



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

**GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTROQUÍMICA REUTILIZANDO AGUAS  
GRISES DOMÉSTICAS**

**Línea de investigación:**

**Física nuclear y ambiental**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

**Autor**

Rivera Aquino, Hugo Raul

**Asesor**

Rodríguez Rodríguez, Ciro

ORCID: 0000-0003-2112-1349

**Jurado**

Iannacone Oliver, José Alberto

Ccasani Allende, Julian

Jave Nakayo, Jorge Leonardo

**Lima - Perú**

**2024**



## Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	1A_RIVERA_AQUINO_HUGO_RAUL_DOCTORADO_2022.docx (D135073492)
<b>Submitted</b>	2022-04-30 00:15:00 UTC+02:00
<b>Submitted by</b>	Johnny
<b>Submitter email</b>	jastete@unfv.edu.pe
<b>Similarity</b>	0%
<b>Analysis address</b>	jastete.unfv@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

---

**SA** **Mini-ABP.docx**  
Document Mini-ABP.docx (D71537550)

 **1**

## Entire Document

---

image2.emf

VRI N VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

VRIN

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTROQUÍMICA REUTILIZANDO AGUAS GRISES DOMÉSTICAS

Línea de investigación:

Física nuclear y ambiental

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Ambiental

Autor: Rivera Aquino, Hugo Raul

Asesor: Rodríguez Rodríguez, Ciro (ORCID: 0000-0003-2112-1349)

Lima - Perú 2022

RESUMEN (Palabras clave)

La sobrevivencia de la humanidad y de las especies vivientes de la tierra depende de las condiciones ambientales y climáticas de nuestro planeta. Las actuales tecnologías de generación de energía electroquímica utilizadas en actividades domésticas, industriales, comerciales y sanitarias: baterías, pilas y acumuladores de metales pesados como el litio, plomo y cadmio, electrolitos de ácidos corrosivos, devienen en millones de toneladas anuales de desechos y basura eléctrica y electrónica contaminante del medio ambiente. Esta situación es creciente y cada día tiende a ser insostenible a pesar de los esfuerzos que se realizan en varios países en la regulación y control de la disposición de dichos residuos. Por tal motivo, la presente tesis tiene como el Objetivo: Generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas. Método: Se realizó una investigación experimental de la generación electroquímica de energía eléctrica empleando celdas galvánicas sin metales pesados y reutilizando aguas grises domesticas como electrolito, en lugar de los electrolitos ácidos. Resultados: De las pruebas realizadas, en todas las mediciones registradas se demuestra la generación de energía eléctrica de origen electroquímico. Conclusiones: Se ha logrado generar energía electroquímica reutilizando aguas grises domésticas, se ha encontrado literatura científica relacionada al tema de investigación mas no emplean la técnica presentada, se ha construido Prototipos para el objetivo propuesto alcanzando pequeña capacidad energética. Recomendaciones: Continuar el desarrollo y perfeccionamiento del Prototipo, para alcanzar mayores niveles de potencia eléctrica. Palabras clave: Aguas grises, energía, electroquímica, celda galvánica y metales pesados.

ABSTRACT (Key words)



## **ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO**

### **GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTROQUÍMICA REUTILIZANDO AGUAS GRISES DOMÉSTICAS**

**Línea de investigación:**

**Física nuclear y ambiental**

Tesis para optar el grado académico de  
Doctor en Ingeniería Ambiental

**Autor**

Rivera Aquino, Hugo Raul

**Asesor**

Rodríguez Rodríguez, Ciro  
ORCID: 0000-0003-2112-1349

**Jurado**

Iannacone Oliver, José Alberto  
Ccasani Allende, Julian  
Jave Nakayo, Jorge Leonardo

**Lima - Perú**

**2024**

## **Dedicatoria**

A mis abuelos Susana y Julián, y a mi Madre Celestina, que desde lo alto guían mis pasos, así como lo hicieron en mi niñez.

A mi madre Celestina y mis hermanos Jaime, José y Javier que me enseñaron a transitar por el camino de la humildad, resiliencia y perseverancia, para superar la pobreza.

A mi esposa Luz y a mis hijos Estefanía y Christian que son la razón de mi vida.

A mis tíos Saturnina, Elisea y Domingo ejemplos de trabajo.

### **Agradecimiento**

A mi maestro y asesor Dr. Ciro Rodríguez Rodríguez,  
por sus consejos y orientación.

A mis profesores del Doctorado en Ingeniería Ambiental,  
por sus sabias enseñanzas.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Planteamiento del Problema .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2. Descripción del Problema.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Formulación del Problema.....</b>	<b>25</b>
- Problema General.....	25
- Problemas Específicos .....	25
<b>1.4. Antecedentes.....</b>	<b>26</b>
<b>1.5. Justificación de la investigación.....</b>	<b>37</b>
<b>1.6. Limitaciones de la investigación .....</b>	<b>39</b>
<b>1.7. Objetivos .....</b>	<b>40</b>
- Objetivo General.....	40
- Objetivos Específicos.....	40
<b>1.8. Hipótesis.....</b>	<b>41</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>42</b>
<b>2.1. Marco conceptual.....</b>	<b>42</b>
<b>III. MÉTODO .....</b>	<b>53</b>
<b>3.1. Tipo de investigación .....</b>	<b>53</b>

3.2.	Población y muestra.....	54
3.3.	Operacionalización de variables.....	59
3.4.	Instrumentos.....	64
3.5.	Procedimientos.....	67
3.6.	Análisis de datos.....	68
3.7.	Consideraciones éticas.....	70
IV.	RESULTADOS.....	71
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	104
VI.	CONCLUSIONES.....	109
VII.	RECOMENDACIONES.....	112
VIII.	REFERENCIAS.....	113
IX.	ANEXOS.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Literatura existente relacionada a generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas .....	36
<b>Tabla 2.</b> Resultados de la búsqueda de literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.....	37
<b>Tabla 3.</b> Celdas Electroquímicas, clasificación y funciones de sus componentes .....	47
<b>Tabla 4.</b> Voltaje resultante de las semireacciones Redox .....	54
<b>Tabla 5.</b> Análisis físico-químico y de metales totales del agua gris empleada para los experimentos .....	56
<b>Tabla 6.</b> Operacionalización de las Variables .....	64
<b>Tabla 7.</b> Datos estadísticos generales obtenidos por celda. Sin carga .....	73
<b>Tabla 8.</b> Medición de voltajes en Prototipo 1 - Modelo. Sin carga.....	73
<b>Tabla 9.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 1. Sin carga.....	73
<b>Tabla 10.</b> Medición de voltajes en Prototipo 2. Sin carga .....	75
<b>Tabla 11.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 2. Sin carga.....	75
<b>Tabla 12.</b> Medición de voltajes en Prototipo 3. Sin carga .....	76
<b>Tabla 13.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 3. Sin carga.....	76
<b>Tabla 14.</b> Medición de voltajes en Prototipo 4. Sin carga .....	77
<b>Tabla 15</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 4. Sin carga.....	78
<b>Tabla 16.</b> Medición de voltajes en Prototipo 5. Sin carga .....	79
<b>Tabla 17.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 5. Sin carga.....	79
<b>Tabla 18.</b> Medición de voltajes en Prototipo 6. Sin carga .....	81
<b>Tabla 19.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 6. Sin carga.....	81

<b>Tabla 20.</b> Medición de voltajes en Prototipo 7. Sin carga .....	82
<b>Tabla 21.</b> Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 7. Sin carga.....	82
<b>Tabla 22.</b> Medición de voltaje total en cada Prototipo. Sin carga .....	84
<b>Tabla 23.</b> Datos estadísticos del voltaje total en todos los Prototipos. Sin carga .....	86
<b>Tabla 24.</b> Resumen Pruebas de medición de voltaje total en cada Prototipo. Con carga .....	89
<b>Tabla 25.</b> Prueba de capacidad del Prototipo1 .....	94
<b>Tabla 26.</b> Análisis del ciclo de vida del prototipo.....	100
<b>Tabla 27.</b> Interpretación de datos estadísticos de medición de voltaje total en cada Prototipo. Sin carga.....	103
<b>Tabla 28.</b> Resumen estadístico de la prueba de capacidad del Prototipo1 .....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efectos de los metales pesados en el cuerpo .....	19
<b>Figura 2.</b> Tóxicos ambientales en el aire. ....	20
<b>Figura 3.</b> Composición de la producción eléctrica en el mundo en el año 2015 .....	22
<b>Figura 4.</b> Consumo final mundial de energía por fuente de energía. 1973 – 2018.....	23
<b>Figura 5.</b> Consumo final de energía ALC por fuente de energía 1973 – 2019.....	24
<b>Figura 6.</b> Principio de operación de la pila de Volta .....	27
<b>Figura 7.</b> Deshechos de pilas y baterías.....	38
<b>Figura 8.</b> Análisis del ciclo de vida de las sustancias químicas.....	39
<b>Figura 9.</b> Modelo Cuántico del átomo. ....	42
<b>Figura 10.</b> Potenciales estándar de reducción a 25° C .....	45
<b>Figura 11.</b> Modelo atómico de Daniels Bohr.....	51
<b>Figura 12.</b> Proceso de fabricación del prototipo. ....	58
<b>Figura 13.</b> Diseño de ingeniería, corte de los electrodos en equipo láser, fabricación de tapa en impresora 3D y ensamblaje de los prototipos. ....	58
<b>Figura 14.</b> Caja de plástico, es material reciclado de baterías usadas. ....	61
<b>Figura 15.</b> Tapa del prototipo fabricada en impresora 3D.....	61
<b>Figura 16.</b> Placas de Cobre y de Hierro galvanizado. ....	62
<b>Figura 17.</b> Separadores para placas.....	62
<b>Figura 18.</b> Dimensiones de los electrodos de cobre y hierro galvanizado.....	63
<b>Figura 19.</b> Pernería para las conexiones y armado de las placas. ....	63
<b>Figura 20.</b> Diseño preliminar del Prototipo de celdas galvánica, con aguas grises.....	65
<b>Figura 21.</b> Conexión básica para incremento de voltaje.....	65
<b>Figura 22.</b> Electrodos ensamblados para la generación.....	66

<b>Figura 23.</b> Prototipo 1. En proceso de ensamblaje preliminar.....	66
<b>Figura 24.</b> Prototipo 7. Concluido y listo para para funcionar. ....	67
<b>Figura 25.</b> Mediciones de voltaje obtenidos en los Prototipos. ....	71
<b>Figura 26.</b> Resultados de la medición de voltajes obtenidos en cada celda. Sin carga.....	72
<b>Figura 27.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 1 - Modelo. Sin carga.....	74
<b>Figura 28.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 1 - Modelo. Sin carga. ....	74
<b>Figura 29.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 2. Sin carga.....	75
<b>Figura 30.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 2. Sin carga. ....	76
<b>Figura 31.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 3. Sin carga.....	77
<b>Figura 32.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N°3. Sin carga. ....	77
<b>Figura 33.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 4. Sin carga.....	78
<b>Figura 34.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 4. Sin carga. ....	79
<b>Figura 35.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 5. Sin carga.....	80
<b>Figura 36.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 5. Sin carga. ....	80
<b>Figura 37.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 6. Sin carga.....	81
<b>Figura 38.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 6. Sin carga. ....	82
<b>Figura 39.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo 7. Sin carga.....	83
<b>Figura 40.</b> Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 7. Sin carga.....	83
<b>Figura 41.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 1. Sin carga .....	86
<b>Figura 42.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 2. Sin carga .....	86
<b>Figura 43.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 3. Sin carga .....	87
<b>Figura 44.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 4. Sin carga .....	87
<b>Figura 45.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 5. Sin carga .....	87
<b>Figura 46.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 6. Sin carga .....	88
<b>Figura 47.</b> Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 7. Sin carga .....	88

<b>Figura 48.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 1. Con carga .....	91
<b>Figura 49.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 2. Con carga .....	91
<b>Figura 50.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 3. Con carga .....	91
<b>Figura 51.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 4. Con carga .....	92
<b>Figura 52.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 5. Con carga .....	92
<b>Figura 53.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 6. Con carga .....	92
<b>Figura 54.</b> Medición de voltaje en el Prototipo N° 7. Con carga .....	93
<b>Figura 55.</b> Curva de medición y ecuación exponencial de corriente con carga Prototipo1 ....	96
<b>Figura 56.</b> Curva de medición y ecuación polinomial de corriente con carga Prototipo1 .....	96
<b>Figura 57.</b> Curva de la potencia instantánea del Prototipo 1 obtenida con los resultados de la Prueba 5 .....	98
<b>Figura 58.</b> Multímetro Kyoritsu 1009.....	118

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Corriente en función de carga y tiempo. ....	49
<b>Ecuación 2.</b> Fórmula de la desviación estándar. ....	69
<b>Ecuación 3.</b> Línea de tendencia de la corriente en función del tiempo.....	97
<b>Ecuación 4.</b> Corriente del Prototipo 1 en función del tiempo. ....	97
<b>Ecuación 5.</b> Capacidad del Prototipo 1 en función de la corriente y tiempo. ....	97
<b>Ecuación 6.</b> Capacidad C del Prototipo 1 en función del tiempo. ....	97
<b>Ecuación 7.</b> Fórmula de integración. ....	97
<b>Ecuación 8.</b> Ecuación de la potencia instantánea del prototipo 1-Prueba 5.....	99
<b>Ecuación 9.</b> Fórmula de la energía instantánea disipada. ....	99
<b>Ecuación 10.</b> Fórmula de la energía instantánea disipada. ....	99

## RESUMEN

La sobrevivencia de la humanidad y de las especies vivientes de la tierra depende de las condiciones ambientales y climáticas de nuestro planeta. Las actuales tecnologías de generación de energía electroquímica utilizadas en actividades domésticas, industriales, comerciales y sanitarias: baterías, pilas y acumuladores de metales pesados como el litio, plomo y cadmio, electrolitos de ácidos corrosivos, devienen en millones de toneladas anuales de desechos y basura eléctrica y electrónica contaminante del medio ambiente. Esta situación es creciente y cada día tiende a ser insostenible a pesar de los esfuerzos que se realizan en varios países en la regulación y control de la disposición de dichos residuos. Por tal motivo, la presente tesis tiene como el **Objetivo:** Generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas. **Método:** Se realizó una investigación experimental de la generación electroquímica de energía eléctrica empleando celdas galvánicas sin metales pesados y reutilizando aguas grises domesticas como electrolito, en lugar de los electrolitos ácidos. **Resultados:** De las pruebas realizadas, en todas las mediciones registradas se demuestra la generación de energía eléctrica de origen electroquímico. **Conclusiones:** Se ha logrado generar energía electroquímica reutilizando aguas grises domésticas, se ha encontrado literatura científica relacionada al tema de investigación mas no emplean la técnica presentada, se ha construido Prototipos para el objetivo propuesto alcanzando pequeña capacidad energética. **Recomendaciones:** Continuar el desarrollo y perfeccionamiento del Prototipo, para alcanzar escalabilidad de la potencia eléctrica y ciclos de vida de largo plazo.

Palabras clave: Aguas grises, energía, electroquímica, celda galvánica y metales pesados.

## ABSTRACT

The survival of humanity and the living species of the earth depends on the environmental and climatic conditions of our planet. The current technologies for the generation of electrochemical energy used in domestic, industrial, commercial and health activities: batteries, cells and accumulators of heavy metals such as lithium, lead and cadmium, corrosive acid electrolytes, become millions of tons per year of waste and garbage. electrical and electronic polluting the environment. This situation is growing and every day it tends to be unsustainable despite the efforts made in various countries to regulate and control the disposal of said waste. For this reason, the present thesis has as the **Objective:** To generate electrochemical energy, reusing domestic gray water. **Method:** An experimental investigation of the electrochemical generation of electrical energy was carried out using galvanic cells without heavy metals and reusing domestic gray water as electrolyte, instead of acid electrolytes. **Results:** From the tests carried out, in all the registered measurements the presence of electrical energy of electrochemical origin is demonstrated. **Conclusions:** It has been possible to generate electrochemical energy by reusing domestic greywater, scientific literature related to the research topic has been found but they do not use the presented technique, prototypes have been built for the proposed objective, reaching small energy capacity. **Recommendations:** Continue the development and improvement of the Prototype, to achieve scalability of electrical power and long-term life cycles.

Key words: Gray water, energy, electrochemistry, galvanic cell and heavy metals.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Planteamiento del problema

La energía, en sus variadas formas, es indispensable para la realización de múltiples actividades de la civilización actual, sin energía sería imposible desarrollar varias actividades domésticas, comerciales, industriales, fabricación, mineras, comunicaciones, informática y en general aquellas en las que se emplea la energía.

Por otro lado, la humanidad tiene el reto de enfrentar diversos problemas medioambientales, que se han convertido en riesgos potenciales para su propia existencia y sobrevivencia. Por tal razón últimamente se viene promoviendo la visión de desarrollo sostenible. Esta concepción del desarrollo de la humanidad pretende generar conciencia sobre los graves problemas ambientales a fin de reducir o mitigar su continuidad e impacto creciente y promover la vida humana en armonía con el medio ambiente.

En la Norma Técnica de Salud NTS N.º 111 – 2014-MINSA/DGE - V.01 Norma Técnica de Salud que Establece la Vigilancia Epidemiológica en Salud Pública de Factores de Riesgo por Exposición e Intoxicación Por Metales Pesados y Metaloides (Salud, 2014), se define Estándares de Calidad Ambiental (ECA) o valores límite de la concentración de contaminantes en la tierra, la atmósfera y el agua, que tienen en cuenta niveles de bioseguridad frente a los puntos de inflexión que de ser rebasados habrá riesgo de daños con consecuentes impactos ambientales en el cual estamos inmersos las personas.

Por eso es menester la investigación en busca de otras fuentes y formas alternativas de generación de energía, con menor impacto ambiental y sobre todo reutilizando y reciclando los recursos ambientales.

## **1.2. Descripción del Problema**

La disposición de los Residuo de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE (Basura eléctrica y electrónica) hecha en forma irresponsable, conteniendo metales pesados contaminan el medio ambiente y directa o indirectamente causan graves daños a la salud humana. Visto individualmente, en cada evento podrían contener pequeñas cantidades de material contaminante y tóxicos sin mayor peligro, pero totalizándolos, tenemos grandes volúmenes de RAEE que resulta sumamente difícil ejercer control. Entre los materiales tóxicos y potencialmente peligrosos tenemos:

- Plomo,
- Cadmio,
- Níquel,
- Selenio,
- Antimonio,
- Berilio,
- Cromo,
- Mercurio,
- Litio,
- Zinc,
- Ácido Sulfúrico.

Según el Observatorio mundial de los residuos electrónicos (Forti et al., 2020), en el año 2019 el mundo causó 53,6 Millones de toneladas de RAEE, alrededor de 7,3 kg per cápita. Se estima llegue a 74,7 Millones de toneladas en el 2030, 100% más en 16 años.

En el año 2019, se documentó se recogieron y reciclaron de manera conveniente 9,3 Millones de toneladas (17,4%) de RAEE. El restante son 44,3 Millones de toneladas (82,6%) de RAEE en 2019, de los cuales se desconoce su destino final e impacto ambiental.

Tenemos a nivel mundial gigantescos mercados de productores, fabricantes, comercializadores y usuarios de gran variedad de modelos y tipos de pilas, baterías y acumuladores. Aguirre (2013), las clasifica en:

Pilas alcalinas

Pilas de dióxido de litio-sulfuro

Pilas tipo botón

Pilas y Baterías seca o de zinc carbón

Pilas de litio

Pilas de óxido de mercurio

Pilas de óxido de plata

Pilas de monofluoruro de litio-carbón

Pilas de litio-thionyl

Acumuladores de plomo- ácido

Baterías de níquel cadmio (Ni/Cd)

Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni/MH)

Baterías de zinc-aire

Baterías de litio

Baterías de ion-litio

Baterías de polímero de litio (LiPo)

Baterías de ion de litio con cátodo  $\text{LiCoO}_2$

Baterías de ion de litio con cátodo de  $\text{LiFePO}_4$

Los componentes de estas pilas, acumuladores y baterías entre otros son:

Litio

Dióxido de litio-sulfuro

Mercurio

Plomo

Dióxido de plomo

Zinc

Cloruro de amonio

Dióxido de manganeso

Hidróxido de potasio,

Ácido sulfúrico

Cloruro de thionyl

Sulfato de plomo

Níquel: Hidróxido de níquel, Óxido de níquel y Níquel metal hidruro

Cadmio metálico.

Todo Residuo de Aparatos Eléctricos y Electrónicos RAEE (Basura eléctrica y electrónica), que sea arrojado a la basura como residuo común o doméstico o incinerado junto con otros residuos y que se echan a los rellenos sanitarios sin ningún control contaminan el

ambiente. En realidad, junto con residuos domésticos se arrojan pilas, baterías, acumuladores de diversos tipos y los contaminantes que contienen y seguirá ocurriendo hasta que se realice la segregación de estos desechos, de modo organizado y con los protocolos debidos.

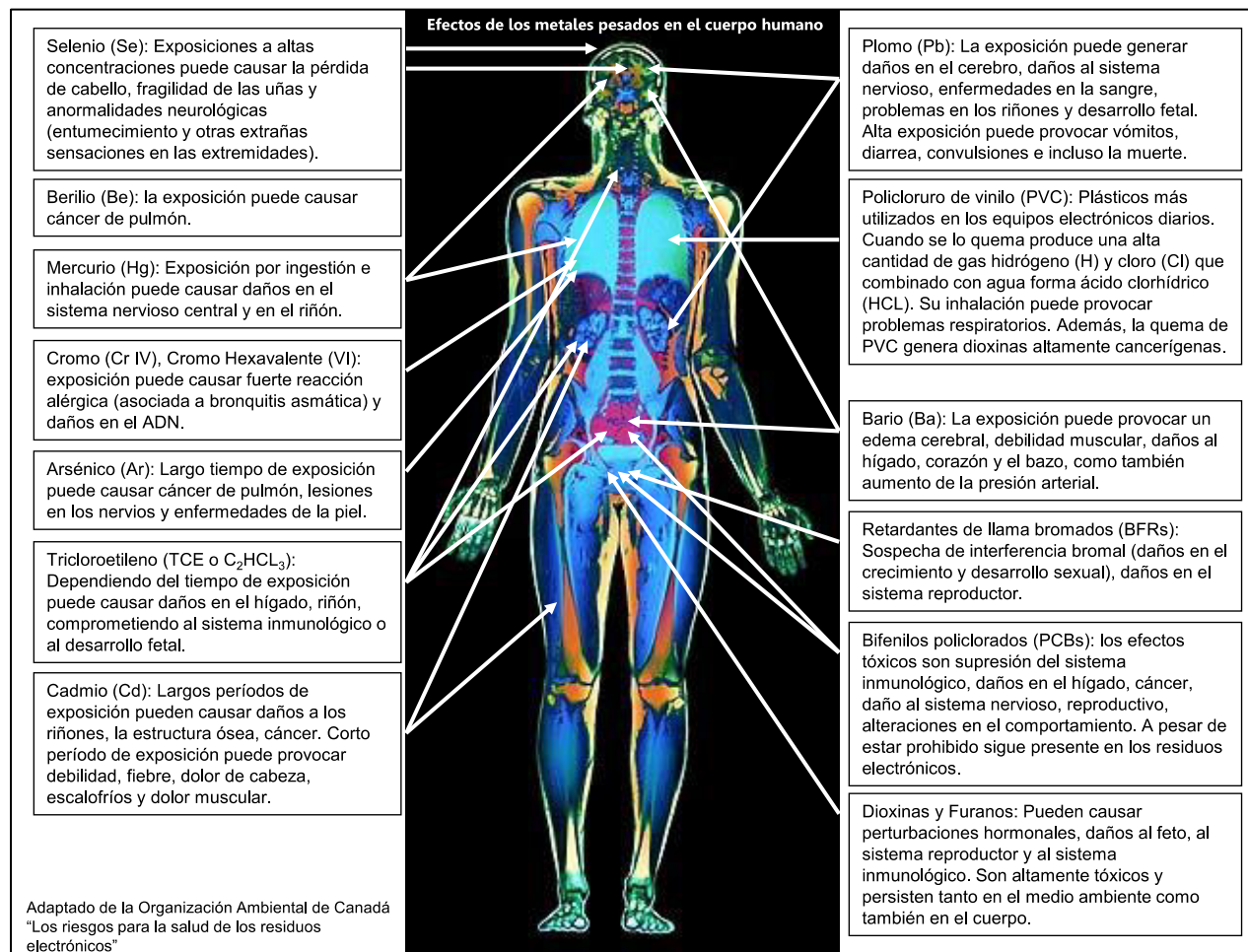
Ferrer (2003), explica que “Otro posible efecto a largo plazo es la carcinogénesis. La International Agency for Research on Cancer (IARC) ha incluido en el Grupo I (Agentes carcinógenos en humanos) a: arsénico, berilio, cadmio, cromo (VI) y níquel”, asimismo los metales pesados son la causa de patologías agudas, dependiendo del período de contacto o contaminación, numerosas investigaciones científicas confirman la relación entre diversas enfermedades por efectos de los metales pesados en la salud humana, corroborando que causan inmensos daños.

Como hemos apreciado, la contaminación es un proceso de origen antropogénico, es resultado de la actividad humana en diversas áreas: Doméstica, comercial, industrial, bélica, construcción, minería, generación energética, etc. por los cuales diversos productos excedentes, residuos, sustancias y tóxicos son vertidos, intencionalmente o no, a la tierra, agua y aire causando polución en el medio ambiente, modificando su composición y características naturales, alterando su estado y como consecuencia atenta contra la salud ambiental al generar potencial riesgo de efectos directos o indirectos a los seres vivos: personas, animales y plantas a dichas sustancias la fundación para la Salud Geoambiental denomina: tóxicos ambientales. (Instituto para la Salud Geoambiental, 2017).

Los metales, particularmente los metales pesados, pueden producir gran variedad de efectos y daños a la salud, en forma inmediata o a largo plazo, dependiendo de la dosis de tóxicos. Véase la Figura 1.

Figura 1

## Efectos de los metales pesados en el cuerpo



Fuente: Scrap & Rezagos. (Rezagos, 2021)

Los tóxicos ambientales pueden ser degradables o no en el tiempo, en este último caso los no degradables tienen un largo tiempo de permanencia en el medio ambiente que puede alcanzar miles de años, contaminando la tierra, el agua y el aire, trasladándose a través de la cadena trófica a las plantas y animales, en finalmente a las personas. Y lo más preocupante es que algunos tienen carácter acumulativo en cuanto a sus efectos y daños. Ver Figura 2.

**Figura 2**

*Tóxicos ambientales en el aire.*



Fuente: Sociedad Peruana de Derecho Ambiental – SPDA. Foto: Andina

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entre los problemas ambientales que vienen causando preocupación advierte que en las últimas décadas se están evidenciando, cada vez con mayor claridad, cambios en la estructura ecosistémica de la Tierra, sin precedentes históricos a una escala y velocidad cada vez mayor, diversos medios y foros científicos revelan que paralelamente a los apetitos de desarrollo tecnológico e industrialización, nos estamos acercando vertiginosamente a los “umbrales críticos de la Tierra” a los puntos de no retorno o tal vez los hemos superado en ciertos ámbitos. Las evidencias son múltiples:

- Mayor frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos: lluvias torrenciales, inundaciones y sequías.

- Cambios globales, no lineales, repentinos y posiblemente irreversibles en los procesos naturales que sustentan la vida del planeta.
- Eutrofización, por ejemplo, la contaminación de aguas de ríos y lagos, y consecuente colapso de ecosistemas de lagos y estuarios de agua dulce.
- Deshielo de glaciares como la capa de hielo del Ártico y otro, por efecto del calentamiento global o aumento de la temperatura media por encima de ciertos umbrales.
- Incremento acelerado de la temperatura y del nivel del mar.
- Extinción y pérdida de la biodiversidad.
- Incremento de la pobreza y vulnerabilidad en la población.

Mejorar el bienestar humano es una necesidad indispensable, para ello hay que lograr los objetivos de desarrollo y crecimiento en todos los ámbitos de la actividad humana, el punto es cómo hacerlo sin dañar y atentar contra el futuro de la única nave que tenemos por ahora: La Tierra. Es menester por ello cambiar la causa raíz, en beneficio de las fuerzas motrices ambientales naturales, de lo contrario pronto tendremos importantes consecuencias negativas para el bienestar humano, amenazas a niveles sin precedentes que afectarán el capital natural y la seguridad humana. (PNUMA, GEO-5, 2012).

En la publicación *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico del país*, Tamayo et al. (2016) manifiesta que, a nivel mundial, en el año 2015 la potencia instalada para generación de energía eléctrica fue de 6208 GW, de los cuales el continente asiático contó con 2881 GW (46%). Además, los países con mayor potencia instalada fueron:

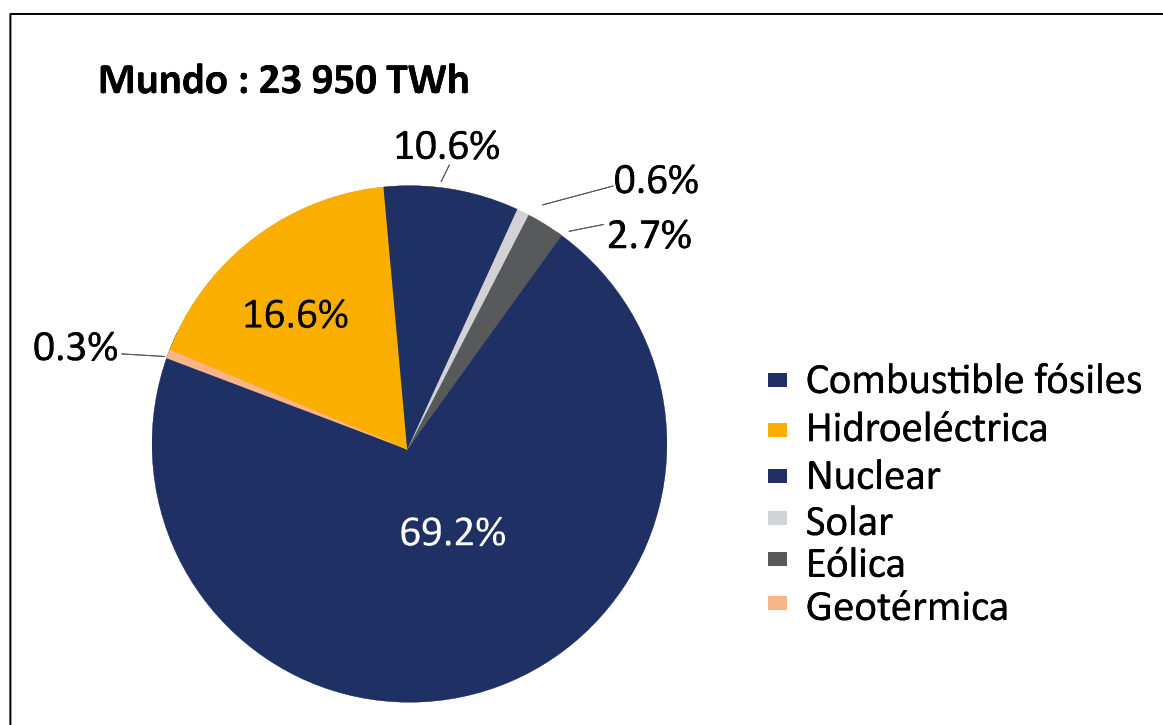
- China 1433 GW
- Japón 320 GW

- India 312 GW.

Además, Tamayo et al. (2016), reportó que, en el año 2015, la producción de energía eléctrica por todo tipo de fuente alcanzó 23,950 TWh. Ver composición de dicha producción en la Figura 3.

**Figura 3**

*Composición de la producción eléctrica en el mundo en el año 2015*

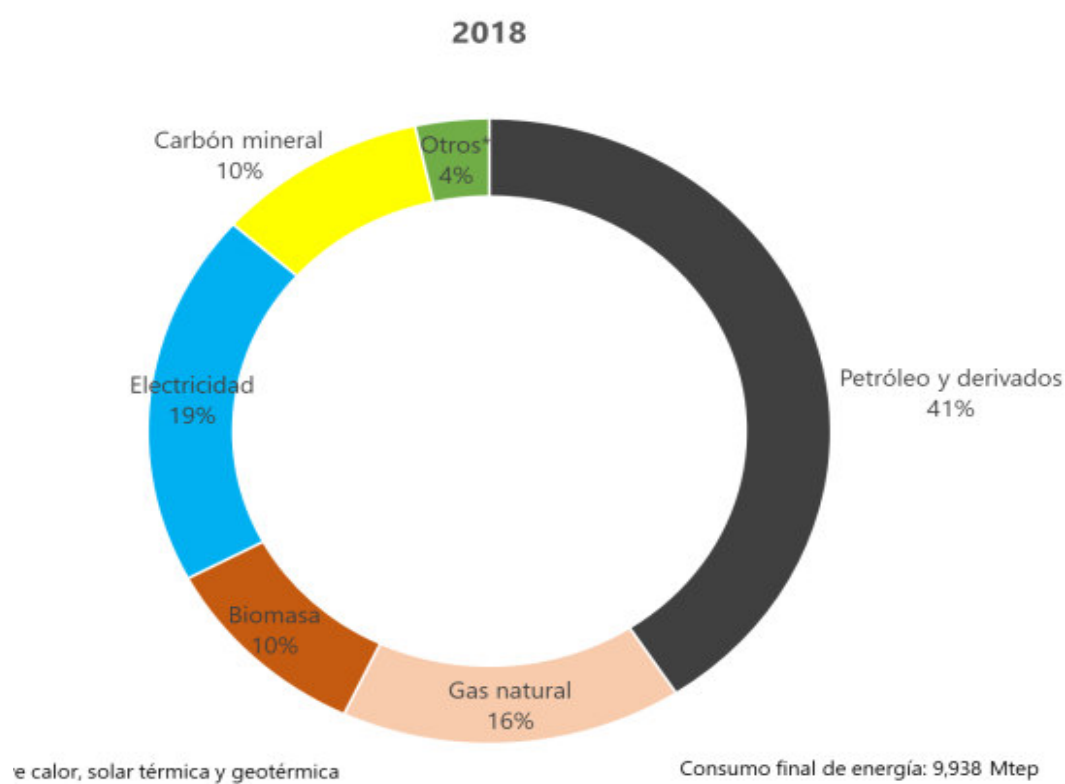
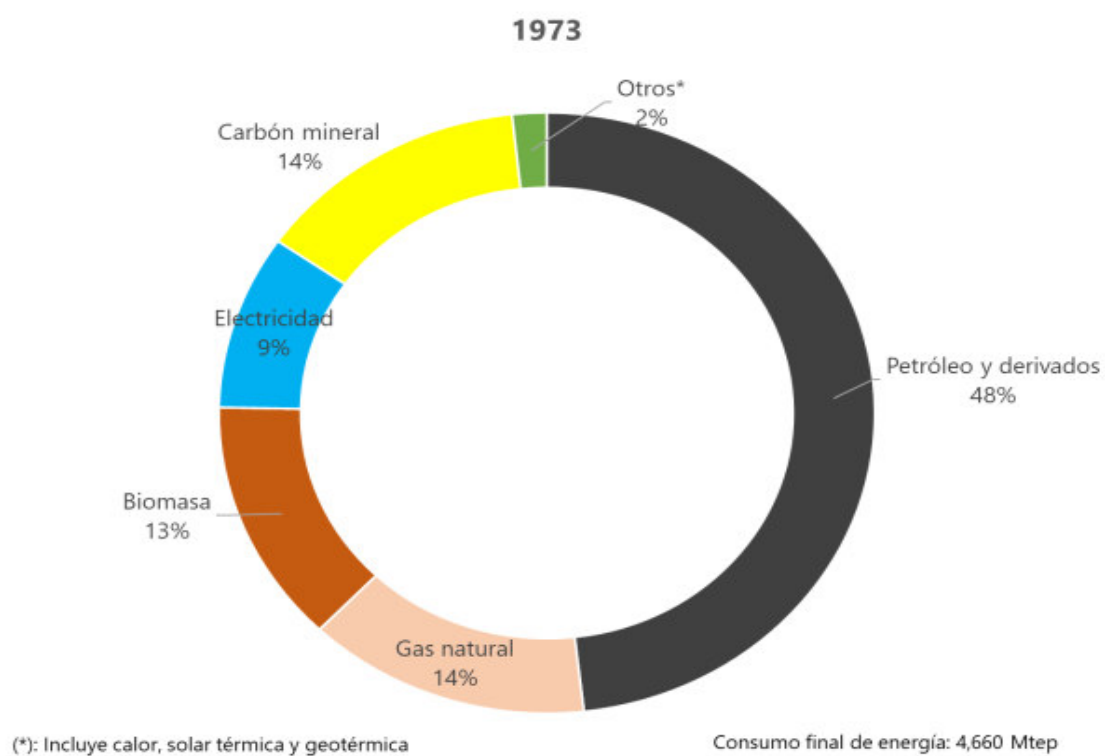


Fuente: ONU. Elaboración: GPAE-Osinergmin. (Tamayo et al., 2016)

Según la OLADE (2021), en el mundo en el 2018 se utilizó 9,938'000,000 toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), el doble de 1973 y el consumo energético de América Latina y el Caribe alcanzó 618 Mtep, cuatro veces del consumo de 1973, todo ello en 45 años. Además, en la Figura 4 y 5 se tiene el consumo final mundial de energía por fuente de energía de los años 1973 y 2018.

**Figura 4**

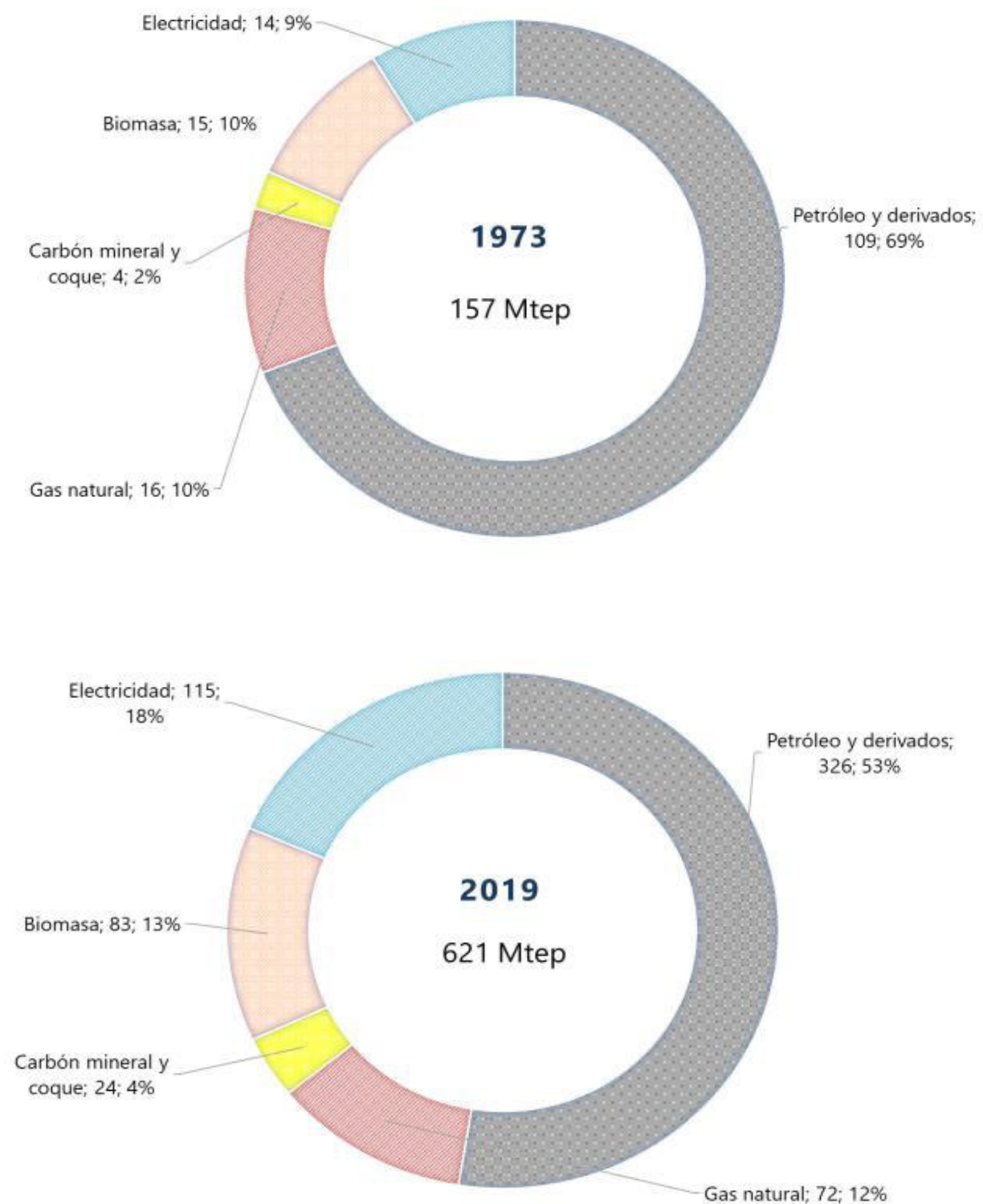
*Consumo final mundial de energía por fuente de energía. 1973 – 2018*



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía. OLADE.

**Figura 5**

*Consumo final de energía ALC por fuente de energía 1973 – 2019*



Fuente: Organización Latinoamericana de Energía. OLADE.

El panorama actual, nos debe plantear la siguiente reflexión: Si la humanidad no cambia las tendencias en el uso de energía, encontrará en una franca carrera hacia la desestabilización medioambiental y autodestrucción.

En todos los casos observamos que los efectos tienen como causa principal la intervención del hombre, es decir son de origen antropogénico o antrópico y es por lo tanto el hombre es quien tiene el deber de detener su propia destrucción, antes que sea tarde si es que aún no lo es. Por lo tanto, tenemos el reto del innovar y crear otro sistema de vida sostenible, para dejar de lado paulatinamente el sistema actual que puede conducirnos a la muerte. Una alternativa es innovar y utilizar energías limpias, otra es promover el uso de fuentes de generación de energía que causen menor o ningún impacto ambiental.

### **1.3. Formulación del problema**

- **Problema general**

¿De qué manera es posible generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?

- **Problemas específicos**

PE1: ¿Cuál es la literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?

PE2: ¿Cómo se podría generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?

PE3: ¿Cuáles son los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas?

#### **1.4. Antecedentes**

Se ha procedido a investigar diversas fuentes documentales, en el ámbito nacional e internacional, a fin de indagar sobre la existencia de trabajos sobre temas similares o relacionados al de la presente investigación y describimos a continuación:

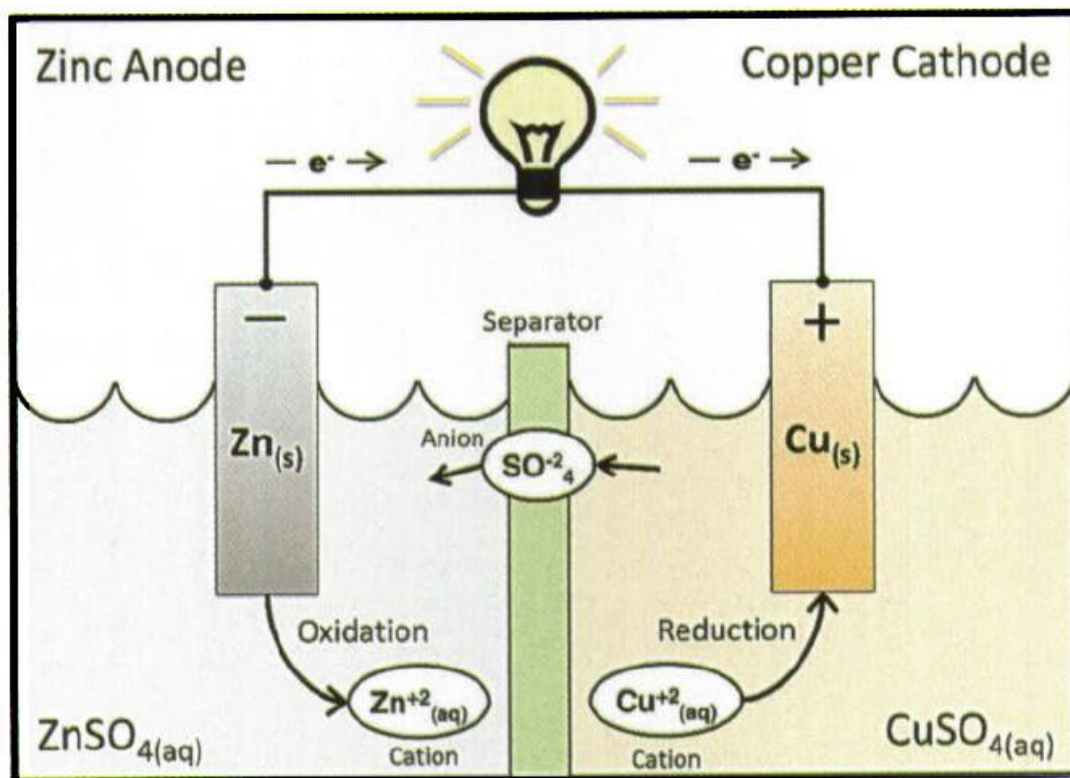
##### **El estado del arte de generación de energía electroquímica y las aguas residuales**

En el artículo *Better Batteries Through Electrochemistry*, de la Revista *Mechanicall Engineering*, Moura & Perez (2014) señala que el físico italiano Alessandro Volta, inspirado en los descubrimientos de Luigui Galvani, inventó la pila de Volta aproximadamente en el año 1800. Este artefacto tenía como electrolito ácido sulfúrico y en él introdujo electrodos de cobre y zinc provistos de separadores, este arreglo elemental permitió generar electricidad por reacción química, por lo que se le denomina energía electroquímica, porque su origen o estado inicial es químico. Durante la reacción química se desarrollan los procesos de reducción y oxidación. Análogamente las baterías cuentan con electrodos, también denominados placas las cuales deben estar convenientemente instaladas dentro de recipientes o celdas.

Además, según Moura & Perez (2014) las variables electroquímicas no son medibles de modo directo, a diferencia de la corriente, el voltaje y temperatura. Por tal motivo considera importante modelar y controlar dichas variables para poder optimizar el funcionamiento de las baterías. Ver Figura 6.

**Figura 6**

*Principio de operación de la pila de Volta*



Fuente: Moura & Perez (2014). Better Batteries Through Electrochemistry. (p. 16)

Para Doeff (2011) en *Batteries en Overview of Battery Cathodes*, en una batería de descarga, cuando circula corriente los iones con carga positiva del electrolito, conocidos como cationes, se desplazan hacia el cátodo y los iones negativos hacia el ánodo.

Durante la recarga ocurre lo contrario.

En la publicación *Elementos de Electroquímica*, describe que uno de los electrodos pierde electrones y el otro gana. El primero es oxidante y el segundo el reductor. Asimismo, el proceso de oxidación se produce en el ánodo por lo que se le denomina oxidación anódica y el proceso de reducción se produce en el cátodo por lo que se denomina reducción catódica, ambos casos al margen que se esté utilizando pilas o células electrolíticas (Cerón & Soto Bubert, 2004).

Ashleigh (2012) en *Chemistry for Chemical Engineers* nos explica sobre la denominación Redox, que es una abreviatura para la reducción – oxidación y que, existe equilibrio entre el estado del material en oxidación versus el material en reducción.

Según Chamizo (2018) los más antiguos utensilios de cobre nativo se usaban en Medio Oriente hace más de 7 mil años y que el descubrimiento del cobre, fue un hecho accidental, fortuito al estaba ardiendo carbón vegetal, pobladores lanzaron sobre el fuego piedras de malaquita verde y después de apagarse el fuego se sorprendieron al encontrar un metal reluciente: El cobre. A partir de ese entonces se desarrolla la fundición y metalurgia empleando variados metales, lo que contribuyó al desarrollo y transformación de la vida humana.

Según Bustamante et al. (2020) en *Las reacciones electroquímicas y su importancia en el futuro del suministro de energía*, la generación de energía electroquímica se viene utilizando por la humanidad desde hace más de un siglo y en la actualidad disponemos de variados medios, procedimientos y mecanismos de conversión entre ellos cuales viene destacando las reacciones electroquímicas.

Además Bustamante et al. (2020) explica la perspectiva histórica de la fisicoquímica desde la teoría planteada por Galvani y Volta quienes conocieron y aplicaron en sus inicios el proceso redox, basado en la oxidación y reducción del aluminio, zinc, cobre y otros metales, sus experiencias y trabajos de investigación, en la actualidad, sirven de soporte para la generación, la acumulación temporal y suministro de la energía eléctrica por lo tanto es una tecnología esencial para asegurar el futuro.

Asimismo, según Zhuwei et al. (2007) en *A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy* dan cuenta que mediante reacciones catalíticas de microorganismos en condiciones anaeróbicas en celdas de combustible microbianas de combustible se puede transformar la energía química de compuestos orgánicos en energía eléctrica. En este caso las celdas de combustible microbianas (MFC) funcionan como biorreactores. Esta área de investigación ha generado gran interés los académicos y científicos.

Seguidamente en el artículo *Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana*, explica que empleando bacterias *Escherichia coli* en una celda de combustible microbiana con materiales de bajo costo obtuvo electricidad, demostrando que las aguas residuales son una potencial fuente de energía novedosa y que se abre una alternativa a futuro, la cual requiere continuar investigando (García et al., 2017).

Por su parte Alzate et al. (2008) en *Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana*, describe que, utilizando una celda de combustible microbiana, con electrodos de papel carbón y cátodo con ingreso de aire, en celdas

de ánodo y cátodo separados por una membrana de intercambio de protones lograron la generación de electricidad empleando como sustrato agua residual sintética.

Según Logan (2010) en *Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems*, revela el impactante desarrollo de las celdas de combustible microbianas y que alcanzan potencias de 1 kW/m<sup>3</sup> de reactor y 6.9 W/m<sup>2</sup> de electrodos. Lo que significa un alto potencial de generación de energía eléctrica a nivel de laboratorio y un prometedor futuro cuando se aplique en la producción de electricidad.

Para López Vasquez et al. (2017) en *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño*, describe: “La bioenergética proporciona una herramienta para cuantificar la cantidad de energía disponible para diversas reacciones biológicas, que luego pueden ser utilizadas para determinar el rendimiento en biomasa de una reacción” (p. 22).

Sánchez et al. (2021) en *Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas*, menciona que su metodología de la investigación fue de tipo cualitativa-documental relacionada a MFCs, se fundamentó en bases de datos reconocidas como: ScienceDirect<sup>®</sup> y Google Scholar, y concluye que la tecnología de celda microbiana de combustible es una alternativa beneficiosa en auge y que aún se deben investigar exhaustivamente, para incorporar mejoras en los microorganismos, electrodos, electrolito, costos y otros aspectos con miras a lograr producción a escala incluso en lugares que carecen de energía eléctrica.

En la investigación denominada *Las reacciones electroquímicas y su importancia en el futuro del suministro de energía*, Bustamante et al. (2020) menciona que la utilización de pilas de litio en la movilización de vehículos y en electrónica, permiten lograr gran carga eléctrica

además el hidrógeno verde como fuente de energía en el futuro, mediante la electrólisis revelando la importancia de la energía renovable y en especial las energías de origen electroquímico para el futuro de la humanidad.

Cora Repuello (2019) describe que en su investigación *Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica*, evaluó el potencial de generación de energía eléctrica y la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales, estudió empleando las aguas residuales de la ciudad de Huancavelica administradas por la EPS Emapa Huancavelica, tomando muestras mensualmente para ser analizadas en laboratorio, empleándolas en celdas mediante las cuales logró generar voltajes promedio de 0.52 V y no menos de 0.5 V. Este importante trabajo deja claro la existencia de energía en las aguas residuales y que con un adecuado tratamiento es posible transformarla en electricidad, es evidente que la gran tarea que hay por realizar es lograr mayores valores de voltaje y por ende más potencia.

Alfonso & Gómez (2019) nos indica en su investigación *Clarificación de agua con generación de energía eléctrica en una celda galvánica Al-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>*, que logró obtener energía eléctrica directamente a partir de energía química, para lo cual empleó un dispositivo denominado celda galvánica con electrodos de aluminio y grafito, como oxidante peróxido de hidrógeno o agua oxigenada y como electrolito una suspensión de arcilla en solución KCl que simuló el agua de tratamiento, con las observaciones del proceso evaluó la eliminación de turbidez, el voltaje y corriente generado, clarificando agua por floculación y disolución. De tal modo que partiendo de un sistema primario de agua se logra la transformación de las reacciones químicas en electricidad.

García et al. (2017) menciona que, empleando celdas microbianas de combustible, se obtiene energía eléctrica con voltajes desde 0.302 V hasta 0.931 V transformando la bioenergía que contienen las aguas residuales de origen: doméstico, pluviales y de criaderos de peces, y que los voltajes más altos generados fueron cuando utilizó el agua residual de criadero de peces. Este estudio corrobora que existe un potencial energético en las aguas residuales y causa gran interés saber más y profundizar la ciencia en este campo.

### **Dimensiones de la generación de energía electroquímica**

Generación de energía eléctrica: Es una forma de energía resultante que se origina por la diferencia de potencial eléctrico (voltaje), la cual desarrolla el movimiento o flujo de electrones (corriente eléctrica) en un circuito, sistema o máquina. La energía eléctrica se mide en kilovatio-hora (kWh), Watt-hora (Wh), miliWatt-hora (mWh), esta energía puede ser transformada en luz, sonido, fuerza mecánica, calor, tracción, movimiento etc.

### **Indicador**

Para la presente investigación las variables materia de medición, análisis, cálculos y discusión son:

- Potencial eléctrico: Es el voltaje que generan los Prototipos en estudio. Se expresa en Unidades de voltaje, Voltios (V).
- Corriente eléctrica: Es la corriente eléctrica obtenida a partir del potencial eléctrico de los Prototipos en estudio. Se expresa en Unidades de corriente eléctrica, miliAmperios (mA) o microamperios ( $\mu$ A).
- Energía eléctrica: Para la presente investigación, se expresará en miliWatt-hora (mWh)

## **Conceptualización de Aguas Grises Domésticas**

En particular, las aguas grises (Grey Water - GW), son las aguas residuales sin ningún aporte de los inodoros y cocinas, las cuales pueden ser una fuente alternativa rentable de agua (Christova et al., 1996). Por otro lado, la Organización Mundial de Salud – OMS, la conceptualiza como aguas de tipo residuales de la cocina, el baño y la lavandería, excluidas las aguas residuales de los inodoros. (Castillo & Chimbo, 2021)

## **Estado del arte de Aguas Residuales y Aguas Grises Domésticas**

Castillo & Chimbo (2021) en su artículo de investigación *Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (Eisenia foetida) en aguas residuales domésticas para zonas rurales*, presenta un diseño de lombrifiltros basado en el sistema de tratamiento creado por el Dr. Tohá, en el cual empleó aserrín, Eisenia foetida, carbón activado, grava y piedras de río. Asimismo, explica realizó la evaluación de la concentración de materia orgánica del afluente y en base a resultados de su investigación concluye que el uso de lombrifiltros para remover materia orgánica de aguas residuales es ecológico, novedoso, económico, eficiente y no afecta al medio ambiente.

Respecto del lombrifiltro Ramón et al. (2015) en el estudio denominado: *Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie Eisenia foetida*, explican que construyeron un lombrifiltro con el que obtuvieron agua tratada con baja carga orgánica dentro de los parámetros que establece la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA en Colombia.

Meléndez et al. (2019) en el artículo *Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: aceptación social y análisis financiero*. Un caso en Portugal publicado en la Revista UIS Ingenierías expone que previa aceptación de los residentes de una edificación de vivienda multifamiliar en Portugal, procedieron al reúso de aguas grises de la ducha, lavamanos y bidé, en la descarga de inodoros y riego de jardines, en el que el sistema propuesto consideró reactores biológicos de membrana con un período de retorno de 24 años demostrando su viabilidad, entre los beneficios de este planteamiento resalta la reducción del consumo anual de agua en aproximadamente 1/3, cumpliendo estándares de calidad para el reúso y utilizando eficientemente un recurso tanpreciado como es el agua.

Al-Ghazawi et al. (2018) en su investigación titulada *Ablution gray water qualitative assessment and treatment by submerged membrane bioreactor: a case study in Jordan*: Explica que en la Universidad de Jordania JUST se empleó un reactor de membrana y procedimientos de ultrafiltración para el tratamiento del aguas grises residuales de ablución de la mezquita en JUST durante 33 días, (La ablución es un rito ceremonial de alguna religiones, en la cual se utiliza agua) logrando la remoción de oxígeno, DBO5, turbidez, sólidos suspendidos, nutrientes, amonio, nitrato, fósforo y bacteria escherichia coli. Habiendo evaluado el efluente producido indica que alcanzaron excelente calidad y cumplimiento de estándares. Concluyendo que tratándose de zonas desérticas el tratamiento de las aguas de ablución es una importante alternativa para la reutilización de agua.

En el estudio denominado *Sistema de Tratamiento para las Aguas Residuales en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara*, Floramis et al. (2016) evaluó las condiciones de operación y de seguridad de los sistemas de tratamiento biológico para las aguas

residuales en los centros de cría porcina y avícola en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara y concluye, entre otros, que con el tratamiento de aguas residuales de los centros mencionados, disminuyó los riesgos biológicos, evitando la contaminación y realizó la eliminación adecuada de efluentes en terrenos cultivables aumentando la producción.

Ghaitidak & Yadav (2016) en el *Journal of Water Reuse and Desalination*, publicó el artículo: *Greywater treatment for reuse: comparison of reuse options using analytic hierarchy process* en el que describe que, entre otros, evaluó cuatro alternativas para el tratamiento de aguas grises de un albergue para estudiantes ubicado en el Instituto Nacional de Tecnología Sardar Vallabhbhai (SVNIT), Surat, empleando el proceso de jerarquía analítica comparó la calidad del efluente producido y la efectividad en eliminación de parámetros, con los resultados estableció el siguiente orden de prelación:

Filtración de arena en 2 etapas

Coagulación con alumbre

Coagulación con cloruro de polialuminio

Coagulación con cloruro férrico

En las Tablas 1 y 2 se muestra un resumen la literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas. Como se podrá observar ninguno de los sistemas en estudio son iguales al de la presente tesis.

**Tabla 1**

*Literatura existente relacionada a generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas*

Ítem	Sistema en estudio*	Título	Autor(a)	Tipo de documento	Año	Fuente
1	Biorreactores de membrana	Biorreactores de membrana para aguas grises tratamiento: una revisión crítica	Ceconet	Artículo científico	2019	<a href="https://www.researchgate.net/publication/331288410">https://www.researchgate.net/publication/331288410</a>
2	Filtración por arena /cloración y desinfección UV	Tratamiento y reutilización potencial de aguas grises de escuelas: un estudio piloto	Abdalahman D. Alsulaili	Artículo científico	2017	<a href="https://doi.org/10.2166/wst.2017.088">https://doi.org/10.2166/wst.2017.088</a>
3	Celda de combustible microbiana	Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana	Sánchez, M., Fernández, L., & Zevallos, I., & Espinoza-Montero, P.	Artículo científico	2021	<a href="https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10">https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10</a>
4	Celda Galvánica	Clarificación de agua con generación de energía eléctrica en una celda galvánica AL-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Alfonso Moreno Freddy Leonard	Artículo científico	2019	<a href="https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5106">https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5106</a>
5	Celda de combustible microbiana	Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizadas celdas de combustión microbiana (MFC) en la ciudad de Huancavelica	Ccora Braulio, Alvarez Adiel, Toribio Fernando	Artículo científico	2021	DOI: 10.21142/SS-0102-2020-018
6	Reacción de electrolisis	Las reacciones electroquímicas y su importancia en el futuro del suministro de energía	Bustamante Pesantes Katherine Elizabeth	Artículo científico	2020	<a href="http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i4.1457">http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i4.1457</a>
7	Sistema hidrosanitario	Reutilización de aguas grises domesticas para el uso eficiente del recurso hídrico: aceptación social y análisis financiero	Melendez Perez Julisse Andrea	Artículo científico	2019	DOI: <a href="https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019020">https://doi.org/10.18273/revuin.v18n1-2019020</a>
8	Lombrifiltros	Eficiencia en la remoción de material orgánico lombrifiltros (Eisenia foetida) en aguas residuales domesticas para zonas rurales	Castillo Sanchez Jonatham Gustavo	Artículo científico	2021	<a href="https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746">https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746</a>
9	Medio biodigestor	Sistema de tratamiento para las aguas residuales en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Villa Clara	Perez Martin Floramis, Armenteros Ordoñez, Tayruma	Artículo científico	2021	<a href="http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2223-48612016000200007&amp;lng=es&amp;tlng=es">http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S2223-48612016000200007&amp;lng=es&amp;tlng=es</a>
10	Filtración de arena	Tratamiento de aguas grises para su reutilización: comparación de opciones de reutilización mediante el proceso de jerarquía analítica.	Dilip M. Ghaitidak, Kunwar D. Yadav	Artículo científico	2016	doi: <a href="https://doi.org/10.2166/wrd.2015.177">https://doi.org/10.2166/wrd.2015.177</a>
11	Las abluciones de aguas grises por biorreactor de membrana sumergida	Ablution Grey Water Qualitative Assessment and Treatment by Submerged Membrane Bioreactor: a Case Study in Jordan	Al-Ghazawi, Ziad & Qasaimeh, Ahmad & Bani-Melhem, Khalid	Artículo científico	2018	<a href="http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2018.22790">http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2018.22790</a>

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2**

*Resultados de la búsqueda de literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas*

AÑOS	BASES DE DATOS						
	ACM	IEEE	ELSVIER	WEB OF SCIENCE	SCOPUS	SCIENCE DIRECT	SPRINGER
2021	0	1	1	1	0	1	0
2020	0	0	0	1	0	0	0
2019	0	0	0	1	0	1	<a href="#">1</a>
2018	0	0	0	1	0	0	0
2017	0	0	0	<a href="#">1</a>	0	0	0
2016	0	1	0	1	0	0	0
TOTALES	0	2	1	6	0	2	1

Fuente: Elaboración propia

### 1.5. Justificación de la investigación

Las pilas, baterías y acumuladores al ser desechadas inadecuadamente o sin ningún protocolo, se convierten en residuos sólidos contaminantes, en la actualidad los volúmenes a nivel mundial de estos desechos son impresionantes. Por tanto, estos residuos son potencialmente peligrosos para la salud humana y para el medio ambiente ya que contienen en su mayoría metales pesados.

En este contexto, el presente estudio de investigación explora y busca una fuente alternativa que permita la generación de energía eléctrica con tecnologías que causen menor impacto al medio ambiente y la salud humana.

A diferencia de las pilas, baterías y acumuladores actualmente utilizados en todos los países y latitudes, en la generación de energía electroquímica reutilizando aguas grises domésticas no se utilizan como insumos ningún metal pesado como cadmio, mercurio, plomo o metales como el litio, asimismo el electrolito no es ácido sulfúrico o ácidos de gran poder destructivo y altamente contaminantes. Ver Figura 7.

### Figura 7

*Deshechos de pilas y baterías.*



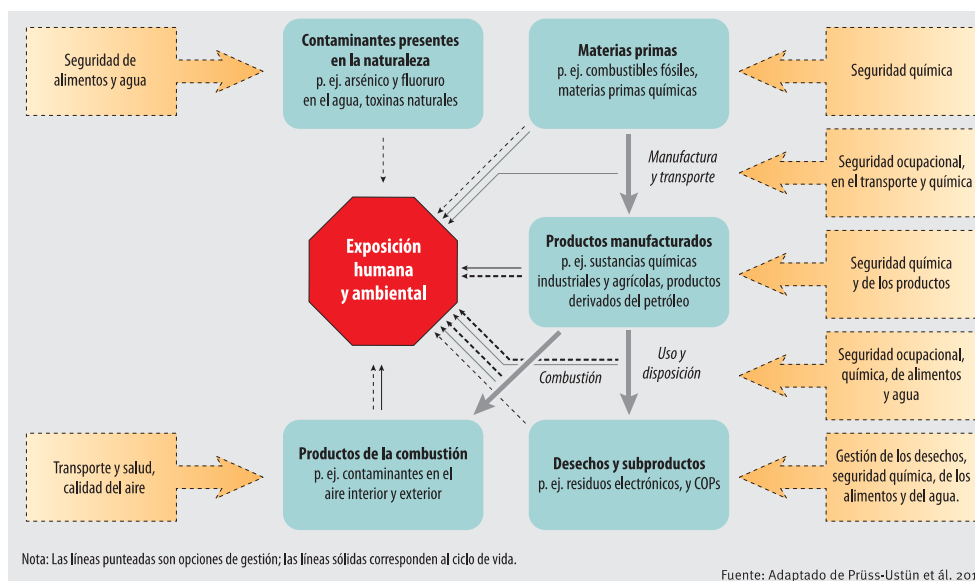
Fuente: Infobae. Foto: Fernando Calzada/DEF.

Para el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en su publicación *Geo 5 Perspectivas del Medio Ambiente Mundial - Medio Ambiente para el futuro que queremos*, da cuenta del vínculo entre la pobreza y los riesgos de exposición y contaminación por sustancias químicas y deshechos electrónicos. Asimismo, que el riesgo de exposición humana y ambiental proviene de contaminantes producto de la combustión, de productos

manufacturados, desechos y residuos electrónicos, y contaminantes de origen natural y los niños son más vulnerables por la mayor proporción sobre su masa corporal y por encontrarse en etapa de desarrollo y crecimiento (PNUMA, GEO-5, 2012). Ver Figura 8.

### Figura 8

#### *Análisis del ciclo de vida de las sustancias químicas*



Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente GEO5 - 2012

En el informe titulado *“El desarrollo sostenible en la práctica la aplicación de un enfoque integrado en América Latina y el Caribe”* PNUMA (2016), revela que en Latinoamérica, menos del 15% de todo el volumen de productos reciclables, se reciclan y esta labor la realizan alrededor de 4´000,000 de personas informales, en condiciones de alto riesgo para su salud por la falta de protocolos, medidas sanitarias y de protección adecuadas y se podría considerarlos excluidos sociales.

### 1.6. Limitaciones de la investigación

- Mediante esta técnica, se ha logrado generar energía eléctrica en forma de corriente continua.

- Los niveles de voltaje alcanzados son bajos, entre 0.70 V y 0.96 V, por tanto, para incrementarlos, se aplicó las Leyes de Kirchoff gradualmente, mediante la conexión de celdas en serie y de esta manera de ha logrado elevar los niveles de generación de electricidad en términos de los parámetros tensión, hasta valores significativos entre 5.10 y 5.32 Voltios.
- La duración, como en todo proceso redox tiene sus limitaciones, sin embargo, este tema es materia de continuar la investigación para que mediante los parámetros convenientes se pueda maximizar el período de utilidad. Además, en el escenario de la situación actual del medio ambiente, permanentemente estamos observando nuevas propuestas como la presente investigación que se justifica dado que se busca reorientar, innovar, cambiar la generación de electricidad en base a los principios de cuidado ecológico y de protección ambiental.

## 1.7. Objetivos

### - **Objetivo general**

Generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.

### - **Objetivos específicos**

OE1: Determinar cuál es la literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.

OE2: Diseñar y construir un Prototipo, para generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.

OE3: Determinar los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas.

## 1.8. Hipótesis

**Hipótesis de investigación:** Reutilizando aguas grises domésticas, en un diseño Prototipo, se genera energía electroquímica.

Hipótesis de investigación: La energía generada  $H_i$  es mayor a Cero

Hipótesis nula : La energía generada  $H_o$  es igual a Cero

Si la energía generada  $H_i > 0$  entonces la hipótesis de investigación es verdadera y la hipótesis nula es falso.

Si la energía generada  $H_o = 0$  entonces la hipótesis nula es verdadera y la hipótesis de investigación es falso.

### Hipótesis Específicas

- a) Con un Prototipo de celda galvánica, especialmente diseñado y construido, se demuestra que reutilizando aguas grises domésticas se genera energía electroquímica.
- b) Mediante pruebas experimentales, se determina los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas.

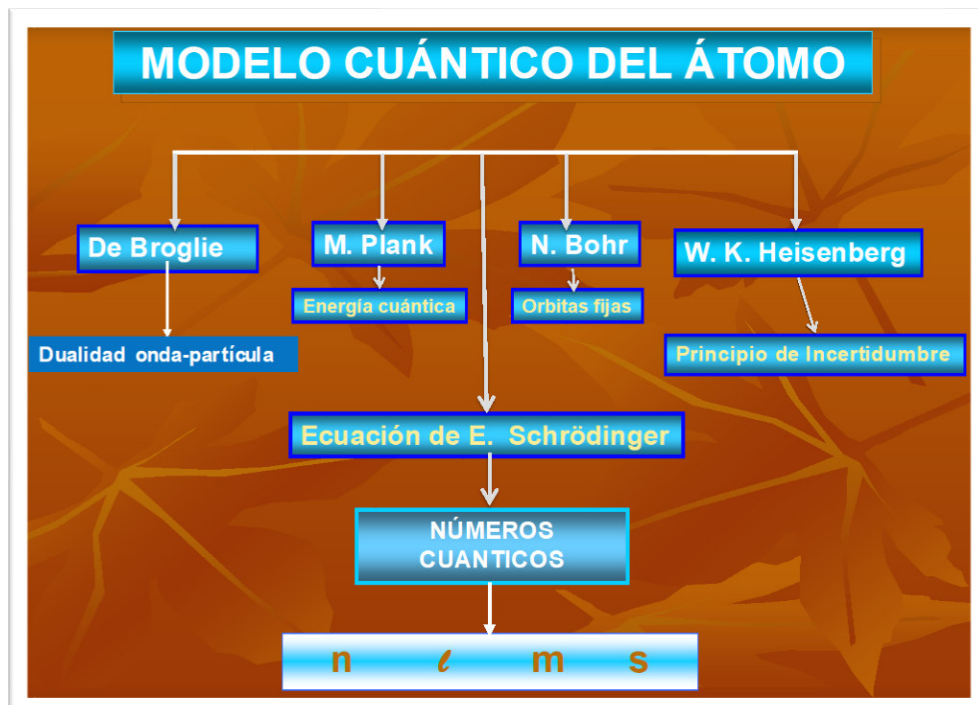
## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Marco conceptual

Átomo es una palabra de origen griego, significa indivisible. En efecto, en los albores de la ciencia se creyó que el átomo era indivisible, hasta que en 1897 J.J. Johnson Thompson, supuso y luego demostró que no solo el átomo no es indivisible sino, que, además, tiene componentes subatómicos (Ashleigh, 2012). Ver Figura 9.

**Figura 9**

*Modelo Cuántico del átomo.*



Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México – Facultad de Estudios Superiores Iztacala.

Históricamente tenemos los modelos o teorías atómicas de:

- ✓ John Dalton (1766 -1844).
- ✓ Modelo atómico de J.J. Johnson Thompson (1856 -1940)
- ✓ Modelo atómico de Rutherford (1871 -1937)
- ✓ Modelo atómico de Niels Bohr (1885 -1962)
- ✓ Modelo atómico de Sommerfeld (1868-1951)
- ✓ Modelo atómico Schrödinger y Heisemberg
- ✓ Modelo atómico de Chadwick (1932) es el más reciente.

En la línea de tiempo tenemos la física clásica y la física cuántica, Silvera (1999) en su libro *Física Cuántica* revela que un hito importante ocurre en 1897, al estar investigando los rayos catódicos se descubrió el electrón y se pudo realizar la medición de la interacción entre su carga y su masa, quedando demostrado de esta manera que dichas partículas infinitamente pequeñas eran electrones.

En la ciencia no existe la casualidad sino más bien la causalidad, si nos remitimos a la Primera Ley de Faraday encontramos que expresa: La masa  $M$  de sustancia que se desprende en un electrodo es directamente proporcional a la carga eléctrica  $Q$  que transita a través de un electrólito si es que, a través de éste, se hace pasar durante un tiempo  $t$  una corriente continua de intensidad  $I$  (Avila, 2021).

La Segunda ley de Faraday podemos interpretarla de esta forma: Para cierta cantidad de carga eléctrica, existe proporción directa entre la masa que se dirige a un electrodo y el peso equivalente del elemento químicos. (Avila, 2021).

Por otro lado, con respecto de la Teoría de la disociación electrolítica: El pionero fue Svante August Arrhenius fisicoquímico sueco, nacido en Wijk cerca de Upsala en 1859, profesor y administrador de la Universidad de Estocolmo 1891-1905; director del Instituto Nobel para la Fisicoquímica 1905-1927. En 1903 ganó el premio Nobel de Química por su teoría de la disociación electrolítica, que es en la actualidad, la base teórica del comportamiento de los electrolitos donde plantea que al disolverse las sustancias o al fundirse, quiebran su estructura molecular que es neutra eléctricamente y pueden liberar iones. Los iones liberados pueden trasladar carga eléctrica en las disoluciones y en los electrolitos fundidos. Aquellos con carga negativa, los aniones, son atraídos por el electrodo positivo denominado ánodo y los iones con carga positiva, cationes, son atraídos por el electrodo negativo denominado cátodo. De tal modo es el proceso donde la carga total de los iones positivos es igual a la carga total sobre los iones negativos, a lo que le denomina Principio de electro-neutralidad.

Al igual que en el diseño de las edificaciones, en ingeniería, en economía y en diversas disciplinas e incluso en el quehacer cotidiano usamos alguna base, punto de referencia, nivel cero o por ejemplo bench mark en topografía, en el comportamiento electroquímico de los diversos materiales, se ha hecho necesario tener un potencial de reducción, el cual se basa en el potencial de un electrodo de referencia de hidrógeno, en condiciones normales o estándar: a  $25\text{ }^{\circ}\text{C} / 298.15\text{ K}$ ,  $1\text{ atm} / 100\text{ kPa}$  y en solución acuosa de 1 molar de concentración.

Los potenciales estándar de reducción a  $25^{\circ}\text{C}$ , para diferentes materiales se expresan en Voltios. Por lo tanto, en base a este fundamento teórico seleccionaremos los materiales para el diseño de una celda galvánica, en la cual desarrollaremos experimentos de generación eléctrica a partir de semirreacciones químicas (Raymond, 2002). Ver Figura 10.

Figura 10

Potenciales estándar de reducción a 25° C

Semirreacción	E°(V)
$F_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2F^-(ac)$	+2.87
$O_3(g) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow O_2(g) + H_2O$	+2.07
$Co^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow Co^{2+}(ac)$	+1.82
$H_2O_2(ac) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.77
$PbO_2(s) + 4H^+(ac) + SO_4^{2-}(ac) + 2e^- \longrightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O$	+1.70
$Ce^{4+}(ac) + e^- \longrightarrow Ce^{3+}(ac)$	+1.61
$MnO_4^-(ac) + 8H^+(ac) + 5e^- \longrightarrow Mn^{2+}(ac) + 4H_2O$	+1.51
$Au^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Au(s)$	+1.50
$Cl_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2Cl^-(ac)$	+1.36
$Cr_2O_7^{2-}(ac) + 14H^+(ac) + 6e^- \longrightarrow 2Cr^{3+}(ac) + 7H_2O$	+1.33
$MnO_2(s) + 4H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow Mn^{2+}(ac) + 2H_2O$	+1.23
$O_2(g) + 4H^+(ac) + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.23
$Br_2(l) + 2e^- \longrightarrow 2Br^-(ac)$	+1.07
$NO_3^-(ac) + 4H^+(ac) + 3e^- \longrightarrow NO(g) + 2H_2O$	+0.96
$2Hg_2^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Hg_2^{2+}(ac)$	+0.92
$Hg_2^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow 2Hg(l)$	+0.85
$Ag^+(ac) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	+0.80
$Fe^{3+}(ac) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(ac)$	+0.77
$O_2(g) + 2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow H_2O_2(ac)$	+0.68
$MnO_4^-(ac) + 2H_2O + 3e^- \longrightarrow MnO_2(s) + 4OH^-(ac)$	+0.59
$I_2(s) + 2e^- \longrightarrow 2I^-(ac)$	+0.53
$O_2(g) + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-(ac)$	+0.40
$Cu^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Cu(s)$	+0.34
$AgCl(s) + e^- \longrightarrow Ag(s) + Cl^-(ac)$	+0.22
$SO_4^{2-}(ac) + 4H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow SO_2(g) + 2H_2O$	+0.20
$Cu^+(ac) + e^- \longrightarrow Cu(s)$	+0.15
$Sn^{4+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sn^{2+}(ac)$	+0.13
$2H^+(ac) + 2e^- \longrightarrow H_2(g)$	0.00
$Pb^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Pb(s)$	-0.13
$Sn^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sn(s)$	-0.14
$Ni^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ni(s)$	-0.25
$Co^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Co(s)$	-0.28
$PbSO_4(s) + 2e^- \longrightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}(ac)$	-0.31
$Cd^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Cd(s)$	-0.40
$Fe^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.44
$Cr^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Cr(s)$	-0.74
$Zn^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Zn(s)$	-0.76
$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(ac)$	-0.83
$Mn^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Mn(s)$	-1.18
$Al^{3+}(ac) + 3e^- \longrightarrow Al(s)$	-1.66
$Be^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Be(s)$	-1.85
$Mg^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Mg(s)$	-2.37
$Na^+(ac) + e^- \longrightarrow Na(s)$	-2.71
$Ca^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ca(s)$	-2.87
$Sr^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Sr(s)$	-2.89
$Ba^{2+}(ac) + 2e^- \longrightarrow Ba(s)$	-2.90
$K^+(ac) + e^- \longrightarrow K(s)$	-2.93
$Li^+(ac) + e^- \longrightarrow Li(s)$	-3.05

Fuerza creciente como agente oxidante

Fuerza creciente como agente reductor

\* Para todas las semirreacciones, la concentración es de 1 M para las especies disueltas, y la presión para los gases es de 1 atm. Éstos son los valores de estado estándar.

Fuente: Química Séptima Edición. McGraw Hill. (Raymond, 2002, p. 823).

De este modo si proyectamos el diseño de un prototipo de celda electroquímica, podríamos emplear múltiples tipos de material de los electrodos ánodo y cátodo, entre ambos podremos corroborar en la realidad la existencia o no de una diferencial de potencial y además podemos investigar con variados electrolitos como las residuales domésticas como electrolito, bajo el principio de las celdas electroquímicas.

Celda electroquímica es un dispositivo dispuesto de tal manera que permite el desarrollo controlado de un proceso de oxidación o de reducción. La celda electroquímica en general, es compuesta por dos electrodos, en una solución denominada electrolito.

Se denomina celda galvánica cuando la celda genera corriente eléctrica que fluye entre los electrodos que, conectados a un circuito eléctrico exterior, la diferencia de potencial existente entre los electrodos depende del electrolito y el material de los electrodos. Se denomina celda electrolítica cuando requiere aplicarle un voltaje externo para desarrollar un proceso denominado electrólisis dentro de la celda, donde el voltaje exterior a la celda causa la circulación de corriente a través de los electrodos y del electrolito, lo cual deviene en una reacción química, al interior de la celda, funcionando de modo contrario al funcionamiento de las celdas galvánicas. Para un mejor entendimiento de la clasificación de las celdas, del proceso de transformación de energía en su interior, de la función de los electrodos, cuando operan como cátodo o ánodo y que tipo de reacción se desarrolla de presenta el Tabla 3.

**Tabla 3**

*Celdas Electroquímicas, clasificación y funciones de sus componentes*

<b>Tipo de Celda</b>	Galvánica	Electrolítica
<b>Transformación</b>	De Energía química → A Energía eléctrica	De Energía eléctrica → A Energía química
<b>Electrodo positivo / Tipo de reacción química</b>	Cátodo	Ánodo
	Reducción	Oxidación
<b>Electrodo negativo / Tipo de reacción química</b>	Ánodo	Cátodo
	Oxidación	Reducción

Nota. - Tipos de celdas electroquímicas y cómo funcionan sus componentes.

A continuación, se detallan algunas definiciones de términos relacionados con del tema de la presente tesis:

**Aguas residuales domésticas:** Son las aguas que pasan a disposición en las instalaciones de alcantarillado de las viviendas. También se le denomina en inglés *waste water* la cual es el agua que se genera después de ser utilizada por el ser humano, a esta se le ha agregado una serie de contaminantes nocivos para la salud y el ambiente (Brown, 2004).

**Aguas grises domésticas –Grey Water GW:** Son las aguas residuales de origen doméstico, que provienen de los lavaderos, lavatorios o de la lavandería. No incluyen las aguas de los inodoros (Brown, 2004).

Anión: Ion que ha ganado electrones de tal modo que en el balance de cargas resulta negativo, al ocurrir este fenómeno se traslada con dirección al cátodo.

Agente oxidante: Es una sustancia causante de los procesos de oxidación de otra sustancia en una reacción redox, este agente participa en la reacción química como reductor y gana electrones.

Agente Reductor: Es una sustancia o elemento químico que ocasiona la reducción de otra especie o elemento en una reacción redox; es decir, el material pierde electrones se oxida.

Batería: Celdas electroquímicas, compuestas por electrodos y electrolito, conectadas entre sí y que a través de un circuito externo genera energía electroquímica. La batería es un dispositivo entrega carga eléctrica mediante una reacción química y es capaz de hacer circular corriente eléctrica continua en un circuito externo. Tenemos baterías de dos tipos:

- Primarios o No recargables; y
- Secundarios o Recargables.

Capacidad: Es la cantidad de carga que contiene un dispositivo de generación electroquímica (Pila, batería, acumulador y similares), a menudo expresada como mAh o Ah. La capacidad depende de las características, tamaño de la batería, su conformación y su química. La capacidad nominal también depende de la corriente utilizada, a mayor cantidad de corriente empleada menor tiempo de duración.

Carga Eléctrica: Es el dispositivo eléctrico, electrónico y aparato que disipa energía eléctrica suministrada en un circuito eléctrico, realizando algún tipo de trabajo o conversión de la electricidad en otra forma de energía.

Catión: Es un ion, con carga positiva. Esto puede ocurrir cuando un elemento pierde electrones.

Celda: Es una unidad de un dispositivo de generación de electricidad, que está compuesto por: un ánodo, un cátodo, electrodos o placas, electrolito, separador y colectores de corriente.

Conductor eléctrico: Es aquel material que brinda gran facilidad para el movimiento, circulación o transferencia de carga eléctrica en él. Para tal fin debe reunir ciertas características eléctricas.

Corriente eléctrica: Es el movimiento, circulación o transferencia de carga eléctrica ( $Q$ ) en determinado tiempo. Dicho movimiento, circulación o transferencia de carga eléctrica ocurre a consecuencia de la presencia de un potencial eléctrico ( $V$ ), de lo contrario no habrá corriente eléctrica. Teniendo en consideración como unidad de medición de las cargas eléctricas el Coulomb (C) y unidad de medición del tiempo el segundo (seg), entonces podemos expresar la corriente eléctrica como se indica en la Ecuación 1:

**Ecuación 1.** *Corriente en función de carga y tiempo.*

$$I = \frac{d(Q)}{d(t)} \dots\dots\dots (1)$$

Donde  $I$  es la corriente eléctrica en C/seg, pero  $1 \text{ C/seg} = 1 \text{ Amperio}$ , por lo tanto, la unidad de medición de  $I$  será en Amperios (A).

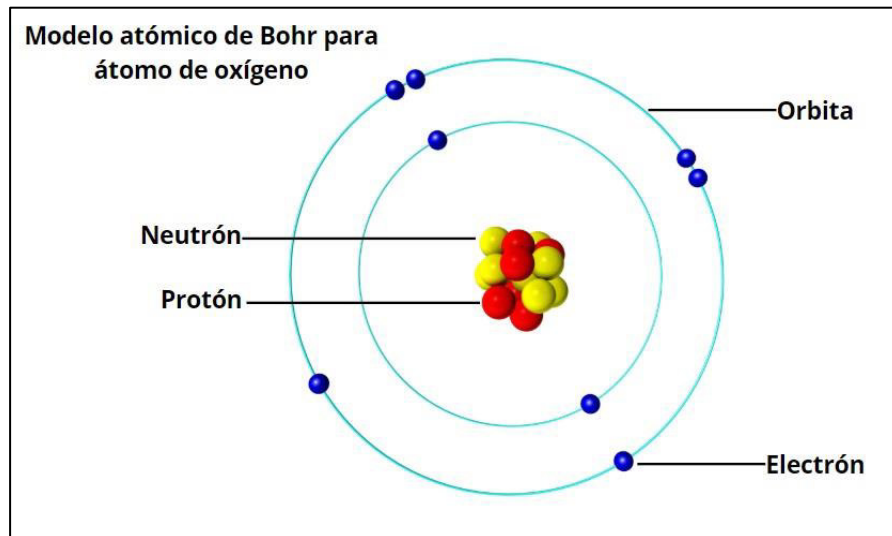
Energía: La energía es el resultado de la interacción de la materia en un fenómeno físico o químico. Una característica de la energía es su capacidad de producir movimiento, calor, frío, presión, reacción química, magnetismo, atracción, repulsión, sonido, electricidad durante un determinado tiempo y en un lugar, entre otras manifestaciones con diversas formas y efectos, a los que podemos denominar trabajo. Cuando la energía se manifiesta en forma de electricidad se le denomina energía eléctrica. A su vez esta manifestación puede ser en forma estática o en movimiento. Las ramas de la ciencia física, que estudian estas formas de manifestación son la electrostática y la electrodinámica.

Electricidad: La electricidad es el resultado de un fenómeno físico - químico, relacionado con la estructura molecular de la materia y se manifiesta a través de la carga eléctrica. Puede tener diversos orígenes: Cuando una carga eléctrica se encuentra en reposo produce fuerzas (Campo eléctrico - Electrostática) sobre otras situadas en su entorno. Si la carga se desplaza produce fuerzas magnéticas (Campo magnético - Electrodinámica). Cuando es producto de una reacción química redox es de origen electroquímico, siempre que la reacción química sea espontánea.

La electricidad en su forma más elemental está presente en la naturaleza, en el medio ambiente, en la materia, porque constituye parte de su estructura subatómica. La forma elemental es en la carga eléctrica de los electrones o protones y cuando los iones presentan carga negativa o positiva, al desplazarse lo hacen transportando carga eléctrica. En los metales, abundan electrones libres. En consecuencia, dicho material adquiere carga eléctrica. La Figura 11, nos muestra el modelo atómico de Bohr, el más empleado para ejemplificar la configuración de los átomos.

## Figura 11

*Modelo atómico de Daniels Bohr. Con 8 protones 8 neutrones y 8 electrones en 2 órbitas.*



Fuente: Lifeder (Zapata, 2021)

La energía eléctrica es la forma de energía que resulta del trabajo de una diferencia de potencial entre dos puntos, a la cual se le denomina fuente de voltaje o tensión eléctrica. Como producto de la presencia de tensión eléctrica al conectarse un circuito a dicha fuente de voltaje, se origina una corriente eléctrica entre ambos puntos, la misma que es capaz de producir trabajo en diversas formas: Calor, movimiento, emisión de luz, señales eléctricas y luminosas, que propiamente son la conversión de la electricidad en trabajo.

**Electroquímica:** Es una parte de la química que estudia los cambios producidos en la transferencia de energía eléctrica y química mediante reacciones químicas.

**Electrodo:** Es un elemento conductor de electricidad que forma parte de un circuito y entre cuyos extremos se establece una diferencia de potencial. A la vez es el elemento que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otro(s) electrodo(s), y la solución electrolítica al interior de la celda.

**Ion:** Materia cargada eléctricamente. Se le denomina catión cuando es positiva y anión en caso negativo, asimismo es neutro cuando el balance de cargas resulta cero.

**Materia:** El universo, las galaxias, los planetas, los astros, las estrellas y todos los cuerpos celestes y los materiales cualquiera sea su estado físico están compuestos por materia. Estamos rodeados de materia, incluso al interior nuestro los seres humanos y todo tipo de especies animales y vegetales, estamos formados por materia. Todos los cuerpos inorgánicos están conformados por materia. Según la Real Academia Española, materia se define como el escenario real en el espacio, perceptible por nuestros sentidos, son los objetos físicos palpables a nuestro alrededor y juntamente con la energía, forman el mundo material real. (RAE, 2021).

**Metales pesados:** Son los metales que están compuestos de elementos químicos con masa atómica mayor de 60, los cuales se caracterizan por producir efectos tóxicos en seres vivientes animales y vegetales.

**Oxidación:** Son las reacciones químicas donde un elemento, solución o compuesto cede electrones a otro elemento de carácter más electronegativo. Si se analiza la transferencia electrónica, la oxidación ocurre cuando hay pérdida de electrones en del elemento oxidado.

**Pila:** Es un dispositivo que genera energía eléctrica en una o varias celdas galvánicas acopladas y también como batería.

**Voltaje o potencial eléctrico:** Diferencia de potencial eléctrico entre dos electrodos. Medida del potencial eléctrico de origen electroquímico resultado de una reacción redox.

### III. MÉTODO

#### 3.1. Tipo de investigación

Tipo – Nivel: El presente trabajo de investigación es de tipo experimental, obtendremos datos empíricos, tomaremos conocimiento y analizaremos el fenómeno y sus características. Tratándose de un estudio empírico, emplearemos la observación, la experimentación y la medición de parámetros de funcionamiento de un Prototipo especialmente diseñado para ejecutar ensayos.

El presente trabajo conforme a sus propósitos y naturaleza se ubica en cuanto a su nivel en un estudio experimental cuantitativo. Las pautas a seguir, del método científico consisten en:

- Definir un problema.
- Desarrollar experimentos.
- Realizar observaciones del fenómeno en estudio y sus resultados ya sea cualitativos o cuantitativos.
- Reunir la data necesaria e interpretar y explicar el fenómeno sus efectos o causas.
- Formular una hipótesis.
- Validar la hipótesis.
- Si la hipótesis resiste varios experimentos, formular un enunciado, ley, teoría, conclusión o enunciado, lo cual puede tardar mucho tiempo, meses o años, lo cual grafica el trabajo de los científicos.

- Los experimentos científicos comprobados, deben ser reproducibles si los parámetros o procedimientos quedan establecidos.

### 3.2. Población y muestra

Para la presente investigación se diseñó y construyó un prototipo y nueve réplicas, de los cuales se eligieron 7 unidades para realizar las pruebas experimentales. El proceso para la fabricación del prototipo se describe a continuación:

- 3.2.1. **Diseño de ingeniería:** Determinación de las dimensiones preliminares, sobre la base de cajas de baterías recicladas. Dimensiones y forma de los electrodos, número de electrodos, dimensiones y forma de los separadores. Diseño preliminar en CAD. El diseño se realizó luego de un exhaustivo estudio del marco teórico y del potencial estándar de reducción a 25°C, que teoría es como se muestra en la Tabla 4:

**Tabla 4**

*Voltaje resultante de las semireacciones Redox*

SEMIREACCIÓN	E <sup>0</sup> (V)
$Cu^{2+}(ac) + 2e^{-} \rightarrow Cu(s)$	+ 0.34 V
$Zn^{2+}(ac) + 2e^{-} \rightarrow Zn(s)$	- (-0.76)V
<i>Total</i>	+ 1.1 V

Fuente: Elaboración propia

- 3.2.2. **Selección de materiales:** Las celdas electroquímicas se clasifican en 2 tipos: galvánicas y electrolíticas, de las cuales, para el diseño del Prototipo en estudio se ha empleado celdas galvánicas con electrodos de cobre y fierro galvanizado en razón a la capacidad de estos materiales originado por el potencial electrodo resultante y se elige aguas grises domésticas por tener un menor nivel de contaminación que las

aguas residuales de las redes públicas de alcantarillado. El propósito es lograr que, en las celdas a construir, se desarrolle una reacción química espontánea, capaz de transformar la energía química del proceso de oxidación y reducción directamente en energía eléctrica.

- 3.2.3. **Corte de electrodos:** Inicialmente se empezó realizando manualmente para lo cual se requieren 2 días de trabajo durante 8 horas por cada día, lo cual devino en imprecisiones y errores propias de las herramientas manuales de corte y el error humano, por lo que se optó por el corte en máquinas cortadoras de alta tecnología, las cuales emplean rayos láser, obteniendo alta precisión y rapidez de corte en menos de una hora.
- 3.2.4. **Impresión 3D de tapa y logo:** Este componente fue diseñado en CAD y luego se fabricó mediante impresora 3D.
- 3.2.5. **Acabados y ensamblaje:** Este procedimiento consistió en los acabados de las cajas recipientes contenedores, preparación y pintado con base imprimante especial para material PVC: Spray Plastic Primer Montana Colors Pro MTN transparente y acabado con pintura: Spray de baja presión Montana Colors 94 MTN color verde, montaje de los electrodos de cobre y fierro galvanizado con separación adecuada, colocación de los separadores aislantes, colocación de cableado y terminales eléctricos para entrega de energía eléctrica al exterior de las celdas.
- 3.2.6. **Pruebas de montaje:** Se verificó la aislación de los electrodos antes de su instalación dentro de las celdas y después de haberse instalado, de modo que se descartó la presencia de cortocircuitos o falsos contactos que originen fallas en la generación de energía eléctrica de origen electroquímico.
- 3.2.7. **Toma de aguas grises domésticas:** Se realizó cuidadosamente la recolección y toma de aguas grises procedentes del último enjuague de lavado de ropa una lavadora

doméstica, la cual fue vertida en las celdas de los 7 prototipos. La misma que reúne las propiedades físico – químicas que se detallan en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Análisis físico-químico y de metales totales del agua gris empleada para los experimentos*

<b>ENSAYO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>L.D.M.</b>	<b>L.C.M.</b>	<b>RESULTADOS</b>
Potencial de hidrógeno	Unid. pH	N.A.	0.01	7.07
Conductividad	µS/cm	N.A.	1	492
Turbidez	NTU	N.A.	0.01	2.95
Dureza Total	mg /L CaCO <sub>3</sub>	N.A.	5	226
Sulfato	mg SO <sub>4</sub> /L	1	2.5	131.7
Detergentes (SAAM)	mg /L	0.007	0.02	648.054
<b>ENSAYO METALES TOTALES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>L.D.M.</b>	<b>L.C.M.</b>	<b>RESULTADOS</b>
Plata, Ag	mg/L	0.002	0.007	<0.007
Aluminio, Al	mg/L	0.007	0.02	<0.02
Arsénico, As	mg/L	0.002	0.008	<0.008
Boro, B	mg/L	0.003	0.009	0.209
Bario, Ba	mg/L	0.0003	0.0009	0.0235
Berilio, Be	mg/L	0.0003	0.001	<0.001
Bismuto, Bi	mg/L	0.009	0.03	<0.03
Calcio, Ca	mg/L	0.002	0.008	70.176
Cadmio, Cd	mg/L	0.0001	0.0005	<0.0005
Cerio, Ce	mg/L	0.02	0.08	<0.08
Cobalto, Co	mg/L	0.003	0.009	<0.009
Cromo, Cr	mg/L	0.0003	0.0009	<0.0009
Cobre, Cu	mg/L	0.0004	0.0014	<0.0014
<b>ENSAYO METALES TOTALES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>L.D.M.</b>	<b>L.C.M.</b>	<b>RESULTADOS</b>
Hierro, Fe	mg/L	0.001	0.004	<0.004
Mercurio, Hg	mg/L	0.0001	0.0004	<0.0004

Potasio, K	mg/L	0.04	0.1	2.7
Litio, Li	mg/L	0.0004	0.0013	<0.0013
Magnesio, Mg	mg/L	0.005	0.02	7.86
Manganeso, Mn	mg/L	0.0001	0.0003	<0.0003
Molibdeno, Mo	mg/L	0.0006	0.002	<0.002
Sodio, Na	mg/L	0.004	0.01	11.81
Níquel, Ni	mg/L	0.0003	0.001	<0.001
Fósforo, P	mg/L	0.01	0.04	<0.04
Plomo, Pb	mg/L	0.002	0.006	<0.006
Antimonio, Sb	mg/L	0.002	0.006	<0.006
Selenio, Se	mg/L	0.001	0.005	<0.005
Sílice, SiO <sub>2</sub>	mg/L	0.001	0.004	10.5
Estaño, Sn	mg/L	0.001	0.003	<0.003
Estroncio, Sr	mg/L	0.00004	0.0001	0.5997
Titanio, Ti	mg/L	0.0009	0.003	<0.003
Talio, Tl	mg/L	0.0003	0.001	<0.001
Torio, Th	mg/L	0.003	0.009	<0.009
Uranio, U	mg/L	0.005	0.015	<0.015
Vanadio, V	mg/L	0.0002	0.0008	<0.0008
Zinc, Zn	mg/L	0.0001	0.0005	<0.0005

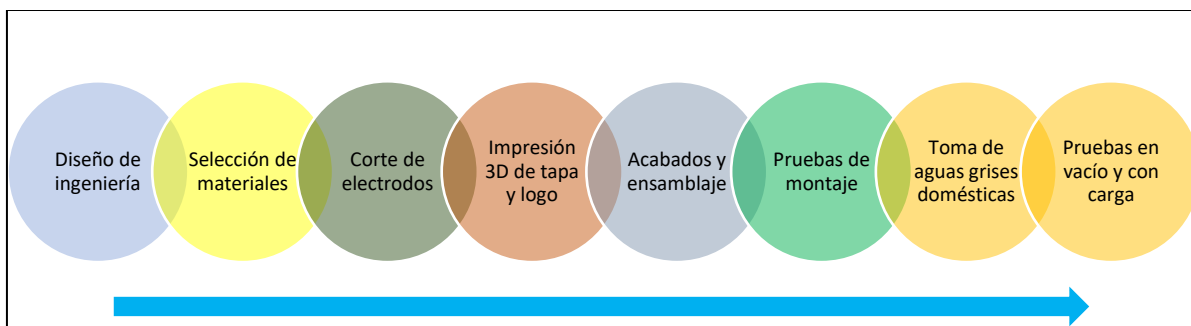
Fuente: Laboratorio de ensayo acreditado por INACAL

3.2.8. **Pruebas en vacío y con carga:** Son las pruebas finales, que se detallarán más adelante, con el objeto de demostrar la generación de energía eléctrica de origen electroquímico.

Los procedimientos descritos en los literales desde a) hasta g) antes mencionados detallados han sido realizados única y exclusivamente por el autor de la presente investigación, excepto el caso de la cortadora láser y la impresora 3D que son equipos de apoyo, de propiedad de terceros a los cuales se recurrió para lograr precisión y rapidez. Ver Figura 12.

## Figura 12

*Proceso de fabricación del prototipo.*



Fuente: Elaboración Propia.

En suma, las etapas de la presente investigación consistieron: Recopilación, sistematización, análisis de la información científica y técnica, el planeamiento, cálculos, diseño de ingeniería, especificaciones técnicas de los componentes, financiamiento, búsqueda, selección y adquisición de materiales, en las cuales el autor desplegó una labor extensa y durante varios años. Ver Figura 13.

## Figura 13

*Diseño de ingeniería, corte de los electrodos en equipo láser, fabricación de tapa en impresora 3D y ensamblaje de los prototipos.*



Fuente: Elaboración Propia.

La muestra que se empleó en la Investigación es conformada por un diseño modelo, prototipo y 6 réplicas seleccionadas, a los cuales denominaremos Prototipos,

numerados de 1 a 7, en los que se efectuaron pruebas: Cada Prueba consta de una o más mediciones eléctricas. El número de pruebas experimentales realizados es de 267 mediciones, estructuradas de la siguiente manera:

- 42 Pruebas por cada celda de cada Prototipo, cada 5 minutos.
- 70 Pruebas por cada Prototipo sin carga, cada 5 minutos.
- 70 Pruebas por cada Prototipo con carga eléctrica, cada 2 minutos. Para estas pruebas se emplearán led de distintos colores calificando el nivel de luminosidad de la siguiente forma:
  - 1 Led apagado - Nula luminosidad.
  - 2 Led encendido - Luminosidad baja.
  - 3 Led encendido - Luminosidad media.
  - 4 Led encendido - Luminosidad alta.
- 85 Pruebas de medición de capacidad del Prototipo 1, con carga eléctrica, durante 168 horas continuas de funcionamiento. La medición de corriente, y voltaje se efectuó en intervalos de 2 horas.

### **3.3. Operacionalización de variables**

En nuestro trabajo experimental, el Prototipo de celda galvánica tiene por objeto generar energía eléctrica, de acuerdo a nuestro marco teórico: como resultado de un proceso redox que depende de las características de la celda y de las características fisicoquímicas de las aguas grises residuales domésticas. Por lo tanto, la definición de las variables se enfoca en la dependencia de la energía eléctrica generada en celdas galvánicas, en función de los materiales que se emplean en el Prototipo.

- Caja recipiente, separadores y pernería

- Placas electrodos - Cátodo
- Placas electrodos - Ánodo; y
- El electrolito, que en este caso será agua gris residual doméstica.

### **Variables Independientes:**

Aguas grises domésticas – Electrolito.

- ✓ Volumen por cada celda:  $6.7\text{cm} \times 2\text{ cm} \times 8.5\text{ cm}$  (Altura útil) =  $113.9\text{ cm}^3$ .
- ✓ Volumen total por Prototipo =  $113.9 \times 6 = 714\text{ cm}^3$
- ✓ Composición química: Agua potable + agregados producto de procesos domésticos de lavado de manos y/o ropa.

Celda galvánica:

- ✓ Caja de plástico reciclado de baterías usadas de  $7\text{ cm} \times 13.2\text{ cm} \times 11\text{ cm}$ , con 6 espacios para celdas y tapa de plástico. Esta caja puede ser de cualquier otro material siempre que tenga características de: aislante eléctrico, impermeable, resistente a la humedad, resistente a temperaturas entre  $-10^\circ\text{C}$  y  $50^\circ\text{C}$ . Volumen útil aproximado =  $2.175\text{cm}^3$ .
- ✓ Separadores.
- ✓ Electrodo de cobre: Es el material del electrodo positivo (+).
- ✓ Electrodo de Hierro galvanizado: Es material del electrodo negativo (-).

Las dimensiones de ambos electrodos son:

Espesor =  $0.5\text{mm}$ , Área útil =  $43.5\text{ cm}^2$

Ver Figuras del 14 al 19.

**Figura 14**

*Caja de plástico, es material reciclado de baterías usadas.*

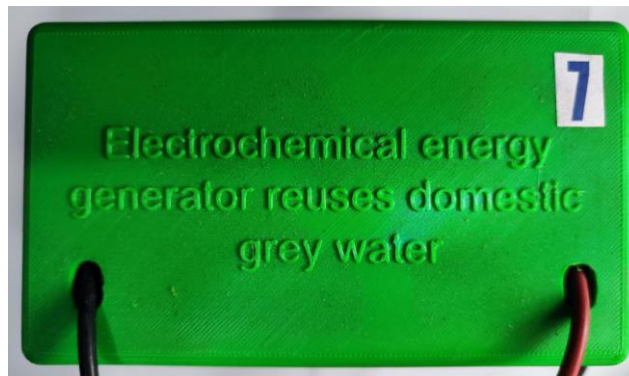


Obsérvese los seis espacios acondicionados para las celdas galvánicas.

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 15**

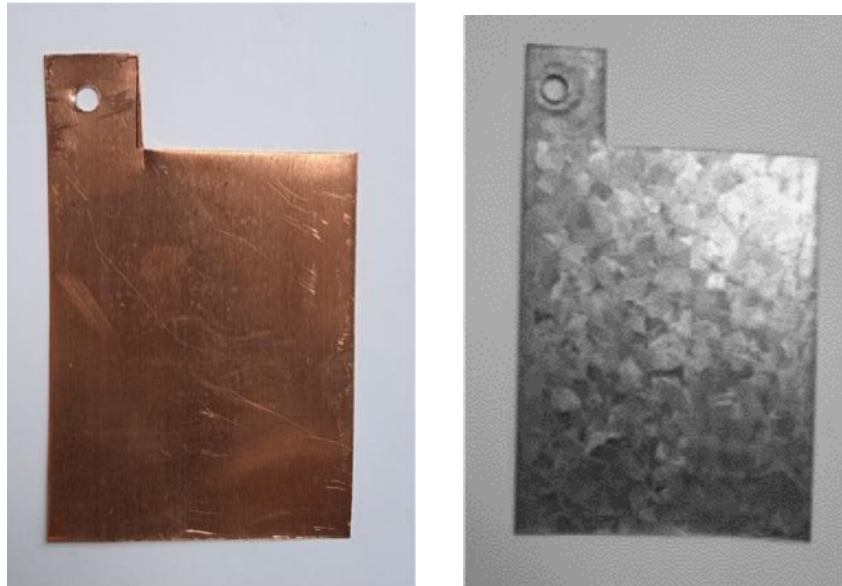
*Tapa del prototipo fabricada en impresora 3D*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 16**

*Placas de Cobre y de Fierro galvanizado. Empleadas en el diseño de los 7 Prototipos de celdas galvánicas.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 17**

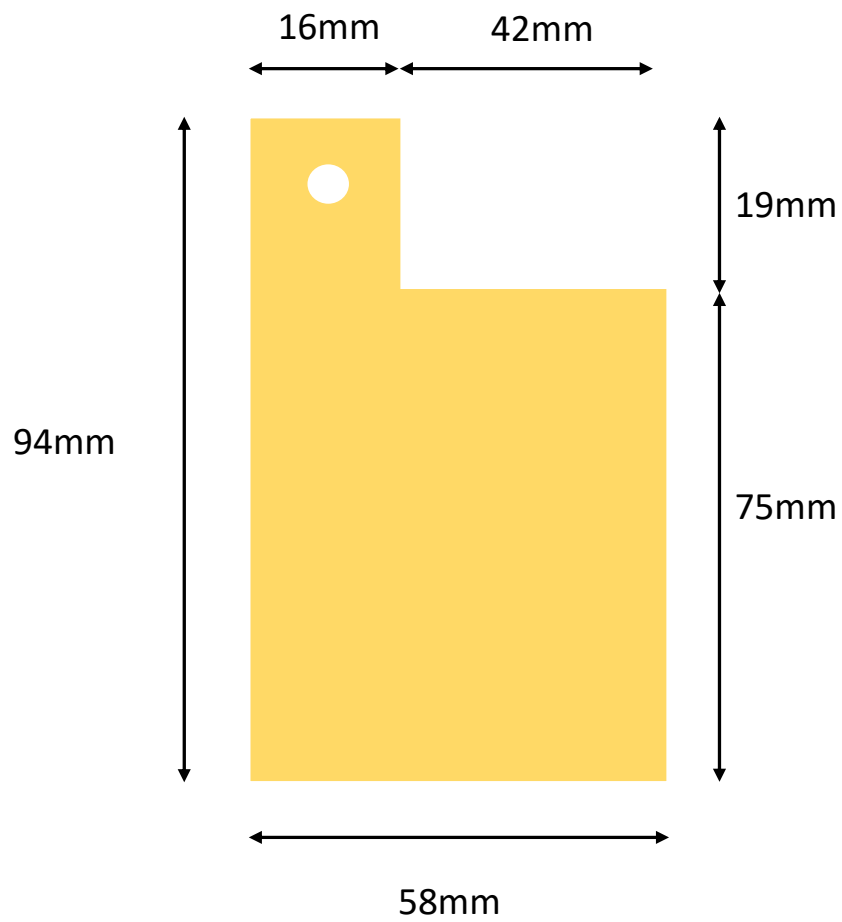
*Separadores para placas. Empleadas en el diseño de los 7 Prototipos de celdas galvánicas.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 18**

*Dimensiones de los electrodos de cobre y hierro galvanizado.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 19**

*Pernería para las conexiones y armado de las placas.*



Fuente: Elaboración Propia.

### Variable Dependiente:

Energía eléctrica: Es la manifestación de la energía en forma de electricidad, en nuestro estudio mediremos las variables voltaje, corriente y tiempo en base a los cuales calcularemos la energía del Prototipo en estudio. Se expresa en Unidades de energía, miliWatt-hora (mWh).

En la Tabla 6, se resume la operacionalización de las variables.

**Tabla 6**

#### *Operacionalización de las Variables*

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Potencial eléctrico generado.	Dependiente	Energía eléctrica generada entre los bornes de las celdas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energía eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>miliWatt-hora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multímetro</li> <li>Reloj</li> <li>Led para comprobar la presencia de energía generada</li> </ul>
Celda galvánica: Electrodos, separadores, caja	Independiente	Celda galvánica <ul style="list-style-type: none"> <li>Electrodos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material y Área del electrodo positivo</li> <li>Material y Área del electrodo negativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superficie cm<sup>2</sup></li> <li>Espesor en mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Calibrador</li> <li>Wincha métrica</li> </ul>
Electrolito: Aguas grises domésticas	Independiente	Electrolito: aguas grises <ul style="list-style-type: none"> <li>Volumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Litros o centímetros cúbicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lt, cm<sup>3</sup></li> <li>Características fisicoquímicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Medición y cálculo de volumen</li> <li>Análisis físico químico del agua gris</li> </ul>

Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4. Instrumentos

Los instrumentos que se utilizarán en la investigación serán las siguientes:

- Prototipo diseñado y construido de acuerdo con los parámetros de la variable independiente: Aguas grises – electrolito y celda galvánica.

- Medición de los indicadores correspondientes a la variable dependiente: Se realizará la medición de tensión y corriente resultante empleando un multímetro en los experimentos y pruebas.

A continuación, se muestran imágenes del diseño preliminar Prototipo experimental. Ver Figuras 20 al 24.

**Figura 20**

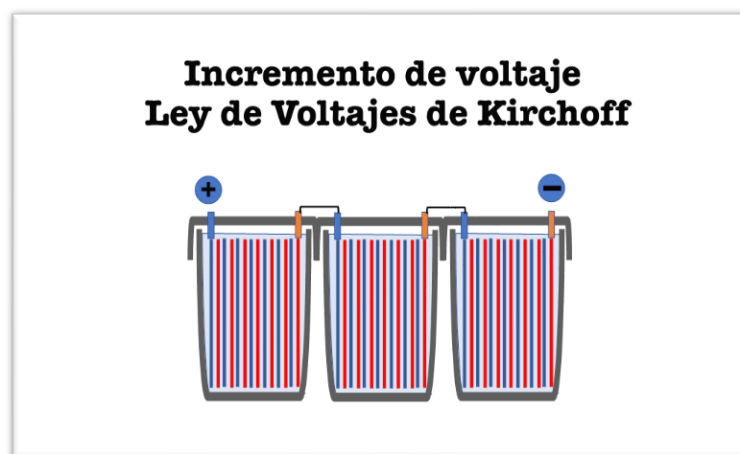
*Diseño preliminar del Prototipo de celdas galvánica, con aguas grises.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 21**

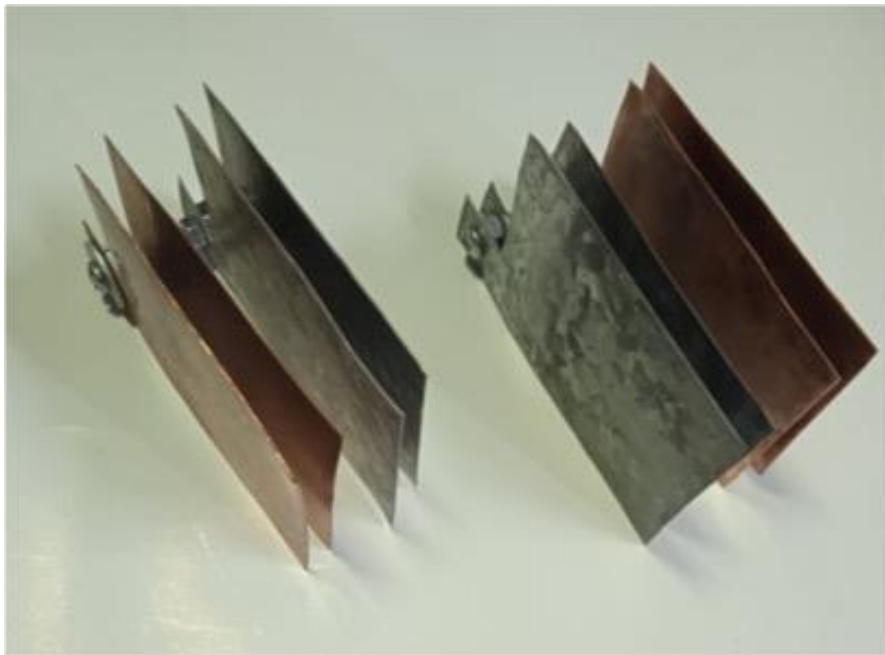
*Conexión básica para incremento de voltaje*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 22**

*Electrodos ensamblados para la generación.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 23**

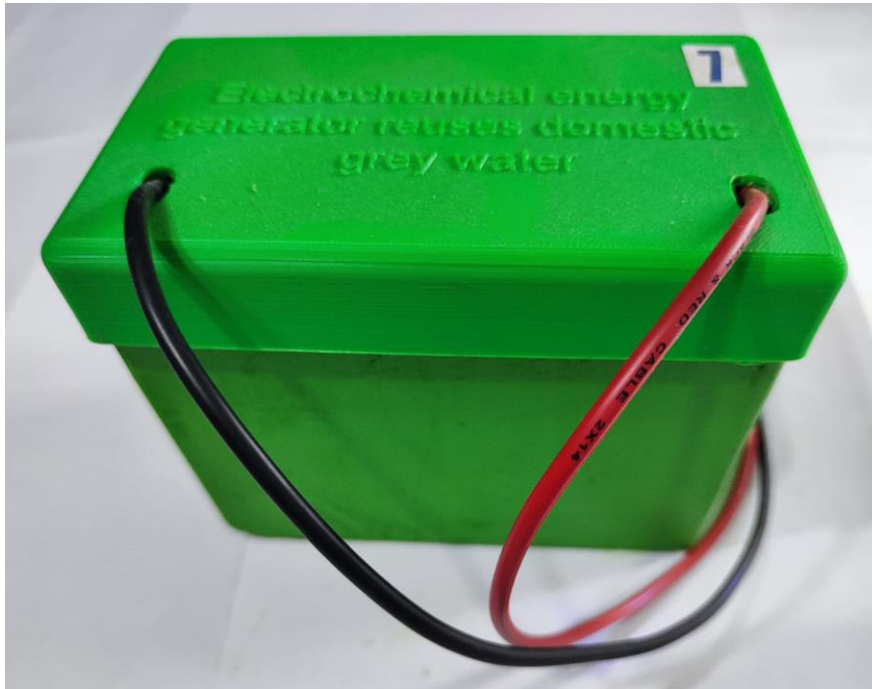
*Prototipo 1. En proceso de ensamblaje preliminar.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 24**

*Prototipo 7. Concluido y listo para para funcionar.*



Fuente: Elaboración Propia.

**3.5. Procedimientos****Técnicas de investigación**

La técnica que se utilizará para el diseño de la muestra a la cual llamaremos Prototipo será la de pruebas de medición de uno o más valores, la cual nos permitirá determinar los parámetros de la corroborar la hipótesis de investigación.

**Toma de información**

La información reunida en las mediciones será ingresada a una base de datos la misma que se procesará de acuerdo con las teorías respecto al funcionamiento de celdas

galvánicas, libros, normas y demás fuentes de información relacionadas con el tema en estudio.

### **Procesamiento y análisis de datos**

Se aplicarán medios informáticos, una metodología ordenada y las siguientes técnicas de procesamiento de datos:

#### **Ordenamiento y clasificación**

Se aplicará para tratar la información cualitativa y cuantitativa sobre los parámetros eléctricos resultantes de las pruebas.

#### **Registro manual**

Se aplicará para digitar la información de las diferentes pruebas a efectuar.

#### **Proceso computarizado con Excel**

Para determinar diversos cálculos matemáticos y estadísticos de utilidad sobre los resultados, se emplearán tablas Excel y fórmulas estadísticas.

### **3.6. Análisis de datos**

#### **Desviación estándar:**

La desviación estándar es la medida de la dispersión de valores respecto a la media (valor promedio). La desviación estándar hemos aplicado a los valores de voltaje, a fin

de conocer el grado de dispersión de los voltajes de generación obtenidos por cada celda y por cada Prototipo. Para el cálculo se utilizó la siguiente fórmula:

**Ecuación 2.** *Fórmula de la desviación estándar.*

$$\sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} \dots\dots\dots (2)$$

Donde  $\bar{x}$  es la media de muestra PROMEDIO (valor1, valor2) y  $n$  es el tamaño de la muestra.

### **Mediana**

La mediana es el número que se encuentra en medio de un conjunto de números.

### **Moda**

Es el valor que se repite o se produce con más frecuencia en una matriz o un rango de datos.

### **Promedio**

Es el promedio (media aritmética) de un grupo de valores.

### 3.7. Consideraciones éticas

Desde el punto de vista ético, la presente tesis presenta las siguientes consideraciones éticas de respeto y compromiso con cuidado y protección del medio ambiente, por las siguientes razones:

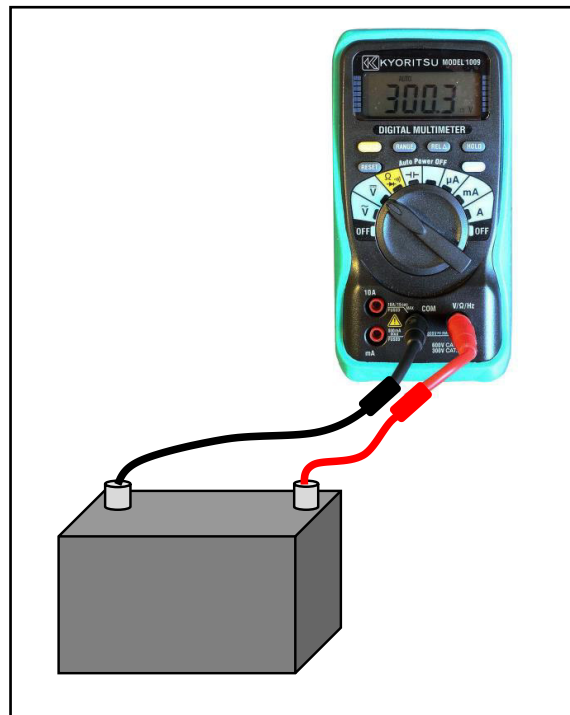
- 3.7.1. El presente estudio del fenómeno de generación de electricidad de fuente electroquímica se ha realizado utilizando materiales y componentes que no causan daño ambiental: Cobre, fierro galvanizado, aguas grises otros materiales no contaminantes del medio ambiente.
- 3.7.2. Se recicla componentes tal como la caja para las celdas galvánicas, lo cual es un aporte para reducir la contaminación por el uso de materiales plásticos y es un claro propósito de promover la economía circular en lugar de la economía tradicional lineal.
- 3.7.3. A diferencia de pilas y baterías comerciales de uso cotidiano en la actualidad, no empleamos metales pesados, ácidos corrosivos que requieren procedimientos de disposición especial y tratamiento como residuos electrónicos contaminantes del medio ambiente.

#### IV. RESULTADOS

Para reunir la data se han realizado experimentos en los cuales se ha observado cuidadosamente el fenómeno y se han realizado mediciones del potencial eléctrico generado o resultante. Para las mediciones se ha utilizado un multímetro, que cuenta con certificación de calibración vigente, en la Figura 25 se muestra la forma de conexión para la medición de voltaje.

**Figura 25**

*Mediciones de voltaje obtenidos en los Prototipos.*



Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, presentamos los resultados de las pruebas experimentales realizadas. Durante las pruebas se han realizado las mediciones de los valores de la variable dependiente potencial eléctrico medido en Voltios.

Para efectuar las pruebas se consideró:

- El Prototipo 1: es el primer modelo diseñado y construido.
- Los Prototipos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son réplicas del Prototipo 1, para verificar la reproducibilidad del experimento.

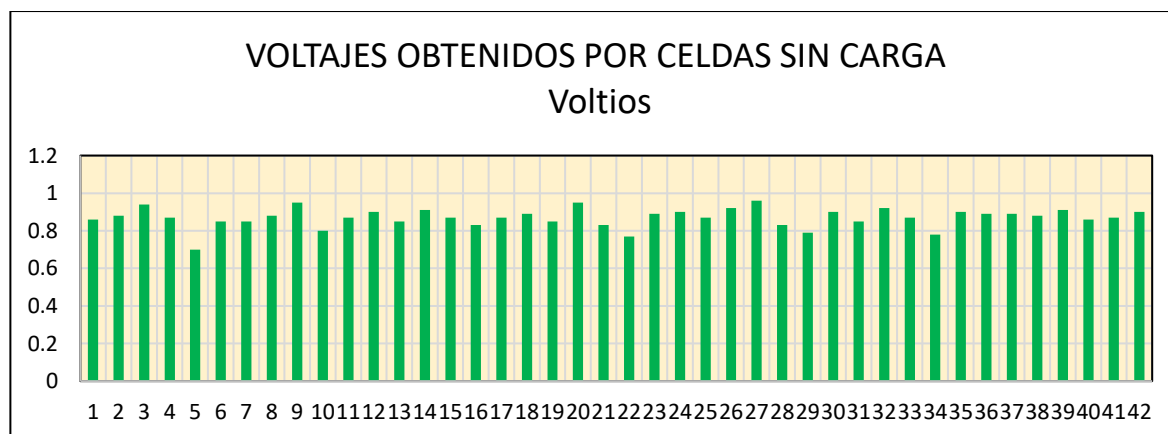
**Resultados de las mediciones de parámetros eléctricos de generación de energía electroquímica reutilizando aguas grises domesticas:** Luego de haber construido el Prototipo, se ha procedido a realizar las pruebas siguientes:

### Prueba 1 Voltaje de Celdas - Sin carga

Se ha realizado la medición del voltaje generado, sin carga, por cada celda. Se presenta el resumen en la Figura 26 y la Tabla 7 con los resultados.

**Figura 26**

*Resultados de la medición de voltajes obtenidos en cada celda. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 7**

*Datos estadísticos generales obtenidos por celda. Sin carga*

Máximo	Mínimo	Mediana	Moda	Valor promedio	Desviación estándar
0.96	0.7	0.87	0.87	0.8702	0.0508

Fuente: Elaboración Propia.

## **Prueba 2 Voltaje de Celdas por Prototipo - Sin carga**

Se presenta , por cada Prototipo, dos Tablas y una Figura indicando los resultados de la medición de voltaje por cada celda, indicando fecha, hora, N.º de Prototipo, los resultados estadísticos y foto del voltaje medido. Ver las Tablas del 8 al 21 y Figuras del 27 al 40.

**Tabla 8**

*Medición de voltajes en Prototipo 1 - Modelo. Sin carga*

PRUEBA N°	DIA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
1	Día 1	08:00	Sin carga	Prototipo 1	1	0.86
2	Día 1	08:05	Sin carga	Prototipo 1	2	0.88
3	Día 1	08:10	Sin carga	Prototipo 1	3	0.94
4	Día 1	08:15	Sin carga	Prototipo 1	4	0.87
5	Día 1	08:20	Sin carga	Prototipo 1	5	0.70
6	Día 1	08:25	Sin carga	Prototipo 1	6	0.85

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 9**

*Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 1. Sin carga*

Voltaje total	5.10
Máximo	0.94
Mínimo	0.70
Mediana	0.87
Valor promedio	0.8500
Desviación estándar	0.0800

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 27**

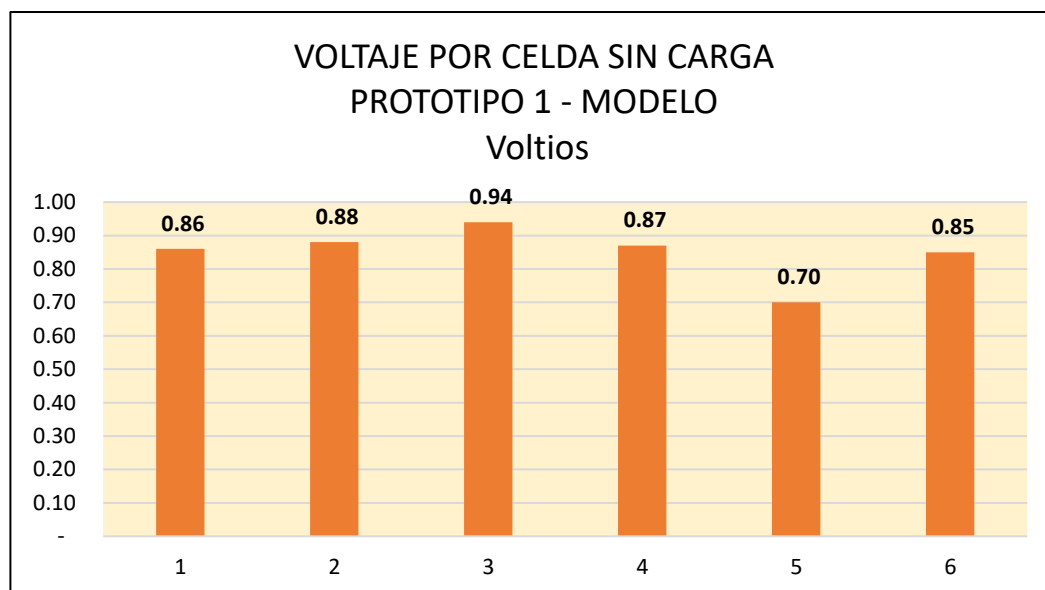
*Voltaje total obtenido en el Prototipo 1 - Modelo. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 28**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 1 - Modelo. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 10***Medición de voltajes en Prototipo 2. Sin carga*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
7	Día 1	09:00	Sin carga	Prototipo 2	1	0.85
8	Día 1	09:05	Sin carga	Prototipo 2	2	0.88
9	Día 1	09:10	Sin carga	Prototipo 2	3	0.95
10	Día 1	09:15	Sin carga	Prototipo 2	4	0.80
11	Día 1	09:20	Sin carga	Prototipo 2	5	0.87
12	Día 1	09:25	Sin carga	Prototipo 2	6	0.90

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 11***Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 2. Sin carga*

Voltaje total	5.25
Máximo	0.95
Mínimo	0.80
Mediana	0.88
Valor promedio	0.8750
Desviación estándar	0.0501

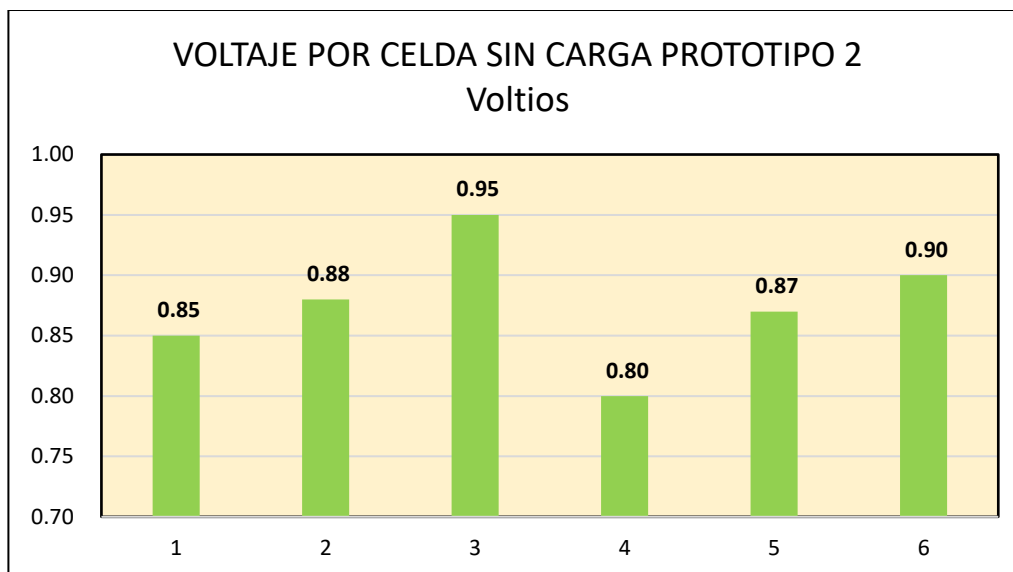
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 29***Voltaje total obtenido en el Prototipo 2. Sin carga.*

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 30**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 2. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 12**

*Medición de voltajes en Prototipo 3. Sin carga*

PRUEBA N°	DIA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
13	Día 1	10:00	Sin carga	Prototipo 3	1	0.85
14	Día 1	10:05	Sin carga	Prototipo 3	2	0.91
15	Día 1	10:10	Sin carga	Prototipo 3	3	0.87
16	Día 1	10:15	Sin carga	Prototipo 3	4	0.83
17	Día 1	10:20	Sin carga	Prototipo 3	5	0.87
18	Día 1	10:25	Sin carga	Prototipo 3	6	0.89

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 13**

*Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 3. Sin carga*

Voltaje total	5.22
Máximo	0.91
Mínimo	0.83
Mediana	0.87
Valor promedio	0.8700
Desviación estándar	0.0283

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 31**

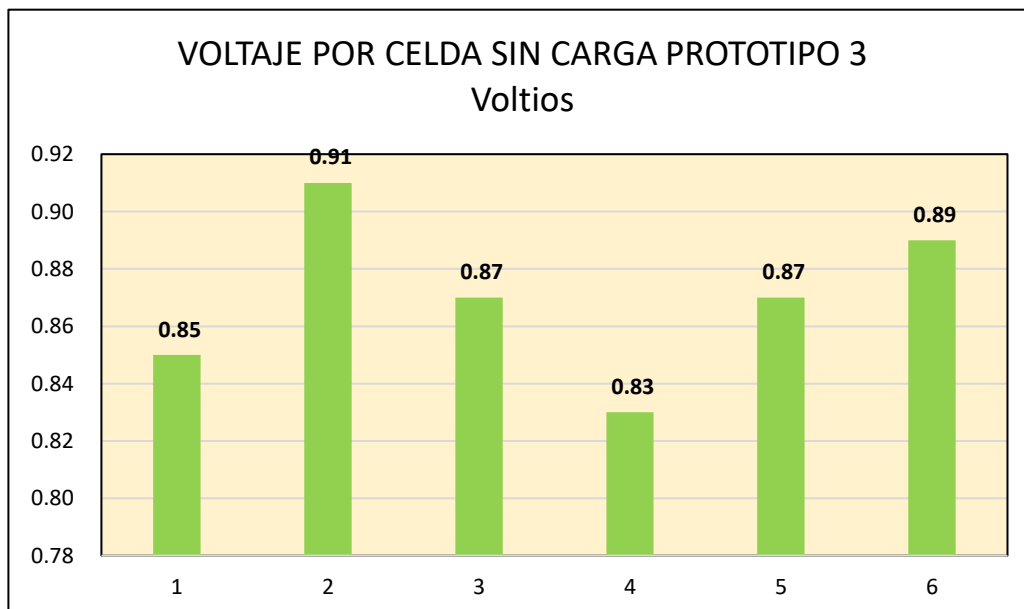
*Voltaje total obtenido en el Prototipo 3. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 32**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N°3. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 14**

*Medición de voltajes en Prototipo 4. Sin carga*

DIA DE PRUEBA	DIA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
19	Día 1	11:00	Sin carga	Prototipo 4	1	0.85
20	Día 1	11:05	Sin carga	Prototipo 4	2	0.95
21	Día 1	11:10	Sin carga	Prototipo 4	3	0.83
22	Día 1	11:15	Sin carga	Prototipo 4	4	0.77
23	Día 1	11:20	Sin carga	Prototipo 4	5	0.89
24	Día 1	11:25	Sin carga	Prototipo 4	6	0.90

Fuente: Elaboración Propia.

### Tabla 15

*Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 4. Sin carga*

Voltaje total	5.19
Máximo	0.95
Mínimo	0.77
Mediana	0.87
Valor promedio	0.8650
Desviación estándar	0.0625

Fuente: Elaboración Propia.

### Figura 33

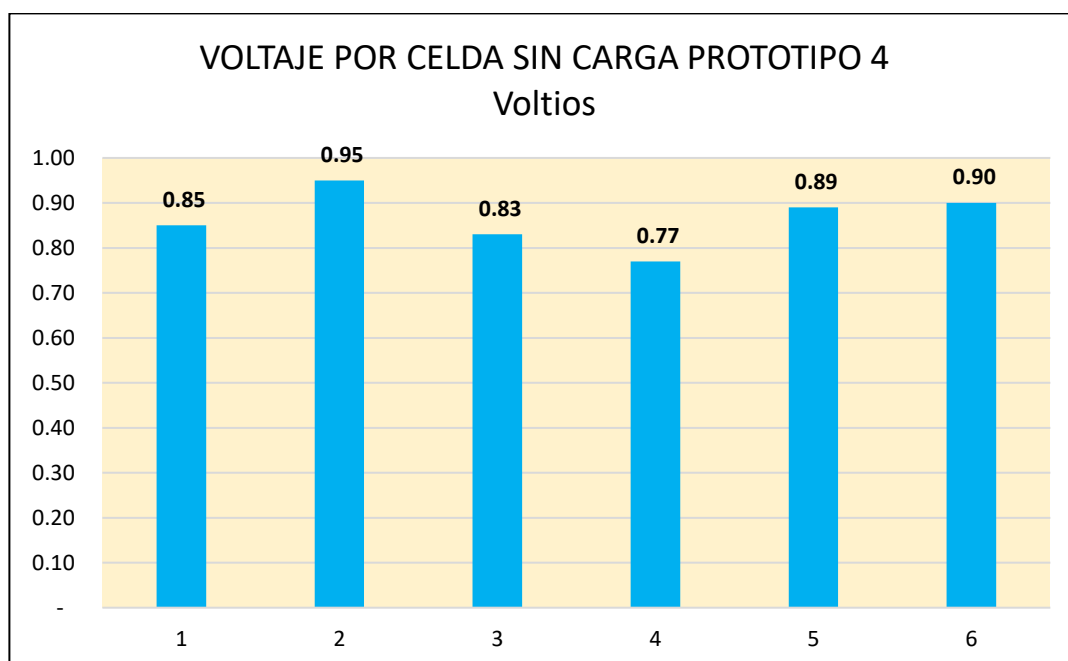
*Voltaje total obtenido en el Prototipo 4. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 34**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 4. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 16**

*Medición de voltajes en Prototipo 5. Sin carga*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
25	Día 1	12:00	Sin carga	Prototipo 5	1	0.87
26	Día 1	12:05	Sin carga	Prototipo 5	2	0.92
27	Día 1	12:10	Sin carga	Prototipo 5	3	0.96
28	Día 1	12:15	Sin carga	Prototipo 5	4	0.83
29	Día 1	12:20	Sin carga	Prototipo 5	5	0.79
30	Día 1	12:25	Sin carga	Prototipo 5	6	0.90

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 17**

*Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 5. Sin carga*

Voltaje total	5.27
Máximo	0.96
Mínimo	0.79
Mediana	0.8850
Desviación estándar	0.0618

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 35**

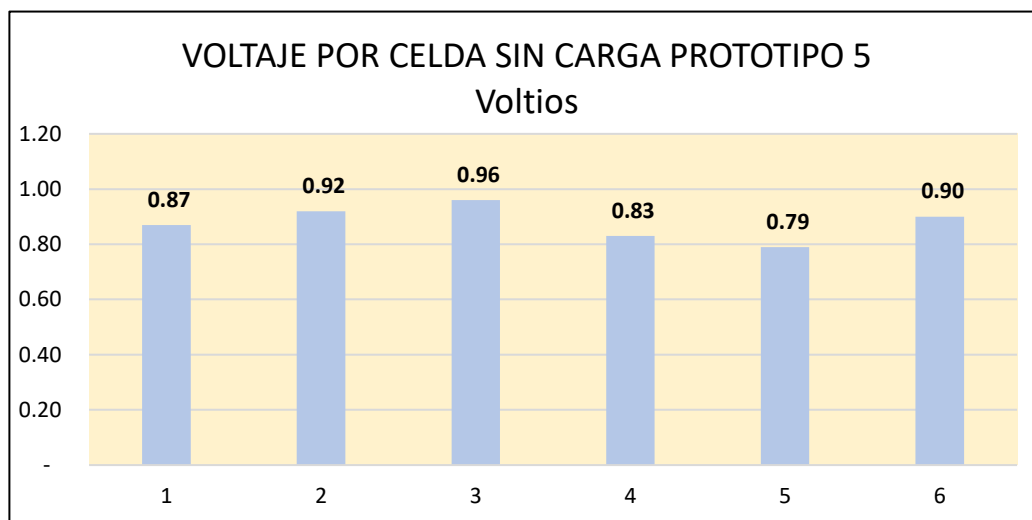
*Voltaje total obtenido en el Prototipo 5. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 36**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 5. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 18***Medición de voltajes en Prototipo 6. Sin carga*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
31	Día 1	15:00	Sin carga	Prototipo 6	1	0.85
32	Día 1	15:05	Sin carga	Prototipo 6	2	0.92
33	Día 1	15:10	Sin carga	Prototipo 6	3	0.87
34	Día 1	15:15	Sin carga	Prototipo 6	4	0.78
35	Día 1	15:20	Sin carga	Prototipo 6	5	0.90
36	Día 1	15:25	Sin carga	Prototipo 6	6	0.89

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 19***Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 6. Sin carga*

Voltaje total	5.21
Máximo	0.92
Mínimo	0.78
Mediana	0.87
Valor promedio	0.8683
Desviación estándar	0.0496

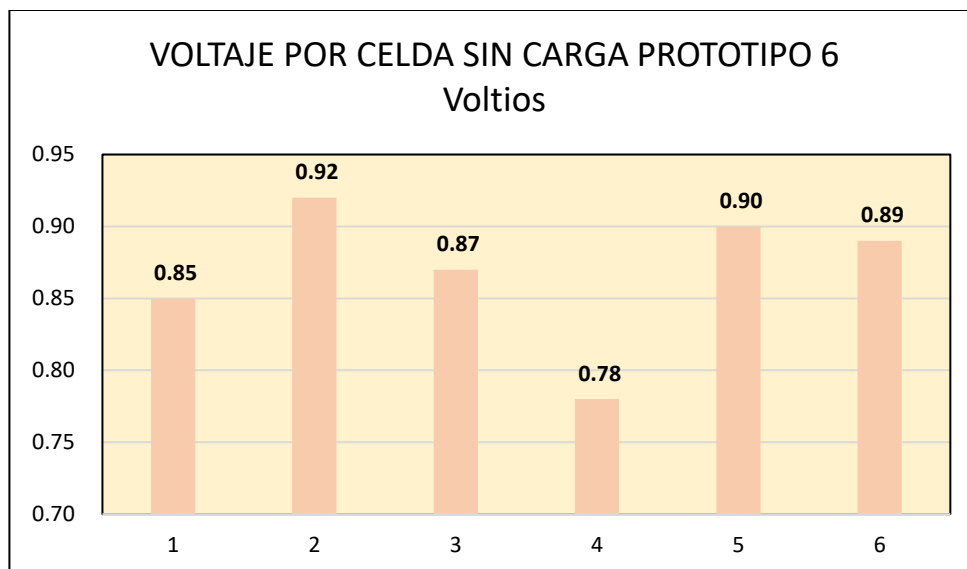
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 37***Voltaje total obtenido en el Prototipo 6. Sin carga.*

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 38**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 6. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 20**

*Medición de voltajes en Prototipo 7. Sin carga*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	CELDA NÚMERO	VOLTAJE SIN CARGA Voltios
37	Día 1	13:00	Sin carga	Prototipo 7	1	0.89
38	Día 1	13:05	Sin carga	Prototipo 7	2	0.88
39	Día 1	13:10	Sin carga	Prototipo 7	3	0.91
40	Día 1	13:15	Sin carga	Prototipo 7	4	0.86
41	Día 1	13:20	Sin carga	Prototipo 7	5	0.87
42	Día 1	13:25	Sin carga	Prototipo 7	6	0.90

Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 21**

*Datos estadísticos de voltajes del Prototipo 7. Sin carga*

Voltaje total	5.31
Máximo	0.91
Mínimo	0.86
Mediana	0.88
Valor promedio	0.8850
Desviación estándar	0.0187

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 39**

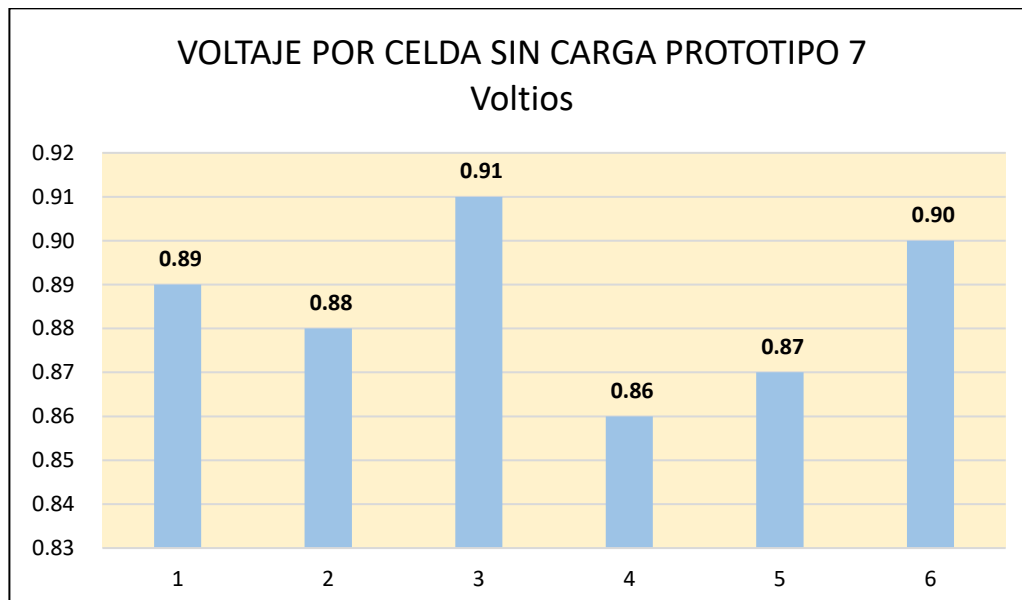
*Voltaje total obtenido en el Prototipo 7. Sin carga.*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 40**

*Voltajes obtenidos por celda - Prototipo N° 7. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

### Prueba 3 Voltaje Total de Prototipos - Sin carga

Se presenta los resultados generales de las pruebas de medición de voltaje total en cada Prototipo sin carga, habiendo realizado 10 mediciones por Prototipo a cada 5 minutos. Ver Tabla 22.

**Tabla 22**

*Medición de voltaje total en cada Prototipo. Sin carga*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	NÚMERO DE CELDAS	CONEXIÓN	VOLTAJE TOTAL POR PROTOTIPO SIN CARGA VOLTIOS
43	Día 2	08:00	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.11
44	Día 2	08:05	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
45	Día 2	08:10	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.11
46	Día 2	08:15	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
47	Día 2	08:20	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.11
48	Día 2	08:25	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
49	Día 2	08:30	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
50	Día 2	08:35	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
51	Día 2	08:40	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
52	Día 2	08:45	Sin carga	Prototipo 1	6	6CS	5.10
53	Día 2	09:00	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.26
54	Día 2	09:05	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.26
55	Día 2	09:10	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
56	Día 2	09:15	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.26
57	Día 2	09:20	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.26
58	Día 2	09:25	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
59	Día 2	09:30	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
60	Día 2	09:35	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
61	Día 2	09:40	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
62	Día 2	09:45	Sin carga	Prototipo 2	6	6CS	5.25
63	Día 2	10:00	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.21
64	Día 2	10:05	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.21
65	Día 2	10:10	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
66	Día 2	10:15	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
67	Día 2	10:20	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.21
68	Día 2	10:25	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
69	Día 2	10:30	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
70	Día 2	10:35	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
71	Día 2	10:40	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22

72	Día 2	10:45	Sin carga	Prototipo 3	6	6CS	5.22
73	Día 2	11:00	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.20
74	Día 2	11:05	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.21
75	Día 2	11:10	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.20
76	Día 2	11:15	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.20
77	Día 2	11:20	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.20
78	Día 2	11:25	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.20
79	Día 2	11:30	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.19
80	Día 2	11:35	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.19
81	Día 2	11:40	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.19
82	Día 2	11:45	Sin carga	Prototipo 4	6	6CS	5.19
83	Día 3	08:30	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.22
84	Día 3	08:35	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.22
85	Día 3	08:40	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.23
86	Día 3	08:45	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.23
87	Día 3	08:50	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.23
88	Día 3	08:55	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.22
89	Día 3	09:00	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.21
90	Día 3	09:05	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.21
91	Día 3	09:10	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.21
92	Día 3	09:15	Sin carga	Prototipo 5	6	6CS	5.21
93	Día 3	11:00	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.28
94	Día 3	11:05	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.28
95	Día 3	11:10	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.28
96	Día 3	11:15	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.28
97	Día 3	11:20	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.28
98	Día 3	11:25	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.27
99	Día 3	11:30	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.27
100	Día 3	11:35	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.27
101	Día 3	11:40	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.27
102	Día 3	11:45	Sin carga	Prototipo 6	6	6CS	5.27
103	Día 3	16:00	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
104	Día 3	16:05	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
105	Día 3	16:10	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.32
106	Día 3	16:15	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.32
107	Día 3	16:20	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.32
108	Día 3	16:25	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
109	Día 3	16:30	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
110	Día 3	16:35	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
111	Día 3	16:40	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31
112	Día 3	16:45	Sin carga	Prototipo 7	6	6CS	5.31

Fuente: Elaboración Propia.

Se presenta, los resultados estadísticos de la medición en los 7 prototipos. Ver Tabla 23 y Figuras del 41 al 47.

**Tabla 23**

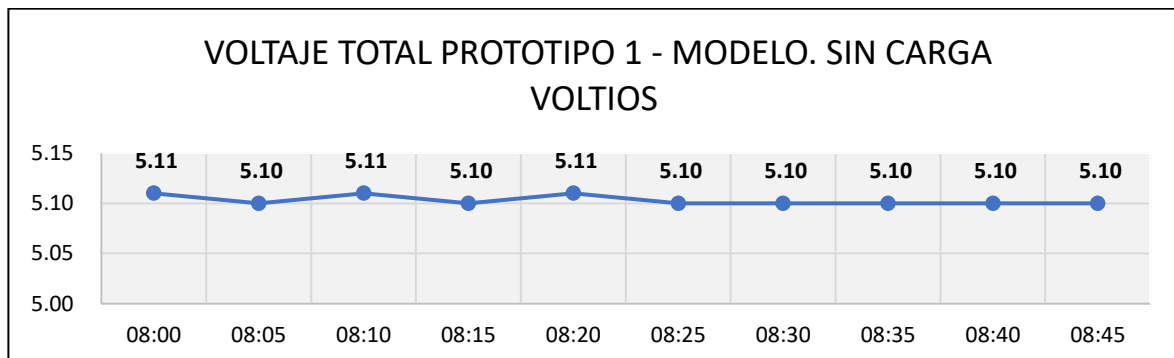
*Datos estadísticos del voltaje total en todos los Prototipos. Sin carga*

Máximo	5.32
Mínimo	5.10
Mediana	5.22
Moda	5.22
Valor promedio	5.2254
Desviación estándar	0.0626

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 41**

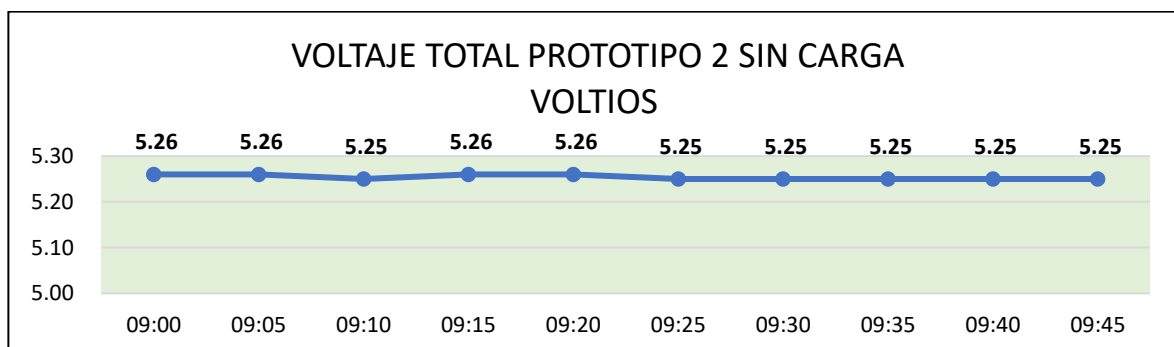
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 1. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 42.**

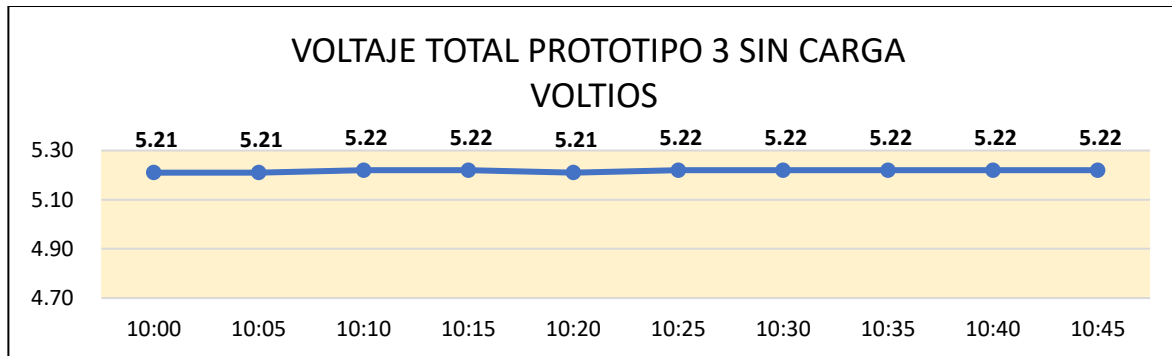
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 2. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 43**

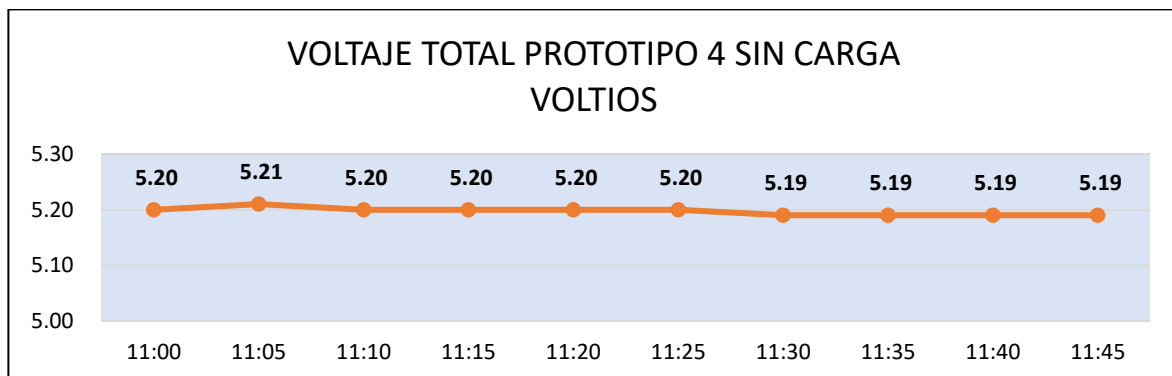
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 3. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 44**

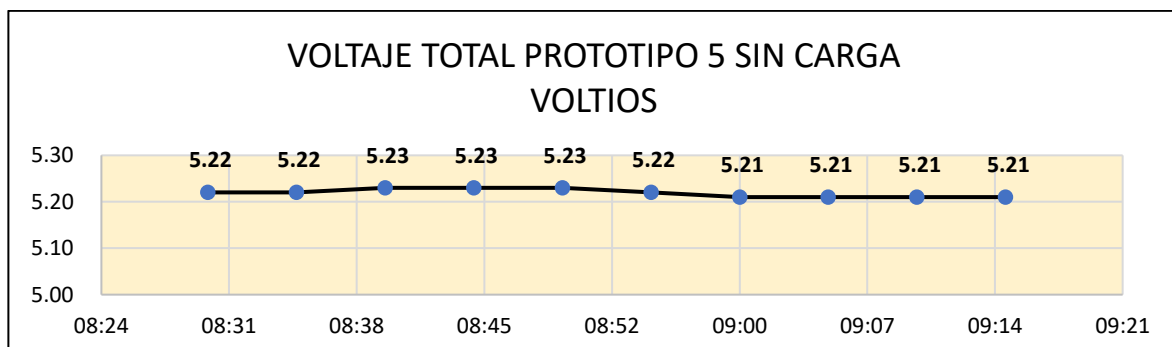
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 4. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 45**

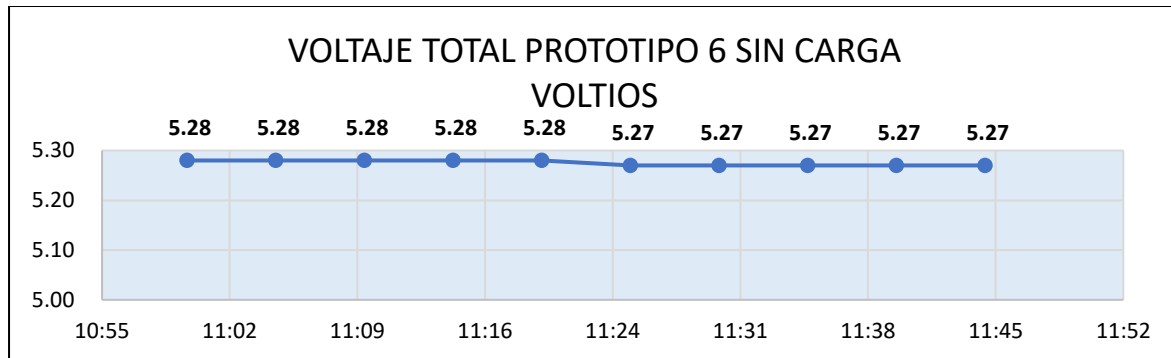
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 5. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 46**

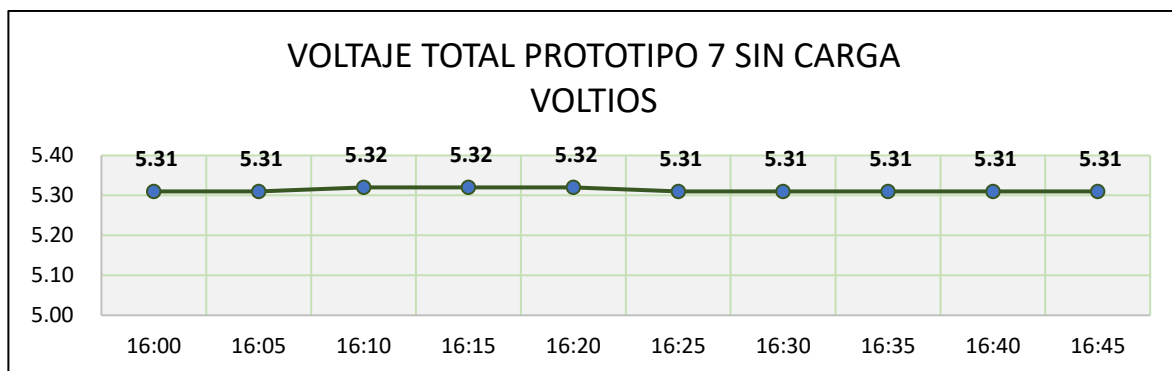
*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 6. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 47**

*Voltaje total obtenido en el Prototipo N° 7. Sin carga*



Fuente: Elaboración Propia.

#### **Prueba 4 Voltaje de Prototipos – Con carga**

Para la realización de Pruebas con carga eléctrica, se emplearon Diodos LED (Light-Emitting Diode: Diodo emisor de luz) los mismos que son dispositivos electrónicos semiconductores que emitirán luz cuando al conectarse a una fuente de voltaje, siempre y cuando la fuente suministre un voltaje igual o mayor al voltaje de polarización del diodo LED.

La carga eléctrica: Diodos LED colores distintos, nos permitirá comprobar la presencia de suficiente potencial eléctrico generado, medido en Voltios, para lograr el funcionamiento de dichos dispositivos.

Se presenta, los resultados de 10 mediciones con carga por cada Prototipo indicando fecha, hora, carga, N° de Prototipo, número de celdas, conexión, voltaje con carga y funcionamiento.

Ver Tabla 24 y Figuras del 48 al 54.

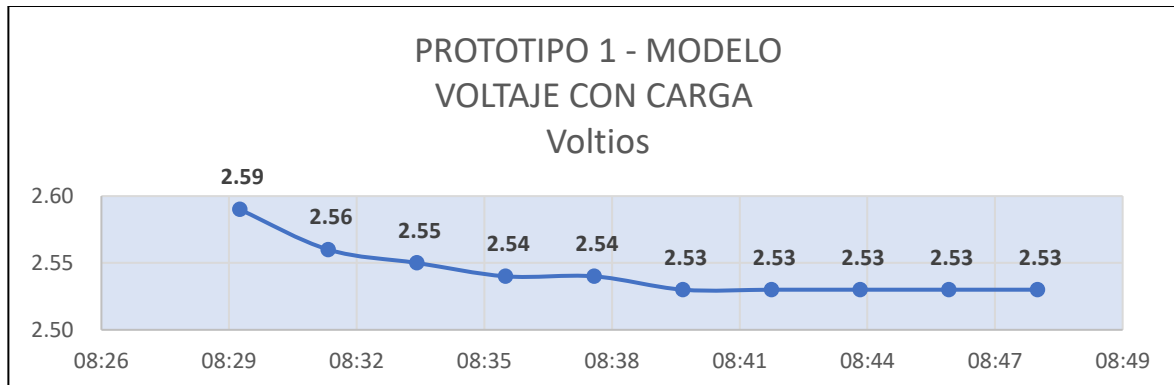
**Tabla 24**

*Resumen Pruebas de medición de voltaje total en cada Prototipo. Con carga*

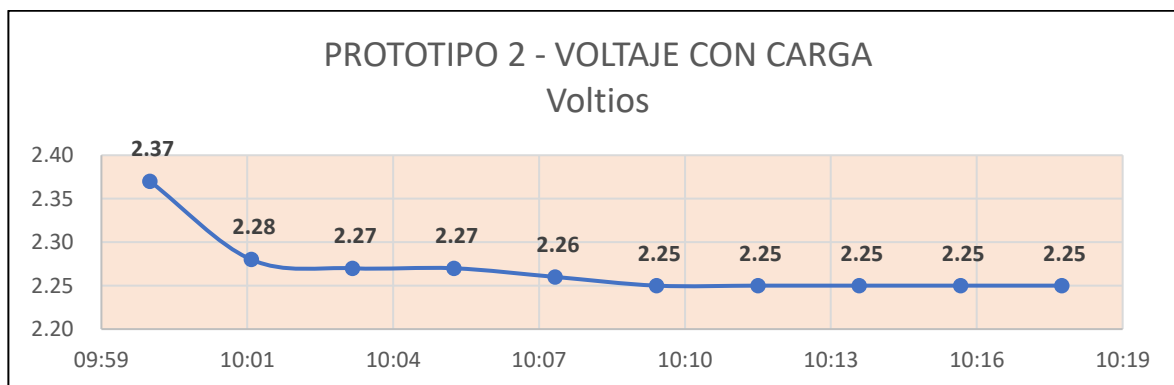
PRUEBA N°	DIA DE PRUEBA	HORA	CARGA	NUMERO DE PROTOTIPO	NÚMERO DE CELDAS	CONEXIÓN	VOLTAJE CON CARGA Voltios	FUNCIONAMIENTO CARGA
113	Día 4	08:30	Con carga 1	1	6	6CS	2.59	4
114	Día 4	08:32	Con carga 1	1	6	6CS	2.56	4
115	Día 4	08:34	Con carga 1	1	6	6CS	2.55	4
116	Día 4	08:36	Con carga 1	1	6	6CS	2.54	4
117	Día 4	08:38	Con carga 1	1	6	6CS	2.54	4
118	Día 4	08:40	Con carga 1	1	6	6CS	2.53	4
119	Día 4	08:42	Con carga 1	1	6	6CS	2.53	4
120	Día 4	08:44	Con carga 1	1	6	6CS	2.53	4
121	Día 4	08:46	Con carga 1	1	6	6CS	2.53	4
122	Día 4	08:48	Con carga 1	1	6	6CS	2.53	4
123	Día 4	10:00	Con carga 2	2	6	6CS	2.37	4
124	Día 4	10:02	Con carga 2	2	6	6CS	2.28	4
125	Día 4	10:04	Con carga 2	2	6	6CS	2.27	4
126	Día 4	10:06	Con carga 2	2	6	6CS	2.27	4
127	Día 4	10:08	Con carga 2	2	6	6CS	2.26	4
128	Día 4	10:10	Con carga 2	2	6	6CS	2.25	4
129	Día 4	10:12	Con carga 2	2	6	6CS	2.25	4
130	Día 4	10:14	Con carga 2	2	6	6CS	2.25	4
131	Día 4	10:16	Con carga 2	2	6	6CS	2.25	4
132	Día 4	10:18	Con carga 2	2	6	6CS	2.25	4
133	Día 4	11:00	Con carga 3	3	6	6CS	1.90	4
134	Día 4	11:02	Con carga 3	3	6	6CS	1.88	4
135	Día 4	11:04	Con carga 3	3	6	6CS	1.87	4
136	Día 4	11:06	Con carga 3	3	6	6CS	1.87	4
137	Día 4	11:08	Con carga 3	3	6	6CS	1.86	4
138	Día 4	11:10	Con carga 3	3	6	6CS	1.86	4

139	Día 4	11:12	Con carga 3	3	6	6CS	1.84	4
140	Día 4	11:14	Con carga 3	3	6	6CS	1.84	4
141	Día 4	11:16	Con carga 3	3	6	6CS	1.84	4
142	Día 4	11:18	Con carga 3	3	6	6CS	1.84	4
143	Día 4	12:00	Con carga 4	4	6	6CS	3.47	3
144	Día 4	12:02	Con carga 4	4	6	6CS	3.46	3
145	Día 4	12:04	Con carga 4	4	6	6CS	3.45	3
146	Día 4	12:06	Con carga 4	4	6	6CS	3.45	3
147	Día 4	12:08	Con carga 4	4	6	6CS	3.44	3
148	Día 4	12:10	Con carga 4	4	6	6CS	3.44	3
149	Día 4	12:12	Con carga 4	4	6	6CS	3.43	3
150	Día 4	12:14	Con carga 4	4	6	6CS	3.43	3
151	Día 4	12:16	Con carga 4	4	6	6CS	3.43	3
152	Día 4	12:18	Con carga 4	4	6	6CS	3.43	3
153	Día 5	08:00	Con carga 5	5	6	6CS	1.86	4
154	Día 5	08:02	Con carga 5	5	6	6CS	1.84	4
155	Día 5	08:04	Con carga 5	5	6	6CS	1.83	4
156	Día 5	08:06	Con carga 5	5	6	6CS	1.83	4
157	Día 5	08:08	Con carga 5	5	6	6CS	1.82	4
158	Día 5	08:10	Con carga 5	5	6	6CS	1.81	4
159	Día 5	08:12	Con carga 5	5	6	6CS	1.80	4
160	Día 5	08:14	Con carga 5	5	6	6CS	1.80	4
161	Día 5	08:16	Con carga 5	5	6	6CS	1.80	4
162	Día 5	08:18	Con carga 5	5	6	6CS	1.80	4
163	Día 5	10:00	Con carga 6	6	6	6CS	2.44	3
164	Día 5	10:02	Con carga 6	6	6	6CS	2.43	3
165	Día 5	10:04	Con carga 6	6	6	6CS	2.43	3
166	Día 5	10:06	Con carga 6	6	6	6CS	2.42	3
167	Día 5	10:08	Con carga 6	6	6	6CS	2.42	3
168	Día 5	10:10	Con carga 6	6	6	6CS	2.40	3
169	Día 5	10:12	Con carga 6	6	6	6CS	2.38	3
170	Día 5	10:14	Con carga 6	6	6	6CS	2.38	3
171	Día 5	10:16	Con carga 6	6	6	6CS	2.38	3
172	Día 5	10:18	Con carga 6	6	6	6CS	2.38	3
173	Día 5	11:00	Con carga 7	7	6	6CS	2.59	4
174	Día 5	11:02	Con carga 7	7	6	6CS	2.57	4
175	Día 5	11:04	Con carga 7	7	6	6CS	2.56	4
176	Día 5	11:06	Con carga 7	7	6	6CS	2.54	4
177	Día 5	11:08	Con carga 7	7	6	6CS	2.54	4
178	Día 5	11:10	Con carga 7	7	6	6CS	2.53	4
179	Día 5	11:12	Con carga 7	7	6	6CS	2.53	4
180	Día 5	11:14	Con carga 7	7	6	6CS	2.53	4
181	Día 5	11:16	Con carga 7	7	6	6CS	2.53	4
182	Día 5	11:18	Con carga 7	7	6	6CS	2.53	4

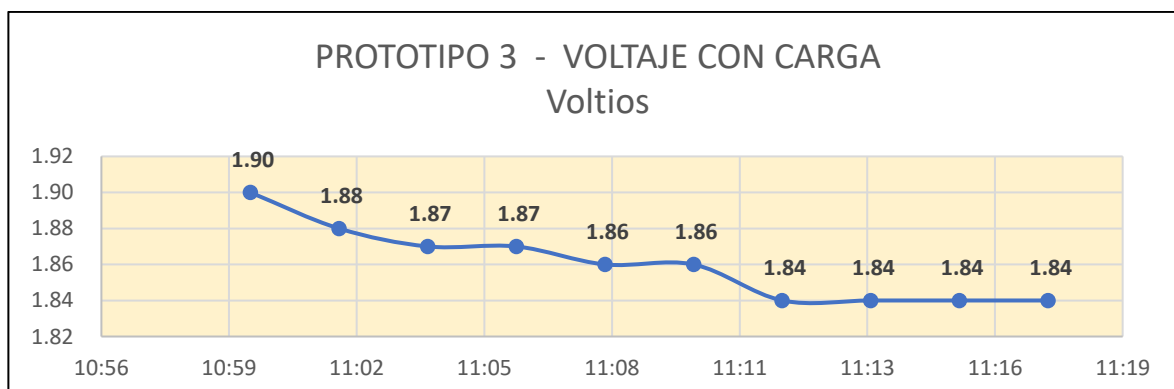
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 48***Medición de voltaje en el Prototipo N° 1. Con carga*

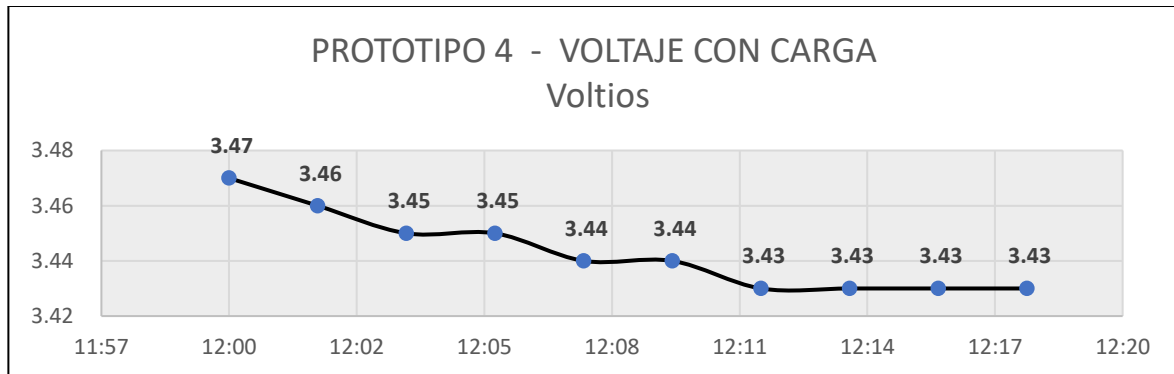
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 49***Medición de voltaje en el Prototipo N° 2. Con carga*

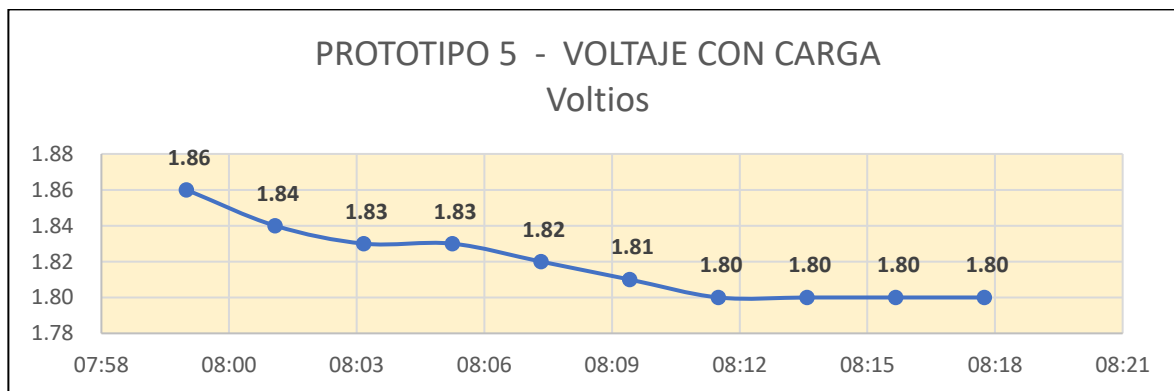
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 50***Medición de voltaje en el Prototipo N° 3. Con carga*

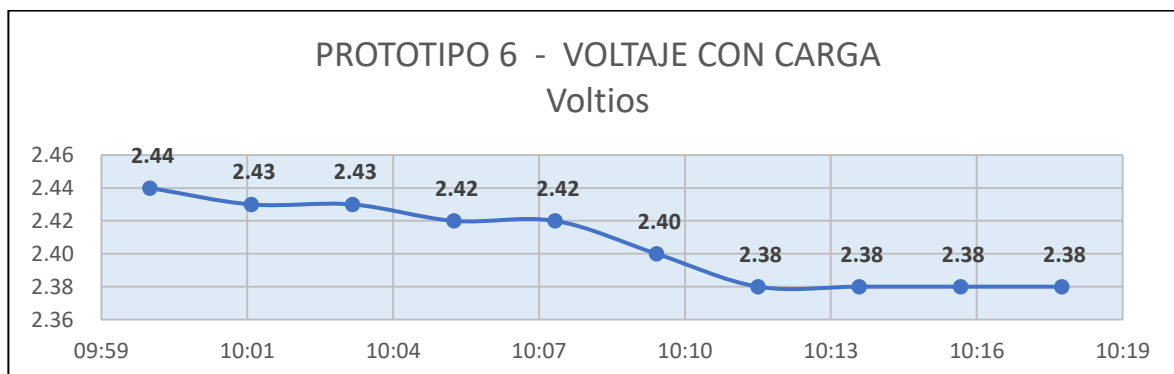
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 51***Medición de voltaje en el Prototipo N° 4. Con carga*

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 52***Medición de voltaje en el Prototipo N° 5. Con carga*

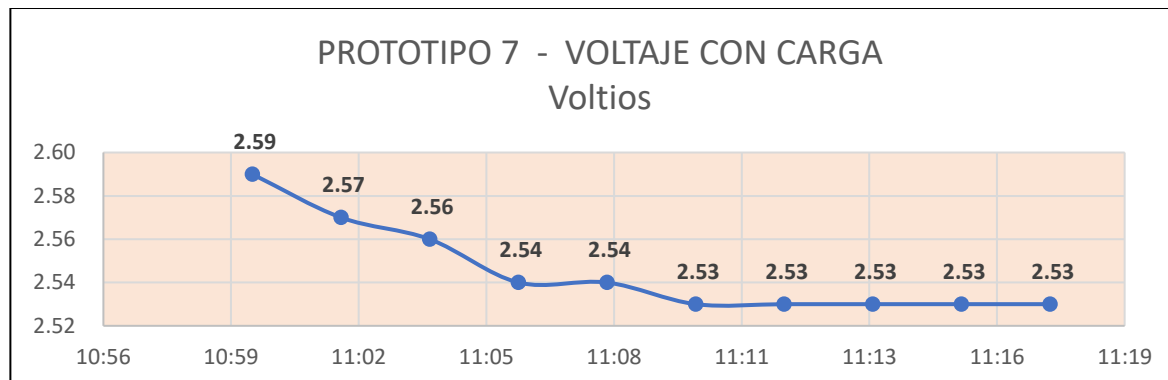
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 53***Medición de voltaje en el Prototipo N° 6. Con carga*

Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 54**

*Medición de voltaje en el Prototipo N° 7. Con carga*



Fuente: Elaboración Propia.

**Prueba 5 Capacidad del Prototipo 1 – Con carga**

Esta prueba se realizó durante 168 horas seguidas, registrando en 85 mediciones con intervalos de cada 2 horas y consistió en una prueba del Prototipo 1 con 4 Led color rojo como carga eléctrica. Se registró el número de prueba, fecha, horas de operación, hora, voltaje, corriente, resultado con carga y potencia disipada. La columna Resultado Carga indica el nivel de luminosidad de los Led, iniciando con alto brillo, Luminosidad 4 y luego a partir de las 116 horas de operación el voltaje adoptó una tendencia a la disminución y luego a las 168 horas decayó la Luminosidad a nivel 3, los datos registrados se encuentran en la Tabla 25. La prueba culmina cuando se observa Luminosidad 3 en los Led ya que el objetivo de la presente tesis es generar energía eléctrica de origen electroquímico reutilizando aguas grises domésticas, lo cual quedó demostrado.

**Tabla 25***Prueba de capacidad del Prototipo1*

PRUEBA N°	DÍA DE PRUEBA	HORAS DE OPERACIÓN	HORA	V	CORRIENTE $\mu$ A	RESULTADO CARGA	POTENCIA DISIPADA $\mu$ W
183	Día 6	0	12:00	1.729	320.00	4	553.28
184	Día 6	2	14:00	1.729	297.00	4	513.51
185	Día 6	4	16:00	1.728	283.00	4	489.02
186	Día 6	6	18:00	1.727	282.00	4	487.01
187	Día 6	8	20:00	1.716	284.80	4	488.72
188	Día 6	10	22:00	1.722	287.40	4	494.90
189	Día 6	12	00:00	1.723	288.00	4	496.22
190	Día 7	14	02:00	1.723	289.00	4	497.95
191	Día 7	16	04:00	1.724	291.00	4	501.68
192	Día 7	18	06:00	1.724	292.90	4	504.96
193	Día 7	20	08:00	1.724	294.30	4	507.37
194	Día 7	22	10:00	1.724	299.00	4	515.48
195	Día 7	24	12:00	1.726	309.70	4	534.54
196	Día 7	26	14:00	1.726	312.40	4	539.20
197	Día 7	28	16:00	1.727	314.00	4	542.28
198	Día 7	30	18:00	1.727	315.60	4	545.04
199	Día 7	32	20:00	1.727	316.70	4	546.94
200	Día 7	34	22:00	1.727	317.40	4	548.15
201	Día 7	36	00:00	1.727	317.00	4	547.46
202	Día 8	38	02:00	1.727	315.80	4	545.39
203	Día 8	40	04:00	1.727	314.50	4	543.14
204	Día 8	42	06:00	1.727	312.70	4	540.03
205	Día 8	44	08:00	1.727	311.80	4	538.48
206	Día 8	46	10:00	1.727	314.80	4	543.66
207	Día 8	48	12:00	1.727	319.00	4	550.91
208	Día 8	50	14:00	1.727	320.20	4	552.99
209	Día 8	52	16:00	1.727	319.70	4	552.12
210	Día 8	54	18:00	1.727	318.10	4	549.36
211	Día 8	56	20:00	1.727	317.30	4	547.98
212	Día 8	58	22:00	1.727	316.50	4	546.60
213	Día 8	60	00:00	1.727	315.70	4	545.21
214	Día 9	62	02:00	1.727	314.70	4	543.49
215	Día 9	64	04:00	1.727	314.90	4	543.83
216	Día 9	66	06:00	1.727	315.10	4	544.18
217	Día 9	68	08:00	1.727	315.80	4	545.39
218	Día 9	70	10:00	1.727	315.80	4	545.39
219	Día 9	72	12:00	1.727	316.20	4	546.08
220	Día 9	74	14:00	1.727	317.50	4	548.32
221	Día 9	76	16:00	1.727	318.40	4	549.88
222	Día 9	78	18:00	1.727	319.80	4	552.29

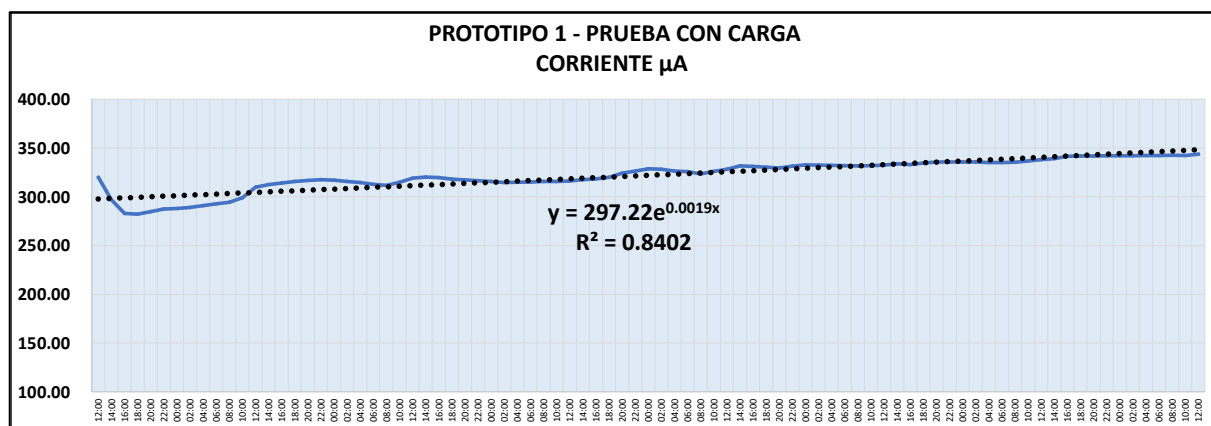
223	Día 9	80	20:00	1.728	324.10	4	560.04
224	Día 9	82	22:00	1.729	326.30	4	564.17
225	Día 9	84	00:00	1.729	328.60	4	568.15
226	Día 10	86	02:00	1.727	328.20	4	566.80
227	Día 10	88	04:00	1.727	326.40	4	563.69
228	Día 10	90	06:00	1.727	325.70	4	562.48
229	Día 10	92	08:00	1.727	323.40	4	558.51
230	Día 10	94	10:00	1.727	326.00	4	563.00
231	Día 10	96	12:00	1.727	328.30	4	566.97
232	Día 10	98	14:00	1.73	331.70	4	573.84
233	Día 10	100	16:00	1.73	331.10	4	572.80
234	Día 10	102	18:00	1.731	330.40	4	571.92
235	Día 10	104	20:00	1.73	329.40	4	569.86
236	Día 10	106	22:00	1.731	331.30	4	573.48
237	Día 10	108	00:00	1.731	332.80	4	576.08
238	Día 11	110	02:00	1.732	332.50	4	575.89
239	Día 11	112	04:00	1.732	332.10	4	575.20
240	Día 11	114	06:00	1.732	331.90	4	574.85
241	Día 11	116	08:00	1.733	331.60	4	574.66
242	Día 11	118	10:00	1.733	331.90	4	575.18
243	Día 11	120	12:00	1.733	332.50	4	576.22
244	Día 11	122	14:00	1.733	333.80	4	578.48
245	Día 11	124	16:00	1.733	333.10	4	577.26
246	Día 11	126	18:00	1.733	334.50	4	579.69
247	Día 11	128	20:00	1.733	335.70	4	581.77
248	Día 11	130	22:00	1.733	335.70	4	581.77
249	Día 11	132	00:00	1.733	335.70	4	581.77
250	Día 12	134	02:00	1.733	335.75	4	581.85
251	Día 12	136	04:00	1.733	335.20	4	580.90
252	Día 12	138	06:00	1.734	335.00	4	580.89
253	Día 12	140	08:00	1.734	335.40	4	581.58
254	Día 12	142	10:00	1.734	336.80	4	584.01
255	Día 12	144	12:00	1.734	338.10	4	586.27
256	Día 12	146	14:00	1.735	339.20	4	588.51
257	Día 12	148	16:00	1.735	341.50	4	592.50
258	Día 12	150	18:00	1.735	341.70	4	592.85
259	Día 12	152	20:00	1.735	341.70	4	592.85
260	Día 12	154	22:00	1.735	341.90	3	593.20
261	Día 12	156	00:00	1.735	342.10	3	593.54
262	Día 13	158	02:00	1.735	342.10	3	593.54
263	Día 13	160	04:00	1.735	342.40	3	594.06
264	Día 13	162	06:00	1.735	342.40	3	594.06
265	Día 13	164	08:00	1.735	342.50	3	594.24
266	Día 13	166	10:00	1.735	342.35	3	593.98
267	Día 13	168	12:00	1.735	343.70	3	596.32

Fuente: Elaboración Propia.

Como se podrá apreciar en los datos mostrados en la Tabla 25, se observa la corriente de carga, el voltaje, el tiempo y la potencia. A partir de estas mediciones se han elaborado las curvas de las líneas de tendencia de la corriente en función del tiempo, en versión exponencial y polinomial, los cuales se muestran los resultados en la Figura 55 y en la Figura 56.

**Figura 55**

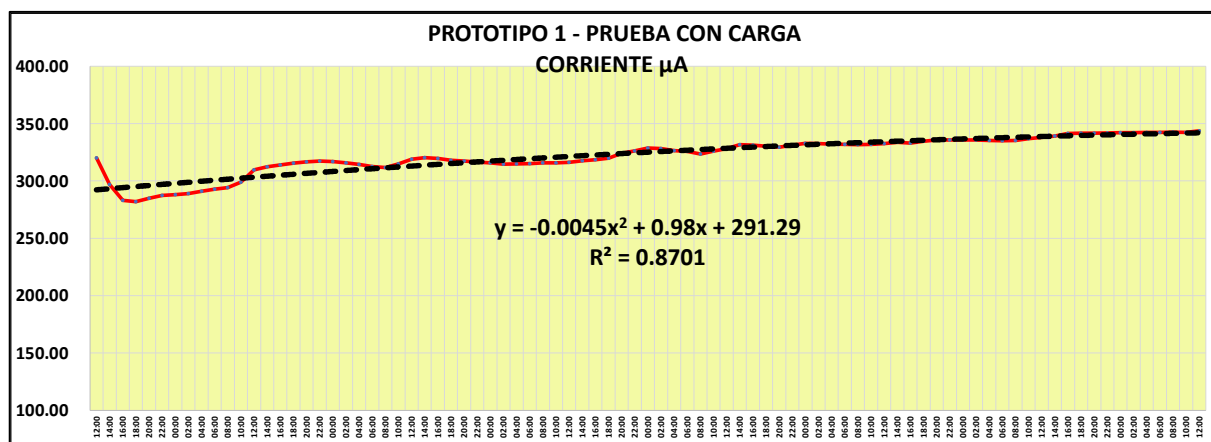
*Curva de medición y ecuación exponencial de corriente con carga Prototipo1*



Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 56**

*Curva de medición y ecuación polinomial de corriente con carga Prototipo1*



Fuente: Elaboración Propia.

Obsérvese que el Coeficiente de Determinación R-Cuadrado de la ecuación polinomial es mayor que el de la ecuación exponencial, por lo tanto, representa con mayor aproximación la corriente, por esta razón adoptaremos la ecuación de línea de tendencia polinomial para el cálculo de capacidad del Prototipo 1, para la carga y condiciones descritas en la prueba realizada. Entonces planteamos la Ecuación 3:

**Ecuación 3.** *Línea de tendencia de la corriente en función del tiempo.*

**Ecuación 1.** Corriente en función de carga y tiempo. ....49

$$y = -0.0045x^2 + 0.98x + 291.29 \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donde la corriente está representada por el eje de ordenadas y el tiempo por el eje de abscisas, por lo tanto, la corriente instantánea será la descrita en la Ecuación 4:

**Ecuación 4.** *Corriente del Prototipo 1 en función del tiempo.*

$$I = -0.0045t^2 + 0.98t + 291.29 \quad \dots\dots\dots (4)$$

La capacidad disipada del Prototipo 1 será expresada en la Ecuación 5 y 6:

**Ecuación 5.** *Capacidad del Prototipo 1 en función de la corriente y tiempo.*

$$\text{Capacidad} = C = \int_0^t i \, dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

**Ecuación 6.** *Capacidad C del Prototipo 1 en función del tiempo.*

$$C = \int_0^{168} (-0.0045t^2 + 0.98t + 291.29) \, dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

Para la resolución de la integral emplearemos la Fórmula de la Ecuación 7:

**Ecuación 7.** *Fórmula de integración.*

$$\int u^m \, du = \frac{u^{m+1}}{m+1} + C, \quad m \neq -1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

La capacidad del Prototipo 1 hallaremos, desarrollando la integral definida en la Ecuación 6 y por tanto tenemos:

$$C = -0.0015 t^3 + 0.49t^2 + 291.29t \quad \Bigg|_{0}^{168}$$

Resolviendo, el resultado podrá ser expresado en  $\mu\text{Ah}$  o en  $\text{mAh}$ :

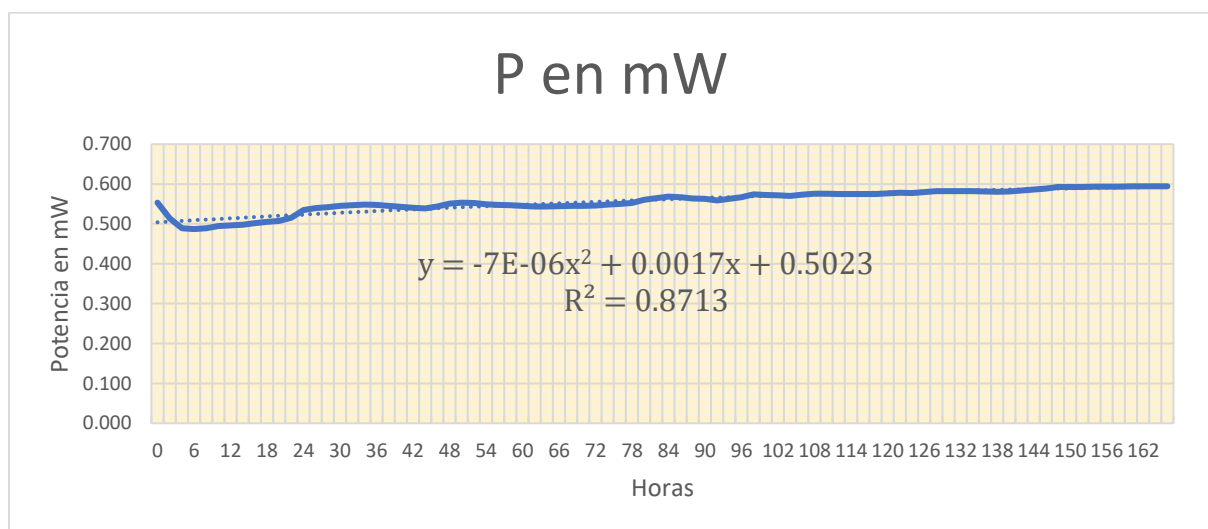
$$C = 55,654.032\mu\text{Ah} \text{ disipados en 168 horas}$$

$$C = 55.65\text{mAh} \text{ disipados en 168 horas}$$

A continuación, realizaremos el análisis de data y cálculo de la energía generada por el prototipo, para lo cual hemos desarrollado la curva de potencia en función del tiempo. Ver Figura 57.

### Figura 57

*Curva de la potencia instantánea del Prototipo 1 obtenida con los resultados de la Prueba 5*



Fuente: Elaboración Propia.

**Ecuación 8.** *Ecuación de la potencia instantánea del prototipo 1-Prueba 5.*

De la curva mostrada en la Figura 55 obtenemos la ecuación de la potencia instantánea del prototipo 1:

$$p = -7^{-6}t^2 + 0.0017t + 0.5023$$

Luego, calcularemos la energía disipada:

**Ecuación 9.** *Fórmula de la energía instantánea disipada.*

$$dE = p dt$$

Donde:

$E$  = Energía disipada en mWh

$p$  = Potencia instantánea en mW

$t$  = Tiempo de utilización del prototipo en horas

**Ecuación 10.** *Fórmula de la energía instantánea disipada.*

Por lo tanto, la energía generada por el prototipo 1 en un período de 168 horas, de acuerdo a la Prueba 5, es:

$$E = \int_0^t p dt$$

$$E = \int_0^t -7^{-6}t^2 dt + 0.0017t dt + 0.5023 dt$$

Resolviendo:

$$E = - \left[ \frac{1}{3 \cdot 7^6} \right] t^3 + 0.00085 t^2 + 0.5023 t \Bigg|_0^{168}$$

$$E = - \left[ \frac{1}{3 \cdot 7^6} \right] 168^3 + 0.00085 * 168^2 + 0.5023 * 168$$

$$E = - \left[ \frac{1}{3 \cdot 76} \right] 168^3 + 0.00085 * 168^2 + 0.5023 * 168$$

$$E = 94.94 \text{ mWh}$$

### Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para realizar la evaluación del impacto ambiental se consideró los valores anuales de impacto ambiental de los procesos desde la extracción de materiales, operación, mantenimiento, disposición y reciclado de componentes, lo que nos permite calcular la reducción y el impacto neto de acuerdo con la producción de energía esperada. Los resultados se detallan en la siguiente Tabla 26:

**Tabla 26**

*Análisis del ciclo de vida del prototipo*

LCI	Elementos	Dióxido de Carbono Equivalente (kg)	Total Dióxido de Carbono Equivalente (kg)
<b>Extracción</b>	Cobre	8 kg CO <sub>2</sub> -eq×2	16 kg CO <sub>2</sub> -eq.
	Zinc	4 kg CO <sub>2</sub> -eq×2	8 kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Manufactura</b>	2 x Grupos de celdas galvánicas	1 kg CO <sub>2</sub> -eq×2	2 kg CO <sub>2</sub> -eq
<b>Operación*</b>	-	-	-200 kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Mantenimiento *</b>	-	-	1 kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Disposición &amp; Reciclado</b>	-	-	-2 kg (Cu y Zn)
<b>Balance Total*</b>			
<b>Extracción &amp; Mf.</b>	24 kg (Cu y Zn) +2 kg (Hombre)		26 kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Reducción</b>	-200 kg CO <sub>2</sub> -eq. (O) -2 kg (En)+1 (Ma.)		-201 kg CO <sub>2</sub> -eq.
<b>Impacto neto</b>	26 kg CO <sub>2</sub> -eq. -201 kg CO <sub>2</sub> -eq		-175 kg CO <sub>2</sub> -eq

(\*) Anual

Fuente: Elaboración Propia.

El análisis de ciclo de vida revela que, en comparación con las tecnologías tradicionales, esta solución ofrece una opción sostenible, especialmente si se mejoran los procedimientos de extracción, manufactura, operación, mantenimiento, reciclado y tratamiento de subproductos. El resultado de  $-175 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$  indica una significativa reducción de emisiones de  $\text{CO}_2$ , lo que confirma su idoneidad para aplicaciones en la gestión de energía sostenible.

### **Contrastación de hipótesis**

De acuerdo con los resultados mostrados, la aplicación de celdas galvánicas con la reutilización de aguas grises domésticas permite generar energía electroquímica.

### **Hipótesis de investigación:**

La hipótesis de investigación principal expresa que:

- Reutilizando aguas grises domésticas, en un diseño Prototipo, se genera energía electroquímica,

Lo cual queda demostrado de la siguiente forma:

Hipótesis de investigación: La energía generada  $H_i$  es mayor a Cero

Hipótesis nula : La energía generada  $H_o$  es igual a Cero

### **Criterio de Decisión**

La energía eléctrica generada por el Prototipo debe ser mayor que cero.

Siendo la energía eléctrica generada, en un período de 168 horas  $H_i = 94.94 \text{ mWh} > 0$ , entonces la hipótesis de investigación es verdadera y se rechaza la hipótesis nula por ser falso.

## Hipótesis Específicas

- a) Con un Prototipo de celda galvánica, especialmente diseñado y construido, se demuestra que reutilizando aguas grises domésticas se genera energía electroquímica.

### **Criterio de Decisión:**

El Prototipo de celda galvánica debe demostrar que reutilizando aguas grises domésticas se genera energía electroquímica, de determinado voltaje.

Habiéndose demostrado que la generación de voltaje se ha producido, se concluye que la hipótesis específica en mención es verdadera.

- b) Mediante pruebas experimentales, se determina los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas.

### **Criterio de Decisión:**

Mediante pruebas experimentales se debe determinar parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas.

Se ha obtenido data que determina valores resultantes de los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas. Por lo tanto, se concluye que la hipótesis específica en mención es verdadera.

## Análisis e interpretación

En las Tablas y Figuras presentados, se muestran los resultados de las mediciones de los voltajes generados por los 7 Prototipos, habiendo realizado:

- La medición de voltajes sin cargade las celdas, en forma individual presenta los siguientes resultados en el Tabla 27:

**Tabla 27**

*Interpretación de datos estadísticos de medición de voltaje total en cada Prototipo. Sin carga*

Resultados en términos de voltaje generado	Valores	Interpretación
Máximo	5.32	Se observa un voltaje significativo
Mínimo	5.10	Se observa ligera diferencia respecto del máximo, alcanza 4.13%. Lo que no impide que los Prototipos puedan funcionar en paralelo.
Mediana	5.22	Representa la media en términos de voltaje.
Moda	5.22	La mayor parte de los Prototipos presenta en este valor generado de voltaje.
Valor promedio	5.2254	Es el valor promedio de voltaje generado por los diferentes Prototipos.
Desviación estándar	0.0626	Este valor de desviación estándar es aceptable. Se presenta en razón a imprecisiones en el procedimiento manual de la construcción de cada Prototipo. A medida que el proceso sea preciso en cuanto a dimensiones de placas, mejore el ajuste del contacto eléctrico en los bornes y se disminuyan las variaciones propias del montaje, se logrará mayor igualdad en los voltajes generados y disminuirá este valor de desviación estándar.

Fuente: Elaboración Propia.

- La medición de voltajes totales de los Prototipos con 6 celdas conectadas en serie cumple la Ley de Voltajes de Kirchoff.
- Habiéndose observado que la energía generada es de pequeña escala de potencia y el Prototipo es inocuo para las personas y el medio ambiente, por lo cual tiene utilidad ya que el riesgo eléctrico es mínimo o nulo.

## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- a) Los problemas ambientales actuales indican que la relación de la humanidad con la naturaleza debe cambiar. Los datos científicos y los informes de los medios de comunicación sugieren que, si no se revierte la tendencia en el uso de la energía, la humanidad se encamina hacia la desestabilización ambiental y posiblemente a su propia destrucción. La intervención antropogénica ha sido identificada como la principal causa de muchos de estos problemas, lo que implica que la solución también está en las acciones humanas. En este escenario el desafío es innovar y crear sistemas de vida sostenibles que gradualmente sustituyan a las actuales. Las energías limpias y la generación de energía con menor impacto ambiental surgen como alternativas vitales. Por esta razón, la pregunta orientadora de la investigación aborda la posibilidad de generar energía electroquímica mediante la reutilización de aguas grises domésticas, lo que no solo es una alternativa posible, sino también es sostenible.
- b) La literatura científica en materia de investigación sobre generación de energía electroquímica nos indica que cada vez más investigadores vienen estudiando esta materia, lo que demuestra que la innovación en el uso de celdas galvánicas con la reutilización de aguas grises domésticas ha hecho posible la generación de energía electroquímica y representa una alternativa muy interesante.
- c) La generación de energía electroquímica mediante aguas residuales fue descrita por Alzate et al. (2008) quienes precisan que, a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana, con electrodos de papel carbón y cátodo con ingreso de aire, en celdas de ánodo y cátodo separados por una membrana de intercambio de protones

lograron la generación de electricidad empleando como sustrato agua residual sintética, García et al. (2017) establece que empleando celdas microbianas de combustible, se obtiene energía eléctrica, mediante bacterias *Escherichia coli*, alcanzando voltajes desde 0.302 V hasta 0.931 V transformando la bioenergía que contienen las aguas residuales de origen: doméstico, pluviales y de criaderos de peces, y que los voltajes más altos generados fueron cuando utilizó el agua residual de criadero de peces y (Cora Repuello, 2019), mediante Celdas Microbianas de Combustible (MFC) y aguas residuales logró generar alrededor de 500 mV.

- d) El análisis de los hallazgos a través de la presente investigación comparado con las investigaciones anteriores, nos permite presentar una opción innovadora en el contexto de la generación de energía electroquímica por las siguientes razones: 1) Se emplea cobre y fierro galvanizado como electrodos, y no electrodos de metales pesados que causan grave daño ecológico, ambiental y por ende a la salud humana, 2) Se reutiliza aguas grises de origen doméstico, por tanto no es agua residual altamente contaminada y no es electrolito como el ácido sulfúrico de las baterías que actualmente se comercializan en todo el mundo 3) Se obtiene un voltaje mayor a 5 Voltios sin precedentes comparativamente a los hallazgos de los estudios detallados en el párrafo anterior. Por lo tanto, el presente estudio se destaca por su innovación al utilizar materiales no contaminantes y usar elementos reciclados, en tal sentido es una contribución innovadora para la sostenibilidad ambiental, para la promoción de la economía circular, además el análisis LCA establece una significativa reducción de emisiones de -175 kg CO<sub>2</sub>-eq ideal para aplicaciones en gestión de energía.
- e) Por otro lado, la presente investigación se distingue por demostrar la generación de energía utilizando aguas grises domésticas, lo que abre la puerta a aplicaciones de energía

renovable en entornos residenciales. Aunque los niveles de escalabilidad alcanzados aún son pequeños, es oportuno indicar que de modo similar surgieron las lámparas Led y las celdas fotovoltaicas y en la actualidad ambas tecnologías tienen gran impacto favorable en la protección del medio ambiente. En ese orden de ideas el impacto de continuar con la presente línea de investigación puede resultar muy grande y prometedor debido al gran volumen de los espacios residenciales domésticos y el uso muy difundido de pilas, baterías y acumuladores electroquímicos.

f) Aunque nuestros resultados demuestran que es posible generar energía eléctrica con una eficiencia prometedora bajo diferentes condiciones experimentales, podríamos considerar que la pequeña escala de los prototipos puede no reflejar completamente la dinámica de los sistemas a escala real y que la duración limitada de las pruebas puede no reflejar el desempeño del sistema a largo plazo.

g) En las 42 celdas galvánicas, reutilizando aguas residuales grises domésticas, se ha logrado generar diversos valores de voltajes con los siguientes resultados sin carga:

Voltaje mínimo generado:	0.70 Voltios.
Voltaje máximo generado:	0.96 Voltios.
Mediana del Voltaje generado:	0.87 Voltios.
Moda del Voltaje generado:	0.87 Voltios.
Voltaje promedio generado:	0.8702 Voltios.
Desviación estándar del voltaje generado:	0.0508 Voltios.

- h) En el Prototipo se emplean 6 celdas individuales que han sido acondicionadas y conectadas en serie, para que, de acuerdo con la Ley de Voltajes de Kirchoff, se obtenga un voltaje significativamente mayor. Como resultado se ha obtenido los siguientes valores de voltajes totales sin carga, en los 7 Prototipos:

Voltaje mínimo generado:	5.10 Voltios.
Voltaje máximo generado:	5.32 Voltios.
Mediana del Voltaje generado:	5.22 Voltios.
Moda del Voltaje generado:	5.22 Voltios.
Voltaje promedio generado:	5.2254 Voltios.
Desviación estándar del voltaje generado:	0.0626 Voltios.

- i) El voltaje total generado, en los Prototipos, ha sido entregado al exterior de la celda y del Prototipo, mediante un circuito eléctrico, para la medición de corriente.
- j) En el circuito eléctrico externo se midió el potencial eléctrico resultante en los 7 Prototipos, encontrándose valores entre 5.10 y 5.32 Voltios, en vacío o sin carga, lo cual es producto de la conversión electroquímica de energía.
- k) Asimismo, se ha efectuado diversas pruebas con carga. Se probó los 7 prototipos con diversas cargas habiendo registrado el funcionamiento con Led de diferentes colores.
- l) El Prototipo 1, se probó con 4 Led color rojo en paralelo como carga eléctrica, 168 horas seguidas, registrando en 85 mediciones con intervalos de cada 2 horas con los siguientes resultados, en la Tabla 28:

**Tabla 28**

*Resumen estadístico de la prueba de capacidad del Prototipo 1*

<b>Valor</b>	<b>V Voltios</b>	<b>CORRIENTE <math>\mu</math>A</b>	<b>POTENCIA DISIPADA <math>\mu</math>W</b>
Mínimo	1.716	282.000	487.014
Máximo	1.735	343.700	596.320
Promedio	1.729	322.353	557.508

Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 25, se observa que, en correspondencia a la carga, el Prototipo 1 ha disipado una potencia media de 0.557 mW en 168 horas de funcionamiento, para las condiciones descritas en la prueba efectuada.

m) Asimismo, con los datos registrados, se elaboró la ecuación de la línea de tendencia y la ecuación de corriente, exponencial y polinomial, de las cuales se elige la ecuación polinomial para el cálculo de capacidad del Prototipo 1, por tener mayor valor R cuadrado, ya que representa mejor los datos de la línea de regresión ajustada.

Luego de desarrollar la integral definida con valores de tiempo de 0 a 168 horas, se ha determinado la capacidad disipada por el Prototipo 1, en 168 horas de funcionamiento, que resulta: 55.65 mAh, asimismo la energía disipada alcanzó 94.94 mWh, para las condiciones descritas en la prueba efectuada.

## VI. CONCLUSIONES

- a) Se ha logrado generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas y se ha demostrado la capacidad del dispositivo, para suministrar energía eléctrica a dispositivos de bajo consumo energético, lo cual valida las posibilidades de su aplicación práctica. La presente propuesta es un aporte y una innovación por su distinta conformación de materiales no contaminantes para el medio ambiente y no tóxicos para la salud humana.
- b) Se ha realizado la búsqueda de literatura relacionada con la generación de energía electroquímica reutilizando aguas grises domésticas en las bases de datos de artículos científicos, habiendo determinado la existencia de diversas investigaciones en áreas similares mas no con las mismas características técnicas y componentes que se utilizan en la presente investigación. Asimismo, emplean distinto marco teórico.
- c) Se ha diseñado y construido 7 Prototipos, los cuales generan energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas, habiéndose demostrado mediante pruebas durante 168 horas la generación de 94.94 mWh de energía eléctrica. Por lo tanto, la aplicabilidad y reproducibilidad de los prototipos ha quedado científicamente demostrado.
- d) Se ha determinado los parámetros eléctricos y la aplicabilidad de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas, mediante pruebas experimentales, los cuales, en términos de voltaje generado por los 7 Prototipos, alcanzaron los siguientes valores:
  - Voltaje sin carga promedio por celda: 0.8643 Voltios medidos en 42 celdas galvánicas
  - Voltaje sin carga total promedio de los 7 Prototipos: de 5.2254 Voltios.

- Voltajes con carga eléctrica, de valores diversos empleando los 7 Prototipos con distintas cargas.

Los parámetros resultantes son de pequeña potencia, por lo tanto, la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas se puede aplicar en:

- Enseñanza de cursos de físico química en las carreras de ingeniería y afines en Universidades, Institutos, Escuelas y Colegios, desde la Educación Primaria hasta la Educación Superior. Con el objeto de incentivar y promover la investigación e innovación.
- En iluminación con lámparas de diodos Led.
- Emisión de señales luminosas para sistemas y circuitos.
- En señalética.
- Continuar la línea de investigación y utilización de diversos materiales alternos tanto en los electrodos, electrolito y cualquiera de sus componentes en busca de beneficios para la humanidad y el medio ambiente.

Lo anterior se sustenta en las siguientes características de los Prototipos:

- Son completamente inocuos para el medio ambiente, personas, animales y plantas.
- Para su manipulación no requieren especiales medidas de protección ni de seguridad ya que no representan riesgo significativo ni peligro de explosión, quemaduras, inhalación de gases tóxicos ya que no emiten vapores dañinos.
- A diferencia de las baterías y pilas existentes que utilizan metales pesados, ácidos corrosivos, emiten gases tóxicos y que causan contaminación ambiental, los mismos que de ser empleados inadecuadamente o sin las medidas de seguridad y protección, podrían causar daños al medio ambiente,

daños materiales y personales como: explosión, quemaduras, intoxicación e inhalación de vapores de gases tóxicos.

- Lo anterior, es en razón a que, en el diseño y construcción de los Prototipos, no se emplean metales pesados, contaminantes ni ácidos corrosivos.

## VII. RECOMENDACIONES

- a) Continuar desarrollando diseños alternos para aumentar escalabilidad de la potencia eléctrica de los Prototipos presentados en este trabajo de investigación.
- b) Ampliar el estudio sobre el ciclo de vida a largo plazo variando las características de diseño, empleando dimensiones y materiales de distintas dimensiones, superficie, electrolito, estudiar el fenómeno y sus resultados.
- c) Realizar estudios adicionales sobre la huella ambiental de la tecnología, el análisis del impacto en diferentes ecosistemas, la estabilidad operativa y las posibilidades de colaborar con la industria, educación, salud, comercio y la comunidad en general.

## VIII. REFERENCIAS

- Aguirre, O. A. (2013). *Celdas de hidrógeno y su potencial de aplicación*. Universidad Veracruzana. <https://studylib.es/doc/4895172/celdas-de-hidr%C3%B3geno-y-su-potencial-de-aplicaci%C3%B3n>
- Alfonso, F., & Gómez, D. (2019). Clarificación de agua con generación de energía eléctrica en una celda galvánica Al-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *Schemantic Scholar*, 16. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.5106>
- Al-Ghazawi, Z., Qasaimeh, A., & Bani, K. (2018). Ablution grey water quantitative assessment and treatment by submerged membrane bioreactor: A case study in Jordan. *Desalination and Water Treatment*, 127, 213-221. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22790>
- Alzate, L., Fuentes, C., Álvarez Gallegos, A., & Sebastian, P. (2008). Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM. *Revista Interciencia*, 33(7). [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000700008](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000700008)
- Ashleigh, F. D. (2012). *Chemistry for chemical engineers* (2012 ed.). (D. A. 978-87-403-0249-3, Ed.). Bookbon. <https://dl.icdst.org/pdfs/files1/709715dd2af444e8a04bc5490a7649c1.pdf>
- Ávila, J. (2021). Leyes de la electrólisis de Faraday. *EcuRed*. [https://www.ecured.cu/Leyes\\_de\\_la\\_electrólisis\\_de\\_Faraday](https://www.ecured.cu/Leyes_de_la_electrólisis_de_Faraday)
- Brown, D. (2004). *Guía para el manejo de excretas y aguas residuales municipales*. Guatemala: PROARCA/SIGMA. [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/BROWN%202004.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Manejo%20de%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales.PDF](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/BROWN%202004.%20Gu%C3%ADa%20para%20el%20Manejo%20de%20Excretas%20y%20Aguas%20Residuales.PDF)

- Bustamante, K., Ramirez Reyes, R. A., & Mora-Loor, J. L. (2020). Las reacciones electroquímicas y su importancia en el futuro del suministro de energía. *Dominio de las ciencias*, 6(4), 143. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i4.1457>
- Castillo, J., & Chimbo, J. (2021). Eficiencia en la remoción de materia orgánica mediante lombrifiltros (*Eisenia foetida*) en aguas residuales domésticas para zonas rurales. *Enfoque UTE*, 12(2). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.746>
- Cerón, M. L., & Soto Bubern, A. (2004). *Elementos de electroquímica*. Academia de Ciencias Galilei. <http://www.acienciasgalilei.com/alum/qui/Redox-pilas.pdf>
- Chamizo, J. A. (2018). *Química general: Una aproximación histórica*. Comité Editorial de la Facultad de Química. <https://librooa.unam.mx/handle/123456789/2806>
- Christova, D., Eden, R., & McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106(1-3), 395. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00134-8)
- Cora Repuello, B. (2019). *Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales municipales utilizando celdas de combustible microbiano (MFC) en la ciudad de Huancavelica*. Universidad Nacional de Huancavelica. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/06d65641-cf6b-400b-b979-9f6d518b8d22/content>
- Doeff, M. M. (2011). *Batteries: Overview of battery cathodes*. ResearchGate, 5. [https://www.researchgate.net/publication/242013182\\_Batteries\\_Overview\\_of\\_Battery\\_Cathodes](https://www.researchgate.net/publication/242013182_Batteries_Overview_of_Battery_Cathodes)
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. *Anales Sis San Navarra*, 26(Suplemento 1), 141–153. <https://scielo.isciii.es/pdf/asisna/v26s1/ocho.pdf>

- Floramis, M., Ordoñez, T., & Hernández Touse, J. P. (2016). Sistema de tratamiento para las aguas residuales en la empresa de aprovechamiento hidráulico Villa Clara. *Centro Azúcar*, 43(2). <https://doi.org/10.23857/dc.v6i4.1457>
- Forti, V., Peter Baldé, C., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2020*. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/gen/D-GEN-E\\_WASTE.01-2020-PDF-S.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/gen/D-GEN-E_WASTE.01-2020-PDF-S.pdf)
- García, J., Bautista, M., Hernández, A., & Zumaya, R. (2017). Generación de energía eléctrica a partir de aguas residuales en una celda de combustible microbiana. *Revista de operaciones tecnológicas*, 1(3), 48–56. [https://www.ecorfan.org/taiwan/research\\_journals/Operaciones\\_Tecnologicas/vol1num3/Revista\\_de\\_Operaciones\\_Tecnologicas\\_V1\\_N3\\_7.pdf](https://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Operaciones_Tecnologicas/vol1num3/Revista_de_Operaciones_Tecnologicas_V1_N3_7.pdf)
- Ghaitidak, D., & Yadav, K. (2016). Greywater treatment for reuse: Comparison of reuse options using analytic hierarchy process. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 6, 17. <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.177>
- Instituto para la Salud Geoambiental. (2017, enero 2). *Tóxicos ambientales*. <https://www.saludgeoambiental.org/toxicos-ambientales/>
- Logan, B. (2010). Scaling up microbial fuel cells and others. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1665–1671. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2378-9>
- López Vásquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. IWA Publishing, 16, 592. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>
- Meléndez, J., Lima, M., Domínguez, I., & Oviedo Ocaña, R. (2019). Reutilización de aguas grises domésticas para el uso eficiente del recurso hídrico: Aceptación social y análisis financiero. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 223–226.

<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/57182/1/2925-8781-Texto%20del%20art%C3%ADculo-40351-2-10-20181005.pdf>

- Moura, S. J., & Pérez, H. E. (2014). Better batteries through electrochemistry. *Mechanical Engineering*, 15. [https://www.researchgate.net/profile/Hector-Perez-22/publication/280925374\\_Better\\_Batteries\\_Through\\_Electrochemistry/links/55cd029b08aceaab209b4e5a/Better-Batteries-Through-Electrochemistry.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hector-Perez-22/publication/280925374_Better_Batteries_Through_Electrochemistry/links/55cd029b08aceaab209b4e5a/Better-Batteries-Through-Electrochemistry.pdf)
- OLADE. (2021). *Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe (ALC) y sus perspectivas*. <http://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/06/Situacion-del-consumo-energetico-a-nivel-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC-y-sus-perspectivas.pdf>
- PNUMA. (2012). *GEO-5*. Nueva York: Edición de Naciones Unidas. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-5>
- PNUMA. (2016). *El desarrollo sostenible en la práctica la aplicación de un enfoque integrado en América Latina y el Caribe*. Brasil: PNUMA. [https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/desarrollo\\_sostenible\\_a\\_la\\_practica.pdf](https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/desarrollo_sostenible_a_la_practica.pdf)
- RAE. (2021, octubre). *Diccionario de la lengua española | Edición del Tricentenario*. Recuperado el 8 de diciembre de 2017, de RAE - Real Academia Española: <http://dle.rae.es/?id=ObWMmRJ>
- Ramón, J., León, J., & Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46–54. <https://doi.org/10.21789/22561498.1018>
- Raymond, C. (2002). *Química*. McGraw Hill.
- Rezagos, S. (2021). *Scrap & Rezagos*. <https://www.rezagos.com/riesgos-para-la-salud.html>

- Ministerio de Salud. (6 enero de 2015). Norma técnica de salud que establece la vigilancia epidemiológica en salud pública de factores de riesgo por exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides (NTS N° 111 – 2014-MINSA/DGE - V.01). Lima, Perú. <https://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/3477.pdf>
- Sánchez, M., Lenys, F., & Espinoza Montero, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Novasinerгия*, 165. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>
- Silvera, M. P. (1999). *Física cuántica* (I. S. Nucleares, Ed.). La Habana, Cuba: Editorial ISCTN. [https://www.ehu.eus/chemistry/theory/wordpress/wp-content/uploads/fisica\\_cuantica\\_Piris.pdf](https://www.ehu.eus/chemistry/theory/wordpress/wp-content/uploads/fisica_cuantica_Piris.pdf)
- Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & Vilches, C. (2016). *La industria de la electricidad en el Perú: 25 años de aportes al crecimiento económico*. GRÁFICA BIBLOS S.A. [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anos.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Electricidad-Peru-25anos.pdf)
- Zapata, F. (2021). *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/modelo-atómico-bohr/>
- Zhuwei, D., Haoran, L., & Tingyue, G. (2007). Review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464–468. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>

## IX. ANEXOS

## ANEXO A: FICHA TÉCNICA DEL MULTÍMETRO UTILIZADO

Figura 58.

Multímetro Kyoritsu 1009

Fabricante	Kyoritsu
Tipo de medidor	multímetro digital
Medición	frecuencia, tensión AC, tensión DC, capacidad, corriente AC, de corriente DC, resistencia
Clase de display empleado	LCD (3999)
Rango de medición de tensión CC	400m/4/40/400/600V
Exactitud de medición de tensión CC	$\pm(0,6\% + 4 \text{ cifras})$
Rango de medición de corriente CC	400 $\mu$ /4000 $\mu$ /40m/400m/4/10 <sup>a</sup>
Exactitud de medición de corriente CC	$\pm(1\% + 4 \text{ cifras})$



Fuente: Elaboración propia

## ANEXO B: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL MULTÍMETRO UTILIZADO

 <b>EQUINLAB</b> S.A.C. Equipamiento Instrumentación Industrias y Laboratorios		LABORATORIO DE CALIBRACIÓN CON PATRONES DE TRAZABILIDAD NACIONAL AL INACAL E INTERNACIONAL AL NIST CENAM DAKKS, ENAC, DKD												
		<b>INGENIERIA EN METROLOGIA</b>												
Empresa de Servicios Metrologicos de Verificación, Calibración y Emisión de Certificados Adujando la Trazabilidad de Nuestros Patrones Nacionales o Internacionales														
* 1.810 / 400 kgm <sup>3</sup> / 27.36 / 3.642w / 81.0% R / 14.75mm / 100.4gpm / 20m / 4.800pa / 1.02 psf / 22.2°C / 72.6°F / 1.821 % / 408 kgm <sup>3</sup> / 75.2°F / 5.95 / 400kgm <sup>3</sup> / 27.3M / 3.642w														
<b>CERTIFICADO DE CALIBRACION N° CLE-555-2021</b> Página 1 de 3 Fecha de Emisión: 2021-06-02 Expediente: EILL-9027-2021														
<b>INSTRUMENTO: MULTIMETRO</b> Marca: KYORITSU Modelo: 1009 Identificación: NO INDICA Serie: A0247044 Ubicación: CAMPO														
<b>SOLICITANTE: HUGO RAUL RIVERA AQUINO</b> Dirección: MZ "O" LT 21 LOS NISPEROS - SAN MARTIN DE PORRES														
<b>CALIBRACIÓN: Fecha 2021-06-01</b> Lugar: Av. Universitaria 2786 Mz G Lt 43 - Los Olivos - Lima - Lima Método: Tomando como referencia el PC-021 "Procedimiento para la calibración de Multimetros Portátiles" 2 da.Ed. Marzo-2016, DM INACAL.														
<b>RESULTADO DE LAS MEDICIONES:</b> E.M.P = Error Máximo permisible. La incertidumbre de la medición que se presenta estaba basada en una incertidumbre estándar multiplicado por un factor de cobertura K=2, el cual proporcionada un nivel de confianza de aproximadamente 95%.														
<b>CONDICIONES AMBIENTALES:</b> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Inicial</th> <th>Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperatura(°C)</td> <td>19,7</td> <td>19,8</td> </tr> <tr> <td>Humedad relativa(%HR)</td> <td>71,8</td> <td>70,2</td> </tr> </tbody> </table>				Inicial	Final	Temperatura(°C)	19,7	19,8	Humedad relativa(%HR)	71,8	70,2			
	Inicial	Final												
Temperatura(°C)	19,7	19,8												
Humedad relativa(%HR)	71,8	70,2												
<b>PATRONES DE REFERENCIA:</b> <table border="1" style="width: 100%;"> <thead> <tr> <th>Trazabilidad</th> <th>Patrón utilizado</th> <th>Certificado de calibración</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DM - INACAL</td> <td>Multimetro FLUKE 8846A</td> <td>LE-095-2020</td> </tr> <tr> <td>DM- INACAL</td> <td>Termo higrómetro LUFFT OPUS 20</td> <td>LH-014-2020</td> </tr> <tr> <td>IPT</td> <td>Década de Resistencias MEGABRAS CPR-20G</td> <td>167514-101</td> </tr> </tbody> </table>			Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración	DM - INACAL	Multimetro FLUKE 8846A	LE-095-2020	DM- INACAL	Termo higrómetro LUFFT OPUS 20	LH-014-2020	IPT	Década de Resistencias MEGABRAS CPR-20G	167514-101
Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración												
DM - INACAL	Multimetro FLUKE 8846A	LE-095-2020												
DM- INACAL	Termo higrómetro LUFFT OPUS 20	LH-014-2020												
IPT	Década de Resistencias MEGABRAS CPR-20G	167514-101												
<b>OBSERVACIONES:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>La periodicidad de la calibración está en función del uso, conservación y mantenimiento del instrumento de medición o reglamentos vigentes.</li> <li>Los resultados de las mediciones se muestran a partir de la página 02 del documento</li> <li>El valor indicado del equipo que se muestra en la tabla es el promedio de 5 valores medidos.</li> <li>Se colocó una etiqueta con la indicación de "CALIBRADO".</li> </ul>														
 Ing. Roger Cuervo Zuta Jefe de Metrología														
PROHIBIDO SU REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE EQUINLAB S.A.C.														
Av. Universitaria 2786 Mz G LT 43 Los Olivos - Lima - Lima Telf.: (01) 677-6611 / (01) 336-4538 Cel.: 939294882 / 946480783 E-mail: ventas@equinlabsac.com / metrologia@equinlabsac.com / www.equinlabsac.com														

**ANEXO C: MATRIZ DE CONSISTENCIA TESIS: “GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTROQUÍMICA REUTILIZANDO AGUAS GRISES DOMÉSTICAS”**

<b>PROBLEMA PRINCIPAL</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPÓTESIS GENERAL</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>DISEÑO</b>	<b>MÉTODO</b>
¿De qué manera es posible generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?	Generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.	Reutilizando aguas grises domésticas, en un diseño Prototipo, se genera energía electroquímica.	<b>Independiente</b>  <b>Electrolito:</b> • Aguas grises domésticas.	<b>Independiente</b>  <b>Electrolito – Aguas grises domésticas:</b> Volumen de aguas grises Centímetros cúbicos (cm <sup>3</sup> ) Características físico químicas del agua gris reutilizado.	<b>Universo:</b>  <b>Agua gris doméstica reutilizada:</b> • Agua gris domestica	<b>Tipo de investigación:</b> Experimental  <b>Nivel de investigación:</b> • Experimental. • Cuantitativa.  <b>Método:</b> Diseño y construcción de Prototipos de Celdas galvánicas. Experimentación: Observación, medición de valores de la variable dependiente, registro, análisis y síntesis.  <b>Procesamiento de datos</b> Gráficos de curvas de tensión, corriente, potencia y energía.
<b>PROBLEMAS ESPECÍFICOS</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b>	<b>Celda galvánica:</b> • Electroodos. • Separadores. • Caja.	<b>Celda galvánica electrodos:</b> • Dimensiones de celda: Largo, ancho, espesor. Centímetros (cm), • Material de electrodos: Planchas de metales especialmente seleccionados para electrodos positivo y negativo.	<b>Agua gris doméstica reutilizada:</b> • Agua gris domestica  • Agua gris doméstica procedente de lavaderos domésticos: Cocina y lavatorios.	
PE1: ¿Cuál es la literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?	OE1: Determinar cuál es la literatura existente relacionada a la generación de energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.				<b>Celdas galvánicas:</b> Prototipos construidos de acuerdo con los principios teóricos de la celda de Luigui Galvani.	
PE2: ¿Cómo se podría generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas?	OE2: Diseñar y construir un Prototipo, para generar energía electroquímica, reutilizando aguas grises domésticas.	Con un Prototipo de celda galvánica, especialmente diseñado y construido, se demuestra que reutilizando aguas grises domésticas se genera energía electroquímica.				
PE3: ¿Cuáles son los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas?	OE3: Determinar los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas.	Mediante pruebas experimentales, se determina los parámetros eléctricos de la energía electroquímica generada reutilizando aguas grises domésticas en celdas galvánicas.	<b>Dependiente</b>  Potencial eléctrico generado.	<b>Dependiente</b>  <b>Energía electroquímica generada:</b>  • Tensión: Voltios (V).	<b>Lugar:</b> Jesús María- Lima.	

Fuente: Elaboración propia