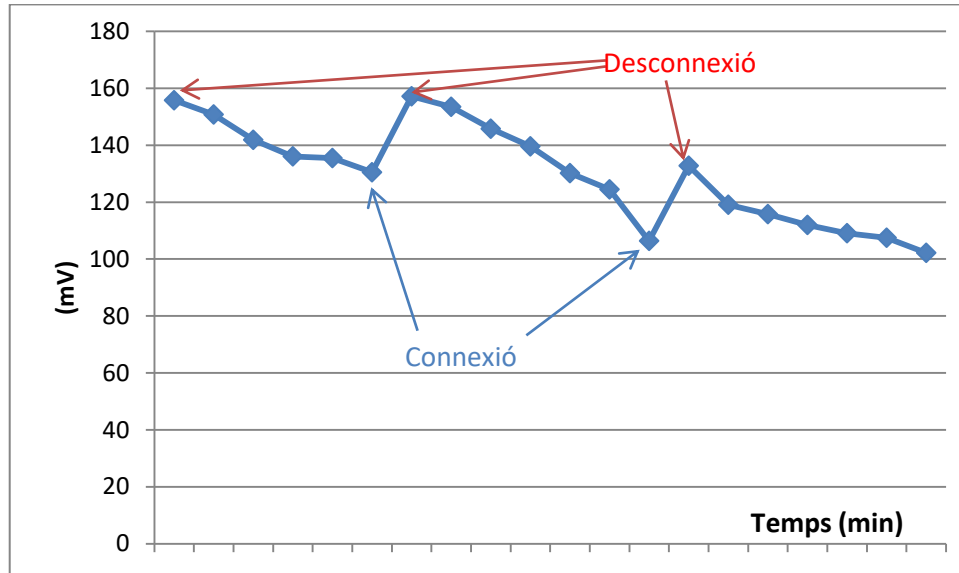
La nostra cel·la funciona amb una bomba d'aire que aireja constantment el càtode. Es realitzarà tres aturades seqüencials de la bomba d'aire per poder visualitzar l'efecte d'aquesta disminució d'oxigen en el voltatge.

L'experiment es farà quan la cel·la presenti un voltatge estacionari. Es faran mesures de voltatge cada 30 minuts. Partint dels resultats del voltatge inicial estable (amb la bomba d'oxigen funcionant), es desconnectarà la bomba i s'anirà determinant si hi ha un descens d'aquest voltatge. Al cap de 2 hores, es tornarà a connectar la bomba i quan el voltatge sigui estable de nou es farà el mateix procés dues vegades més.



Imatge 33: Bomba d'aire utilitzada en la cel·la. Font: Amazon

30.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Gràfic 8: Comportament del voltatge en relació al subministrament d'O₂ en el càtode

En les tres desconnexions es va reproduir la mateixa resposta. En el moment que aturem la inoculació d'aire, el voltatge decau i quan es torna a subministrar, el voltatge puja de nou.

En una MFC, els microorganismes de la cambra anòdica utilitzen l'oxigen dissolt en l'aigua de la cambra catòdica com a acceptor final dels seus electrons producte del seu procés de respiració cel·lular. Els bacteris transfereixen els electrons a la l'ànode creant una càrrega negativa. Per poder crear electricitat aquests electrons carregats negativament han de circular cap a un ambient de potencial positiu.

L'oxigen present en l'aigua crea un potencial elèctric molt positiu. Els electrons que passen pel circuit reaccionen amb l'oxigen. L'ús de la bomba fa circular l'aigua i l'oxigena, incrementant així la disponibilitat d'oxigen i la producció d'electricitat.

En la gràfica anterior es pot observar que l'ús de la bomba manté el voltatge sobre els 155 mV mentre que quan s'atura i es deixa d'airejar, el voltatge va baixant gradualment fins als 130 mV. En el moment que es torna a connectar la bomba, el voltatge puja gairebé d'immediat. Aquest fenomen es repeteix tres vegades. Els valors aconseguits després de l'aturada, però, són més baixos en cada experiment.

30.5 CONCLUSIONS

La presència d'oxigen facilita la reacció que té lloc en el càtode de la MFC. Una alta concentració d'O₂ ens pot donar una major activitat metabòlica per part dels bacteris, el que es tradueix en una major producció de voltatge.

Hem de tenir en compte però, que l'oxigenació constant amb una bomba d'aire pot representar un despesa d'energia més alta que la generada per la MFC. S'hauria de trobar altres formes d'oxigenar el càtode per tal que el balanç energètic no fos negatiu. Per exemple un sistema d'aigua corrent (riu, canonada,...) o un càtode amb algues ja que aquestes podrien anar oxigenant l'aigua amb el seu metabolisme de fotosíntesis.

31 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº 2: CONNEXIÓ EN SÈRIE DE VÀRIES CEL·LES

Aprofitant el muntatge de l'experiment nº 3, es van connectar les 11 cel·les en sèrie per comparar el voltatge resultant amb el de cada cel·la per separat. Efectivament, connectant-les entre si van donar un voltatge igual a la suma de totes per separat. Això era d'esperar ja que les MFCs funcionen com una pila, connectant vàries en sèrie s'aconsegueix sumar els diferents voltatges de cada una d'elles.

Es van connectar de la següent manera: l'ànode de la primera cel·la es connecta amb el càtode de la segona cel·la, l'ànode de la segona es connecta amb el càtode de la tercera i així successivament. Per tancar el circuit el càtode de la primera es connecta mitjançant un resistor de $10K \Omega$ a l'ànode de l'última.



Imatge 34: Imatges de les cel·les connectades en sèrie. Font: Pròpia

El voltatge màxim obtingut fou de 1,496 V (gairebé igual que una pila AA)²³.

Això em fa pensar que es podrien muntar sèries de cel·les per donar més electricitat²⁴.

²³ Si sumem el voltatge de totes les cel·les per separat en aquell moment ens donava 1602'8 mV.

²⁴ Encara que al connectar-les es produirà més pèrdua d'energia. La potència produïda per un sistema de vàries MFCs en sèrie és menor que la suma de totes les potències individuals.

32 EXPERIMENT COMPLEMENTARI Nº3: DETERMINAR L'EFFECTE DEL PH EN LES DUES CAMBRES

El pH d'una solució és un paràmetre que mesura la seva acidesa o la basicitat . El pH indica la quantitat de concentració de cations hidroni $[H_3O^+]$ presents en el medi.

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

El pH en dissolucions aquoses té una escala de valors entre 0 i 14 considerant els valors inferiors a 7 com a àcids i els superiors, alcalins.

En el marc teòric s'ha pogut veure que en una MFC es poden produir gradients de pH degut a l'acidificació en la cambra anòdica i l'alcalinització en la cambra catòdica. Això ve donat perquè les reaccions anòdiques produeixen protons i en les reaccions catòdiques es consumeixen.

32.1 OBJECTIU

Es vol investigar l'efecte que té el pH de les dues cambres de la cel·la final en la producció d'energia. Sabem que en la tecnologia de les MFCs el pH és un factor important a tenir en compte degut a que sempre ha d' estar al voltant d'un pH més o menys neutre, per tal que els microorganismes no es vegin afectats negativament per l'acidesa o la basicitat del medi.

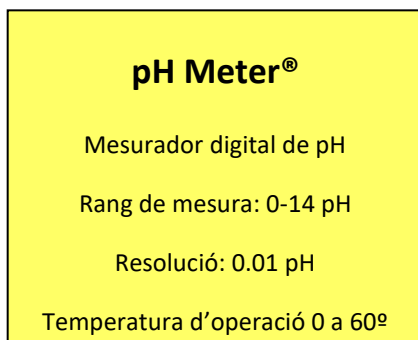
32.2 METODOLOGIA

Es va monitoritzar diàriament el pH de les dues cambres de la cel·la final durant tot el temps de l'operació amb la finalitat d'analitzar la influència del pH en la generació d'electricitat.

Es va col·locar una sonda en cada cambra poder agafar mostres sense necessitat d'obrir el compartiment anaeròbic. Les extraccions es varen fer a diari amb una xeringa (volum 3 ml), tant a la cambra anòdica com a la catòdica.

32.3 OBTENCIÓ DE DADES

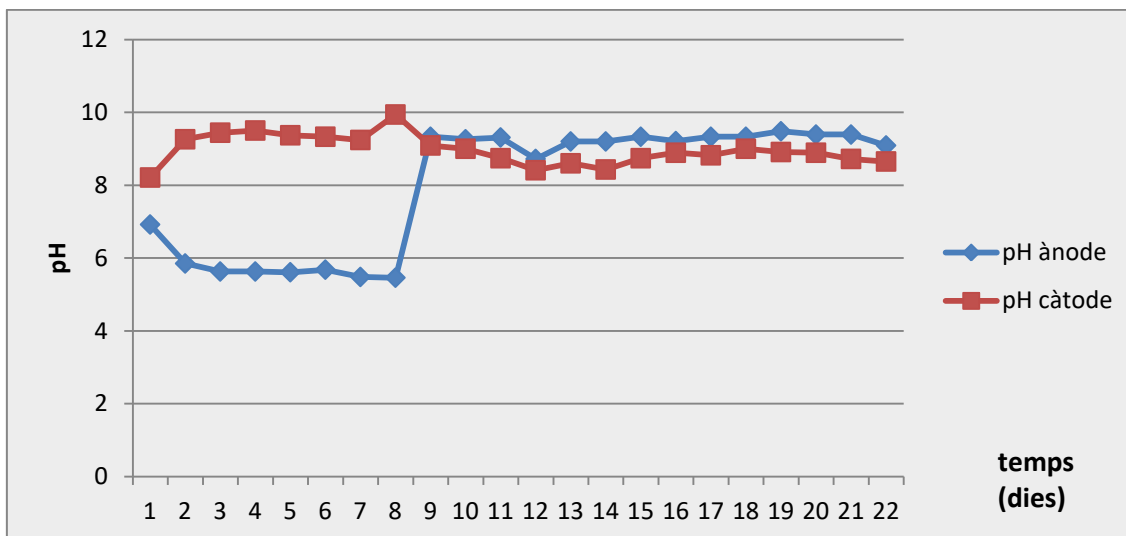
Les mesures de pH es van obtenir mitjançant un pHmetre digital.



Imatge 35: Mesures del pH. Font: Pròpia.

32.4 RESULTATS I DISCUSSIÓ

Gràfic 9: Valors de pH de l'ànode i el càtode al llarg de l'experiment



En el gràfic podem veure que els valors del pH inicials eren de 6,92 en l'ànode i 8,21 en el càtode.

A partir del novè dia, el pH de la cambra anòdica augmenta bruscament mentre que el de la cambra catòdica oscil·la entre el 8 i el 9 durant tot l'experiment.

El màxim voltatge obtingut en la cel·la es va donar el 4rt dia de funcionament quan els valors de pH de l'ànode i el càtode eren de 5,63 i 9,5 respectivament.

Segons la bibliografia, quan a la cambra anòdica la difusió i migració dels protons a través de la PEM és lenta, es produeix un pH àcid ocasionant un descens dràstic de l'activitat bacteriana (Revelo et al. 2013)²⁵ que limita el rendiment de la pila ja que els microorganismes requereixen un pH relativament neutre per a créixer. Els valors per sota de 6,8 inhibeixen l'activitat bacteriana. Segons l'estudi de S.Puig et al. (2010,) un pH de 9.5 es considera òptim pel funcionament d'una MFC. Això està en desacord amb altres autors que asseguren que el pH òptim està entre 6 i 8.²⁶

En el càtode, el pH pot elevar-se ràpidament, ja que el consum continuat de protons produeix una alcalinització. La disponibilitat de protons en el càtode és un factor clau que determina l'eficiència de la reacció de reducció de l'oxigen així que un augment de pH en la cambra catòdica pot disminuir significativament la generació de corrent. (Falcon, 2009).

En la nostra cel·la, en canvi, inicialment es va produir una lleugera acidificació de l'ànode però als pocs dies va produir-se un canvi sobtat i el pH va augmentar fins arribar a valors d'entre 8 i 9. Això es podria explicar perquè l'orina humana quan surt del cos té un pH lleugerament àcid (entre 5,5 i 7) però després d'un curt període, depenent de la temperatura, el pH canvia cap a valors alcalins d'entre 8,5 i 9,5. Aquesta transformació ve donada per la presència d'enzims ureasa que trenca la urea produint CO₂ i ions amoni (Santoro C. et al., 2020).

Es podia pensar que aquest canvi brusc en el pH influiria negativament en l'activitat bacteriana i s'observaria un descens del voltatge, però la nostra cel·la es va estabilitzar i no es va veure gaire afectada.

Un altra factor que pot haver provocat que el pH s'alcalinitzi és el canvi a una resistència més alta (de 100 a 1000 Ω) que pot afectar al pas d'electrons limitant la reacció d'oxidació i per tant que el pH no baixi sinó que pugi.

²⁵ Una solució tampó podria equilibrar aquestes variacions del pH per a que no disminueixi l'activitat bacteriana.

²⁶ Degut a la variabilitat de resultats dels estudis publicats, la comparació dels nostres resultats amb la d'altres investigacions es veu limitada.

33 CONCLUSIONS

El pH de les dues cambres s'ha mantingut força constant i dins d'uns valors bastant neutres.

Sabem que l'eficiència d'una MFC es pot veure afectada pel pH. En el nostre cas, sembla que el rendiment de la nostra cel·la no s'ha vist afectat tot i l'augment de pH en l'ànode al 9è dia, augment que podria haver provocat canvis en l'activitat bacteriana.

L'orina representa un bon substrat per les MFCs ja que no acidifica la cambra anòdica.

ANNEX 4: VOLTAMETRIES DELS ELÈCTRODES A LEQUIA

34 VISITES AL LABORATORI D'ENGINYERIA QUÍMICA I AMBIENTAL DE LA UNIVERSITAT DE GIRONA



El laboratori d' Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA) de la Universitat de Girona és un grup de recerca dedicat al desenvolupament de solucions mediambientals. Una de les seves línies de recerca és l'estudi de sistemes bioelectroquímics (BES) en aplicacions industrials com ara la bioremediació d'aigües contaminades.



Després de la primera visita que vaig fer a Lequia al febrer, el mes d'agost el **Dr. Narcís Pous** es va oferir a ajudar-me en el meu treball realitzant **voltametries cícliques**²⁷ en alguns elèctrodes dels meus experiments.

34.1 JUSTIFICACIÓ I BASE TEÒRICA

Com a elèctrodes dels ànodes de les MFCs i dels BES, en general, els diferents autors consideren millors els materials a base de carboni per la seva biocompatibilitat i la seva estabilitat química i microbiològica i també perquè el seu cost econòmic no és molt alt. Però presenten un gran desavantatge: la conductivitat elèctrica és de l'ordre de 2 ó 3 magnituds més baixa que la majoria de metalls i la seva resistivitat és de l'ordre de 3 magnituds més alta que la dels metalls. Tot això representa un descens del voltatge i per tant un descens en la potència. En canvi, l'ús d'elèctrodes metàl·lics presenten una alta conductivitat elèctrica. La seva principal limitació, però, està relacionada amb la formació d'òxids que poden ser nocius pels microorganismes i redueixen la vida útil de la cel·la.

²⁷ Mesura electroquímica que valora la capacitat d'un material de transferir electrons.

Per trobar solucions, darrerament s'està estudiant més a fons les interaccions entre els biofilms microbians i els elèctrodes ja que s'ha vist que els mecanismes dels processos de transferència d'electrons entre ells són de vital importància en els BES.

Així, per tal d'entendre el comportament electroquímic dels diferents materials amb la presència dels microorganismes es du a terme una tècnica anomenada **voltametria cíclica** que mesura la capacitat de transferir electrons dels materials (Fricke K. et al., 2008). Si ho fem abans de la seva interacció amb el biofilm (material abiòtic) i després d'estar-hi en contacte (material biòtic) podem veure si s'han donat canvis en els seu comportament electroquímic. Aquest seria un mètode per valorar si l'elèctrode ha variat les seves característiques degut a l'activitat microbiana del biofilm.

34.2 MÈTODE

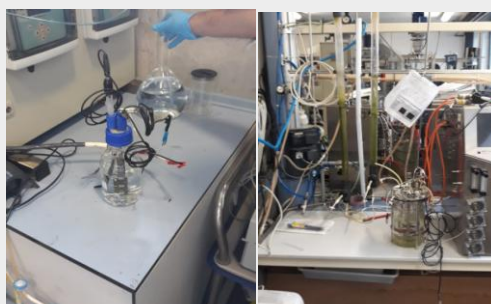
Vàrem portar a terme voltametries cícliques en 5 materials que havia utilitzat con a elèctrodes en el meu experiment nº 4 (el zinc, el coure, l'alumini, la barra de grafit i la tela de carboni) abans i després d'estar en contacte amb els microorganismes per veure com els havien afectat les possibles reaccions electroquímiques que s'havien donat amb el biofilm.

Voltametria cíclica

La voltametria cíclica és un tipus de mesura electroquímica. És utilitzada generalment per a estudiar les propietats electroquímiques d'un analit en una solució o d'una molècula absorbida sobre l'elèctrode.

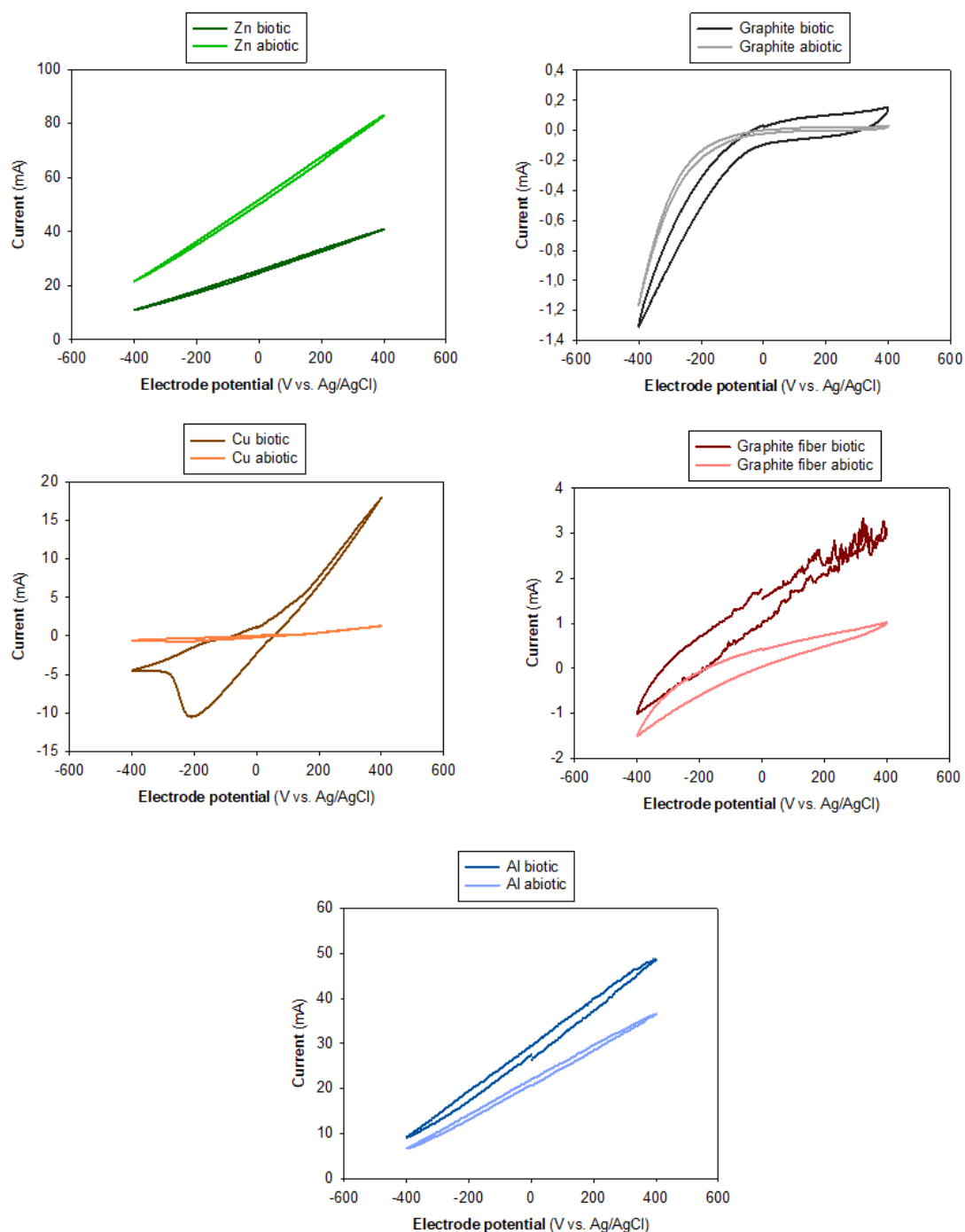
Es realitza aplicant un determinat potencial elèctric a un elèctrode submergit en una dissolució que conté una espècie electroactiva i mesurant la intensitat de corrent que circula per aquest elèctrode.

El potencial de l'elèctrode de treball és augmentat en funció del temps Un cop s'arriba al potencial desitjat per a l'experiment, el potencial de l'elèctrode de treball és disminuït en direcció contrària per a retornar al potencial inicial. Aquest cicle se sol repetir tantes vegades com siguin necessàries. Els valors de corrent de l'elèctrode de treball són representats gràficament en funció del potencial aplicat a aquest elèctrode.

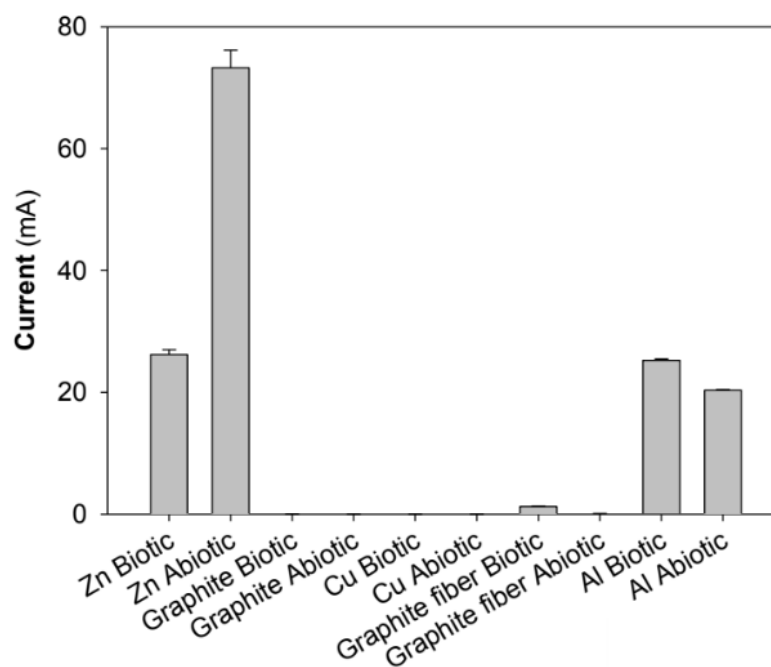


34.3 RESULTATS

Els resultats que vàrem obtenir en les diferents voltametries són els següents:



Gràfic 10: Comparació del corrent obtingut amb els diferents elèctrodes



Les diferències que veiem entre un mateix material abiòtic i biòtic es poden deure a canvis que ha sofert la superfície degut a l'activitat del biofilm (com per exemple presència de proteïnes, citocroms o altres molècules).

Tal i com es veu en el gràfic, els elèctrodes més actius, és a dir, que poden donar més reaccions electroquímiques, han estat el de zinc i el d'alumini. Ells sols, sense microorganismes (abiòtics) són capaços de reaccionar. Però aquesta activitat baixa amb el Zn i l'Al biòtics. Una possibilitat és que sigui degut a l'oxidació: $\text{Zn}^{(0)}$ a $\text{Zn}^{(+2)}$ i $\text{Al}^{(0)}$ a Al_2O_3 . Per tant, encara que aquests materials poden donar una bona resposta a l'inici del funcionament de la MFC, veiem que al llarg dels dies es van degradant i potser no representin la millor opció com a ànodes de les MFCs.

Sabem pels anàlisis de conductivitat elèctrica que vam fer (amb la font elèctrica i mesurant amb multímetre) que el Cu és un dels materials més conductors. Tot i que en comparació amb els altres dos metalls observem que el Cu ens ha donat poca activitat, la voltametria mostra més activitat en l'elèctrode biòtic que en l'elèctrode abiòtic. Això vol dir que els bacteris el van modificar fortament i podria ser que allà hagués crescut un bon biofilm que li aportés millors característiques bioelectroquímiques.

El coure és un metall que segons els resultats obtinguts en el meu treball i també segons alguns estudis de la bibliografia, no resulta un bon material per elèctrodes de les MFCs degut a l'activitat antimicrobiana dels ions metàl·lics alliberats en l'oxidació, però basant-nos en els resultats de la nostra voltametria cíclica on es veu que l'activitat bacteriana al llarg dels dies li proporciona millors característiques electroquímiques, l'hauríem de reconsiderar com una opció en estudis més llargs.

De fet, un estudi de Baudter A. et al. (2015) conclou que el coure pot ser idoni com a material per l'ànode de les MFCs. Demostra que el voltatge capaç d'oxidar-lo queda fora de l'interval de potencial de l'ànode de les BES (entre 0.3 i 0.8V) i que en aquest interval es comporta com a metall noble sent extremadament bon conductor (quasi 900 vegades més que el grafit). A més, en el seu estudi no es va observar toxicitat cap a les bactèries.

Finalment en la voltametria del grafit, s'observa una major amplitud en la corba biòtica que en l'abiòtica cosa que es sol relacionar amb la presència d'un biofilm mentre que la tela de carboni va mostrar una activitat erràtica que pot indicar una baixa activitat elèctrica.

34.4 CONCLUSIONS

- El zinc és el material que més activitat electroquímica dona (això concorda amb els resultats del meu experiment) però que a la llarga la pot anar perdent degut a l'activitat del biofilm (la meva cel·la anava perdent lentament potència i podria ser degut a això).
- El grafit no presenta una activitat extremadament alta però millora amb l'acció del biofilm. Això concorda amb el meu experiment ja que el voltatge aconseguit no era molt alt però es mantenia al llarg del temps.
- S'hauria d'insistir amb el coure com a elèctrode en experiments més llargs ja que la voltametria indica que l'acció bacteriana li produeix canvis que podrien ser positius en el temps.

ANNEX 5: MESURES DE LA DEMANDA QUIMICA D'OXIGEN A FISERSA

35 VISITA A L'ESTACIÓ DEPURADORA D'AIGÜES RESIDUALS DE FIGUERES

Un dels grans potencials de les MFCs és la seva capacitat de depuració de matèria orgànica en les aigües residuals. Per aquesta raó vaig voler veure si la meua cel·la era capaç de depurar un cert grau d'orina. Vaig contactar amb FISERSA (EDAR²⁸ de Figueres) amb l'objectiu de conèixer de prop els processos convencionals de depuració d'aigües residuals i els seus mètodes d'anàlisi.

Raül Lattre, cap de serveis de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals de Figueres, em va oferir l'oportunitat de fer-li una entrevista ja que les visites no eren possibles en aquell moment degut a la COVID-19. A més, em va facilitar les anàlisis de DQO²⁹ d'unes mostres pel meu treball.



Imatge 36: EDAR de FISERSA. Font: Empordà

35.1 ENTREVISTA ONLINE A RAÜL LATTRE (FISERSA)

Aquí reflecteixo la informació que en vaig extreure de l'entrevista:

- Quin és el procés que es fa servir a FISERSA per depurar les aigües residuals?
Fem servir l'eliminació biològica de nitrogen i matèria orgànica i la precipitació química de fòsfor. La configuració del reactor biològic és un Bardenpho de 4 etapes.
- Quants litres al dia d'aigües residuals es pot tractar a la depuradora de Figueres com a màxim?
Podem tractar fins a 22.000 m³ (22.000.000 litres).

²⁸ Estació Depuradora d'Aigües Residuals

²⁹ Demanda Química d'Oxigen

- Quina és la quantitat d'energia necessària per a purificar un litre d'aigua residual?

El consum mig és de $0,4 \text{ kWh/m}^3$, per tant $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$.

- Què es fa amb els materials inorgànics i orgànics sobrants?

Els residus de pretractament (inorgànics) es porten a l'abocador comarcal un cop assecats. Els fangs biològics (orgànics) s'assequen i es fan servir com a adob orgànic en aplicació agrícola.

- S'està estudiant molt el tema de la bioelectrogènesi (entre elles les cel·les de combustible microbianes) com a mètode de purificació d'aigües residuals. Coneixeu algun projecte de futur que impliqui l'ús d'aquesta tecnologia en les EDARs?

He llegit algun article sobre el tema a revistes sobre tractaments d'aigua, tot i que fa molts anys que s'estudia aquest tema, encara no conec cap aplicació a gran escala que l'hagi implantat.

- Quins paràmetres determineu per a fer els controls analítics de les aigües depurades?

Determinem la DQO, DBO5, MES, pH, Conductivitat, Terbolesa, TOC, NKT, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Pt, ST i SV, Matèries inhibidores, Clorurs.

- Quan es realitzen els controls de qualitat? Es fan només en l'aigua depurada o també en l'aigua abans de depurar o en algun altre moment?

Els controls es fan sobre tots els punts de control crític de la Depuradora, des de l'entrada fins a la sortida i de tots els punts d'eliminació de fangs i el posterior tractament d'aquests.

- Quantes mostres al dia soleu analitzar?

Al voltant de 25 mostres, segons el dia i els processos que estiguin en funcionament.

- Quina diferència hi ha entre la DQO i la DBO? Quina és millor per determinar la qualitat de l'aigua? Perquè?

Són paràmetres complementaris, donen informació diferent.

- DQO: oxigen necessari per oxidar químicament la matèria orgànica.
 - DBO₅: oxigen consumit pels diferents microorganismes en degradar la matèria orgànica.
- Una de les coses a tenir en compte és la relació entre els dos termes, % de DBO₅/DQO.

- Referent a la DQO, quin mètode feu servir per analitzar-la?

El mètode de Reflux tancat.

- A partir de quina quantitat de DQO es considera que l'aigua és pura?

Pura? El concepte pur per l'aigua seria per una aigua sense res més que H₂O, que només s'aconsegueix químicament. El valor paramètric de la DQO per a que l'aigua sigui correctament depurada i es pugui retornar al medi és de 125 mg/l i amb qualsevol tipus de depuració de l'aigua realment no és pot arribar a una DQO per sota de 20-30 mg/l.

36 DETERMINACIÓ I VALORACIÓ DE LA DEMANDA QUÍMICA D'OXÍGEN EN LA CEL·LA FINAL

36.1 JUSTIFICACIÓ I OBJECTIU

La matèria orgànica és un dels contaminants més freqüents en les aigües residuals. Aquesta sol ser reduïda utilitzant mètodes que consumeixen gran quantitat d'energia amb els costos mediambientals i econòmics que això implica. Per aquest motiu la investigació de tecnologies alternatives pel tractament d'aigües residuals està adquirint un gran interès.

Les aigües residuals urbanes son una barreja complexa que conté aigua barrejada amb contaminants orgànics que es valoren en conjunt per la seva demanda química d'oxigen (DQO), la demanda biològica d'oxigen (DBO) i contaminants inorgànics.

En la meua cel·la final, si les bactèries de la MFC converteixen l'energia química de la matèria orgànica a electricitat llavors quedarà menys matèria orgànica a mesura que els microorganismes facin el seu metabolisme i anirà desapareixent poc a poc de la cambra anòdica i per tant anirà depurant l'orina.

Intentaré avaluar el rendiment de la MFC mesurant la DQO del substrat inicial i final (després dels 30 dies de la durada de l'experiment) per veure si hi ha canvis.

Demanda química d'oxigen (DQO)

És un paràmetre que mesura la quantitat de substàncies dissoltes o en suspensió d'una mostra líquida que són susceptibles de ser oxidades per medis químics. Es fa servir per mesurar el grau de contaminació i s'expressa en mil·ligrams d'oxigen diatòmic per litre (mgO_2/l). Encara que aquest mètode pretén mesurar principalment la concentració de matèria orgànica, pateix interferències per la presència de substàncies inorgàniques susceptibles de ser oxidades (sulfurs, sulfits, iodurs...), que també es reflecteixen en la mesura.

36.2 MATERIAL I MÈTODE

Les mostres són analitzades al servei de laboratori de l'estació depuradora d'aigües residuals FISERSA. Mesuren la DQO mitjançant el mètode de reflux tancat. Aquest mètode consisteix a oxidar els components orgànics continguts en l'aigua amb un excés de dicromat potàssic, en medi àcid, i en presència de sulfat de plata i sulfat de mercuri

matèria orgànica + $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ + 148 °C, 2 h/ $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{AgSO}_4, \text{HgSO}_4 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Cr}^{3+}$

L'oxidació es fa a reflux tancat en tubs de vidre amb tap de rosca i junta de tefló. D'aquesta manera els compostos orgànics volàtils són completament oxidats. Els tubs de vidre contenen els reactius necessaris per a la determinació de la DQO a l'escala de treball 100-1.500 ppm d'O₂. Després de dues hores de digestió a 148 °C, els tubs es deixen refredar i la DQO es determina per colorimetria mesurant a 600 nm l'absorbància originada pel crom(III) format en la reacció. L'absorbància a 600 nm és directament proporcional a la DQO de la mostra.

36.3 RESULTATS I INTERPRETACIÓ

	Mostra inicial (26/06/20)	Mostra final (23/07/20)
DQO (mg O ₂ /litre)	5700	720

La diferència entre la DQO inicial i final ha estat de 4980 mg O₂/litre. Per tant el percentatge de reducció de la matèria orgànica ha sigut del 87,37%. Aquest ha estat molt més alt del que esperàvem. Una explicació podria ser que, a més del rendiment de la depuració de la cel·la, una part de la matèria orgànica present en l'orina hagi sedimentat al llarg del mes que durava l'experiment i la mostra final no fos prou representativa (era del sobrenedant). Cal recordar que la sedimentació és un mètode complementari per a la depuració de les aigües.

36.4 CONCLUSIÓ

El percentatge d'eliminació de la DQO fou aproximadament del 87%. Demostra la capacitat de depuració d'aquest sistema i el correcte funcionament de la meua cel·la.

ANNEX 6: PARLA L'EXPERT ABRAHAM ESTEVE NÚÑEZ

37 ANNEX 6: PARLA L'EXPERT DR.ABRAHAM ESTEVE NÚÑEZ

Abraham Esteve és doctor en Bioquímica per la Universitat de Granada. Actualment és professor titular de la Universitat d'Alcalà i investigador associat a IMDEA Agua. És un dels majors experts a nivell mundial en electroquímica microbiana.

Les seves investigacions estan centrades en biotecnologia ambiental, específicament en l'estudi dels mecanismes de la relació entre bactèries i materials conductors de l'electricitat.

Vaig contactar amb el Dr. Abraham Esteve per saber més sobre les aplicacions de la tecnologia MET (Tecnologies Electroquímiques Microbianes en anglès) i em va explicar *online* els seus avantatges i aplicacions pel sector del tractament d'aigües. També em va donar informació sobre els seus projectes. Aquí exposo les idees que he extret d'aquesta informació:

Les MET constitueixen un tipus de tecnologies basades en l'intercanvi d'electrons entre microorganismes i materials conductors de l'electricitat amb la finalitat d'estimular reaccions d'oxidació.

Els principis bàsics de la depuració de les aigües amb les MET segueixen essent els mateixos que els convencionals: utilitzar microorganismes per oxidar i reduir els contaminants presents en l'aigua. Però s'utilitzen microorganismes capaços de mantenir comunicació redox directa amb els materials conductors de l'electricitat. Aquest tipus de metabolisme es va veure per primera vegada en una investigació amb la bactèria anomenada *Geobacter* a la Universitat de Massachusetts i els resultats d'aquesta investigació es van publicar a la revista *Science* l'any 2001.

A partir de la base que els electrons són transferits al material conductor, l'electroquímica permet sintetitzar compostos com hidrogen, metà, biocombustibles, o oferir-los a altres bactèries i formar sinèrgies entre comunitats. També ens permet generar corrent elèctrica que ens pot informar en temps real de l'activitat biològica del nostre tractament d'aigua, fer servir l'energia associada al procés per a dessalar aigua, etc. Aquest tipus de tecnologia té una sèrie d'avantatges respecte a les tradicionals: un mínim consum energètic, menor producció de fangs, possibilitat d'eliminació de contaminants, etc.

37.1 COM S'ACONSEGUEIX TOT AIXÒ?

En aquesta nova tecnologia l'electró, seguint les lleis de l'electroquímica, busca l'oxigen atmosfèric present de forma natural en la superfície, en contrast amb les tècniques tradicionals on subministrem oxigen als microorganismes.

Fomentar la mobilitat de l'electró pel reactor és relativament senzill. Ell sol busca un ambient amb potencial redox més positiu, com les capes superficials en contacte amb l'atmosfera o inclús ambients que generem nosaltres a través de la configuració del biofiltre. Pel contrari, esforçar-nos a portar l'oxigen a la cèl·lula com passa amb els fangs actius genera el problema de l'alt consum energètic. En definitiva, es tracta de facilitar que l'electró busqui el seu acceptor i no al revés.

Actualment la inversió d'aquests tipus de tecnologies i els seu desenvolupament creix tant a Europa com als E.E.U.U. i Àsia creant grups multidisciplinaris que busquen nous dissenys per a fer possible el salt d'escala del procés.

Fa falta una solució tecnològica per escalar amb èxit el procés de produir electricitat amb les aigües residuals. En les aplicacions de les MET ens centrem més en el camp de la biorremediació, els biosensors i l'electrosíntesis. Aquesta última amb l'objectiu de subministrar energia en forma de corrent elèctrica per a que els microorganismes transformin el CO₂ en compostos orgànics.



Imatge 37: Planta depuradora que ja es comercialitza. Font: Metland

És un orgull dir que el nostre país compta amb més d'una dotzena de grups d'investigació actius en la cerca d'aplicar les MET al món de l'aigua residual: el grup Iber MET que intercanvia experiències i investigacions.

Els primers clients d'aquesta tecnologia estan arribant del sector privat, urbà i industrial. Esperem generar la confiança necessària per implantar aquestes tecnologies innovadores i superar les limitacions que es puguin presentar.

37.2 PROJECTES DESENVOLUPATS EN EL GRUP DE BIOELECTROGÈNESIS:

Des del grup IMDEA Agua es va muntar a Espanya la primera planta depuradora a nivell mundial amb tecnologia MET.

A més de la tecnologia METland que és un projecte que ja es comercialitza i s'instal·la a diferents llocs del món, el grup IMDEA Agua col·labora en altres projectes com:

- El projecte LIFE, on s'obté hidrogen mitjançant la tecnologia BES (life-answer.eu/es/)



- Un altre projecte europeu (<http://midesh2020.eu>), per implementar un pilot de cel·la de dessalació microbiana, una configuració capaç de depurar i dessalar amb el corrent elèctric obtingut per les bactèries en el procés depuratiu.



- També participa en un projecte entre Europa i la Xina a través del programa H2020 (www.electra.site) amb l'objectiu de portar aquesta tecnologia al gegant asiàtic. La Universitat de Girona participa en aquest projecte, una iniciativa ambiciosa per desplegar el potencial de l'electro-microbiologia a la descontaminació d'aigües, sòls i sediments.



- I el projecte **ATTRACT** (H2020) en el que explorem la impressió 3D de cèl·lules vives, per a dissenyar a-la-carte biofilms electroconductors amb potencial en el desenvolupament de biosensors de contaminants.

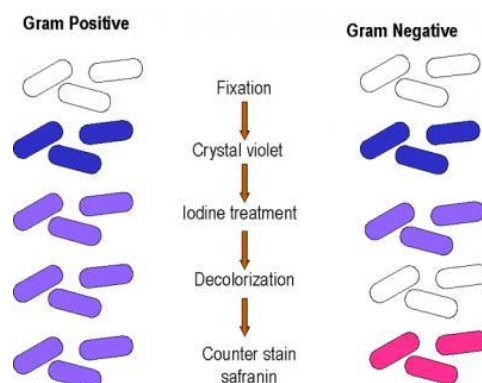
ANNEX 7: TINCIÓ DE GRAM

38 ANNEX 7: TINCIÓ DE GRAM

La tinció de Gram s'utilitza en microbiologia des de finals de segle XIX. És una tècnica molt senzilla que es basa en l'ús d'un colorant (tinció).

És un tipus de tinció que es realitza sobre els bacteris per observar-los millor sota el microscopi. Segons la distribució del **peptidoglicans** de la paret cel·lular que els envolta, es tenyeixen d'una manera o una altra. Així, els bacteris que no es tenyeixen mitjançant aquesta tècnica es denominen Gram negatius. Estan formats per una paret més fina formada per menys capes de **peptidoglicà** i una segona membrana rica en lípids (que repel·leix la tinció Gram). Al microscopi apareixen de color rosa. Els que anomenem Gram positius tenen una paret cel·lular molt més gruixuda, formada per un gran nombre de capes de **peptidoglicà** entre les que s'insereix la tinció Gram, donant un color violeta intens al microscopi.

En el cas dels bacteris gram positius els complexos insolubles es queden atrapats entre les capes de **peptidoglicans** de la paret bacteriana, sense dissoldre i donant la coloració morada característica a l'observar-los al microscopi. En canvi, en els bacteris gram negatiu aquests compostos sí que es dissolen i perden el seu color. Al microscopi es veuen de color rosa, degut a la safranina que hem aplicat al final de la tècnica de tinció de Gram.



Imatge 38: Procés tinció de gram. Font: xtec.cat

38.1 MATERIAL

- Guants
- Tincions de Gram: Cristall Violeta, Lugol, Alcohol d'acetona, Safranina
- Escovillons estèrils
- Portaobjectes
- Aigua destil·lada
- Metanol per fixar les mostres
- Microscopi
- Oli d'immersió

38.2 MÈTODE

1. Recollir la mostra de bactèries a estudiar mitjançant un escovilló (bastonet de cotó estèril)
2. Estendre la mostra sobre un portaobjectes i deixar assecar.
3. Fixar la mostra mitjançant alcohol (metanol). Deixar assecar.
4. Aplicar la violeta genciana sobre el porta objectes i esperar 1 minut.
5. Esbandir la mostra amb aigua i aplicar un fixador de Violeta Genciana (lugol).
El lugol i el violeta formen un complex insoluble en aigua capaç de penetrar les parets de les cèl·lules bacterianes.
6. Netejar de nou el portaobjectes amb alcohol durant uns segons.
7. Fer una segona tinció amb safranina i després netejar amb aigua.
8. Ja es poden observar la mostra al microscopi on es visualitzarà de color violeta les gram positives i de color rosat les gram negatives.

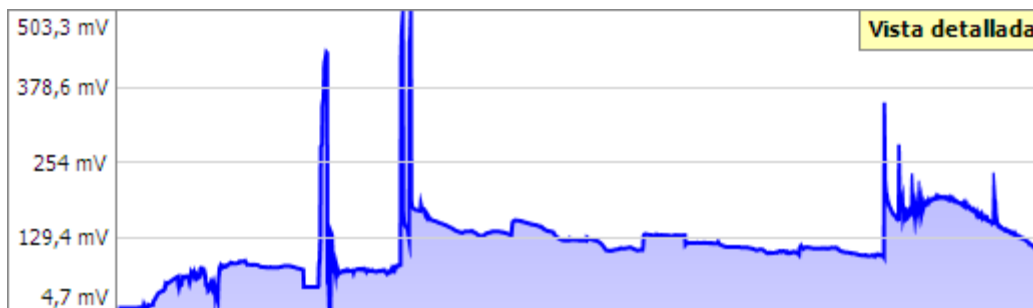


Imatge 39: Diferents passos de la tinció. Font: Pròpia.

ANNEX 8: MOSTRA DELS REGISTRES DE VOLTATGE

39 ANNEX 8: MOSTRA DELS REGISTRES DE VOLTATGE

Imatge 40: Gràfic global de l'experiment n°1. Font: DMM Tool®



232	30/06/2020 8:03:28	0,715	V	253	30/06/2020 10:33:38	0,704	V
233	30/06/2020 8:03:29	0,715	V	254	30/06/2020 10:48:38	0,704	V
234	30/06/2020 8:03:30	0,715	V	255	30/06/2020 11:03:38	0,703	V
235	30/06/2020 8:03:30	0,715	V	256	30/06/2020 11:18:38	0,702	V
236	30/06/2020 8:03:31	0,715	V	257	30/06/2020 11:33:38	0,7	V
237	30/06/2020 8:03:31	0,715	V	258	30/06/2020 11:48:39	0,699	V
238	30/06/2020 8:03:32	0,715	V	259	30/06/2020 12:03:39	0,698	V
239	30/06/2020 8:03:32	0,715	V	260	30/06/2020 12:18:40	0,697	V
240	30/06/2020 8:03:33	0,715	V	261	30/06/2020 12:33:40	0,695	V
241	30/06/2020 8:03:34	0,715	V	262	30/06/2020 12:48:40	0,695	V
242	30/06/2020 8:03:34	0,715	V	263	30/06/2020 13:03:41	0,695	V
243	30/06/2020 8:03:35	0,715	V	264	30/06/2020 13:18:41	0,695	V
244	30/06/2020 8:18:35	0,714	V	265	30/06/2020 13:33:42	0,694	V
245	30/06/2020 8:33:36	0,713	V	266	30/06/2020 13:48:42	0,693	V
246	30/06/2020 8:48:36	0,712	V	267	30/06/2020 14:03:42	0,692	V
247	30/06/2020 9:03:36	0,711	V	268	30/06/2020 14:18:43	0,691	V
248	30/06/2020 9:18:36	0,711	V	269	30/06/2020 14:33:43	0,69	V
249	30/06/2020 9:33:36	0,709	V	270	30/06/2020 14:48:43	0,69	V
250	30/06/2020 9:48:37	0,709	V	282	30/06/2020 17:48:46	0,68	V
251	30/06/2020 10:03:37	0,706	V				
252	30/06/2020 10:18:37	0,705	V				

