

Universidad de Lima
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Carrera de Ingeniería Industrial



**“ESTUDIO DE EFICACIA DE
DESINFECCIÓN EN BASE A IONES
FERRATO PARA LA REMEDIACIÓN DE
AGUA CONTAMINADA CON SALMONELLA
TYPHIMURIUM DESTINADA AL RIEGO DE
CULTIVOS”**

Trabajo de investigación para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial

Paloma Mogrovejo García

Código 20121960

Renato Cocchella Beas

Código 20132690

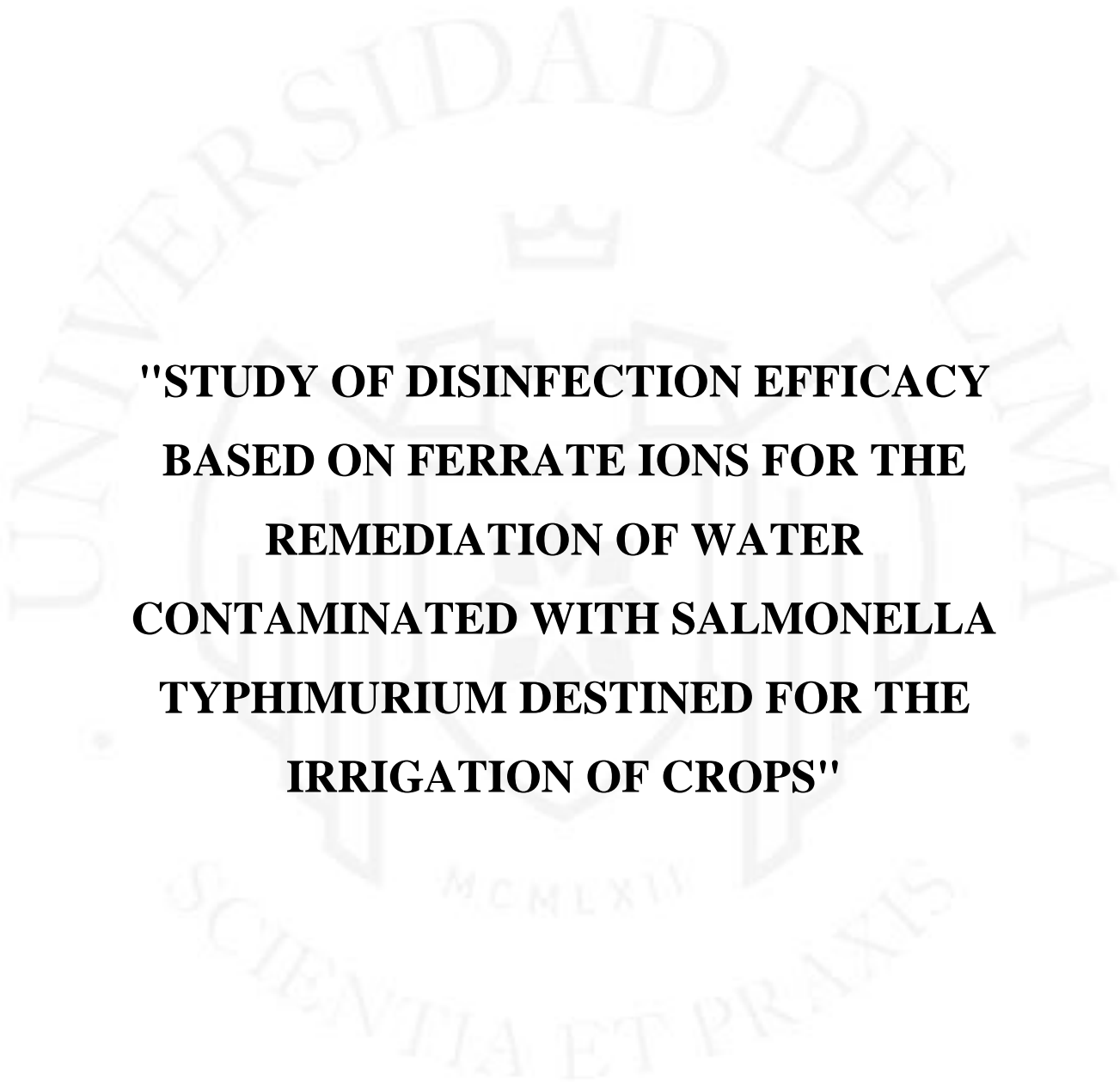
Asesor

Javier M. Quino Favero

Lima – Perú

Octubre de 2019





**"STUDY OF DISINFECTION EFFICACY
BASED ON FERRATE IONS FOR THE
REMEDICATION OF WATER
CONTAMINATED WITH SALMONELLA
TYPHIMURIUM DESTINED FOR THE
IRRIGATION OF CROPS"**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES	3
1.1 Problemática.....	3
1.1.1 La agricultura y el agua de riego	3
1.1.2 Contaminación de cultivos	5
1.2 Objetivos generales y específicos.....	7
1.2.1 Objetivo General	7
1.2.2 Objetivos Específicos	7
1.3 Alcance.....	7
1.4 Justificación.....	8
1.4.1 Técnica	8
1.4.2 Económica.....	8
1.4.3 Social.....	8
1.5 Hipótesis general y específicas.....	8
1.5.1 Hipótesis general	8
1.5.2 Hipótesis específicas	9
1.6 Variables independientes y dependientes.....	9
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	10
2.1 Historia del ferrato, primeros descubrimientos, definición, propiedades físicas y químicas.....	10
2.2 Desarrollo de métodos de síntesis	14
2.3 Determinación de la concentración de las sales de ferrato.....	15
2.3.1 Métodos volumétricos	15
2.3.2 Métodos electroquímicos	16

2.3.3	Métodos espectrofotométricos	18
2.4	Optimización de parámetros para producción de ferrato (VI) por método electroquímico	22
2.4.1	Tipo de ánodo (geometría, composición, activación)	25
2.4.2	Composición y concentración del electrolito	27
2.4.3	Densidad de corriente	27
2.4.4	Temperatura.....	29
2.5	Uso del ferrato (VI) para purificación de aguas contaminadas	29
2.5.1	Otras tecnologías para la purificación de aguas contaminadas	31
2.6	Otros usos del ferrato (VI).....	35
2.7	Potencial de industrialización del ferrato (VI)	38
2.8	Pruebas de mutagénesis.....	38
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y EQUIPOS		40
3.1	Reactivos	40
3.2	Equipos.....	41
3.2.1	Maquinaria para la fabricación del reactor con alimentación solar.....	41
3.2.2	Equipo para los ensayos de desinfección	42
CAPÍTULO 4. MÉTODOS EXPERIMENTALES		50
4.1	Muestreo de aguas	50
4.2	Comprobación de pureza de cepa: Método de extendido en placa	50
4.3	Curva de crecimiento de bacterias.....	52
4.4	Estimación de concentración de bacterias en base a la turbidez de la solución bacteriana	53
4.5	Método de conteo bacteriano: Siembra por extensión	55
4.6	Método de conteo bacteriano: Filtrado por membrana usando caldo M-Endo	56
4.7	Preparación de soluciones salinas: PBS y tiosulfato de sodio.....	58

CAPÍTULO 5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE IONES FERRATO CON UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN SOLAR.....	60
5.1 Diseño de reactor.....	60
5.1.1 Prueba de esfuerzos sobre el reactor	62
5.2 Diseño del sistema de alimentación solar.....	63
5.2.1 Módulo de generación	63
5.2.2 Módulo regulador de corriente	65
5.3 Construcción del reactor de producción de iones ferrato con alimentación solar.	68
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	70
6.1 Producción de iones ferrato a través de la disolución anódica de un electrodo de hierro y determinación de su concentración molar.....	70
6.2 Construcción de curva de crecimiento de la bacteria <i>Salmonella typhimurium</i> para determinar la duración de sus fases de desarrollo.....	71
6.3 Construcción de una curva que relacione la turbidez de la solución bacteriana con su concentración.	72
6.4 Ensayo de desinfección en agua real para riego con inóculo de bacteria <i>S. typhimurium</i> contra varias concentraciones de ferrato (VI)	74
6.5 Ensayo de desinfección en agua real para riego con bacterias propias contra varias concentraciones de ferrato (VI)	78
6.6 Evaluación de la inversión y del costo de tratamiento del agua para riego con los iones ferrato	82
CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS.....	87
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXOS.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Productores agropecuarios según procedencia de agua de riego.....	4
Tabla 1.2	Principales agentes infecciosos presentes en las aguas para riego agrícola ...	4
Tabla 2.1	Compuestos de hierro con diferentes estados de oxidación	10
Tabla 2.2	Agentes oxidantes comunes y su potencial de reducción	12
Tabla 2.3.	Tabla de parámetros usados en otras investigaciones.....	26
Tabla 2.4	Eficiencia energética frente a distintas densidades de corriente testeadas	28
Tabla 2.5	Cuadro comparativo de las distintas tecnologías de desinfección de agua ...	34
Tabla 2.6	Capacidad de carga teórica de diferentes sales de Fe (VI)	36
Tabla 3.1	Reactivos usados en este estudio	40
Tabla 6.1	Composición del ánodo	71
Tabla 6.2	Caracterización de agua de reservorio INIA.	74
Tabla 6.3	Resultados de desinfección en agua de riego contaminada con <i>S. typhimurium</i>	76
Tabla 6.4	Resultados de los parámetros del agua post-tratamiento.....	78
Tabla 6.5	Resultados de desinfección en agua de riego con bacterias propias.....	79
Tabla 6.6	Resultados de los parámetros del agua sin filtrar post-tratamiento	81
Tabla 6.7	Desglose de inversión requerida para fabricar el reactor.....	82
Tabla 6.8	Desglose de inversión para el módulo de generación de energía solar	82
Tabla 6.9	Desglose de inversión requerida para el módulo controlador de corriente....	83
Tabla 6.10	Costos de depreciación anual.....	84

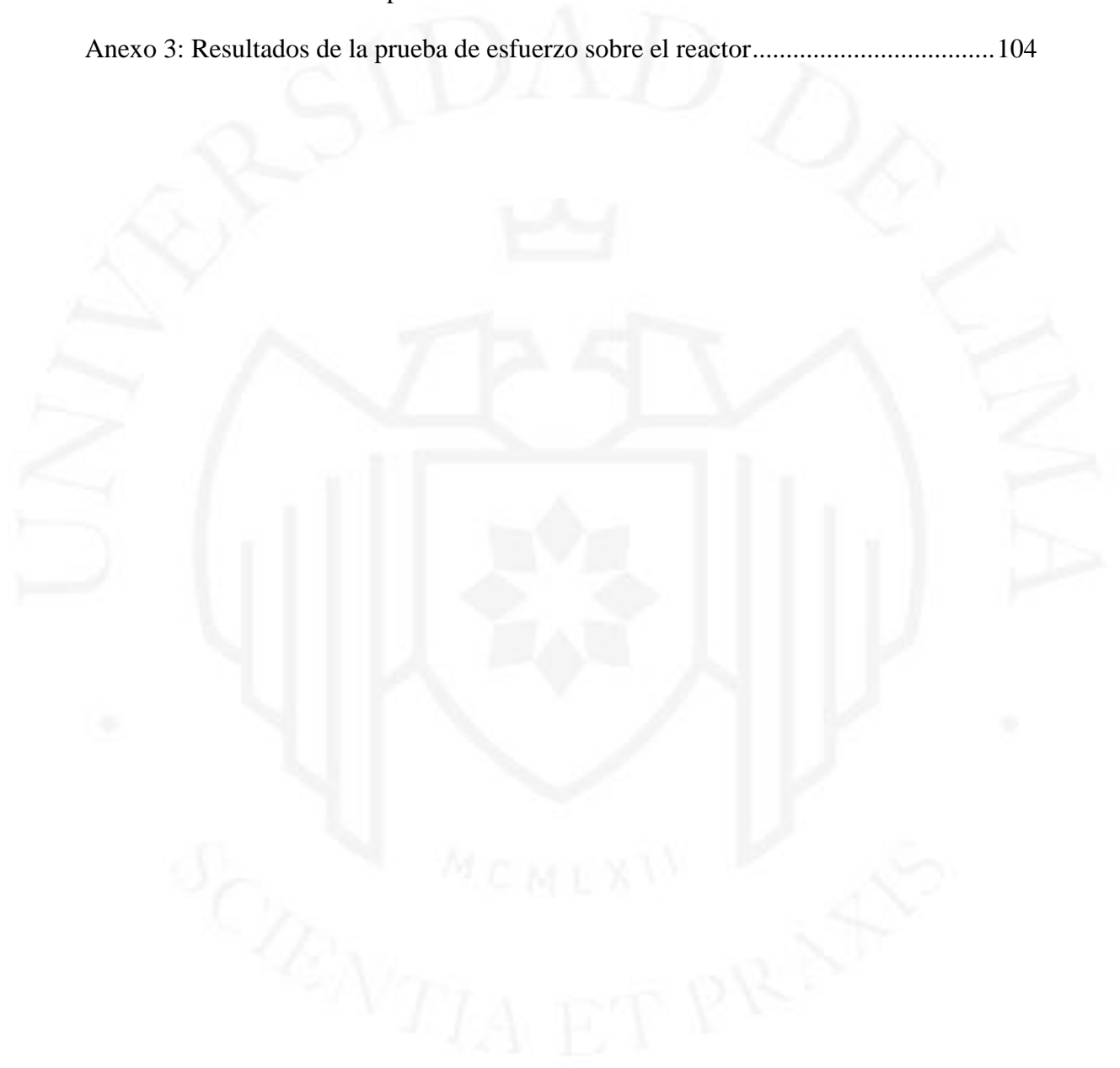
ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructuras de resonancia del anión FeO_4^{2-} en solución acuosa.....	13
Figura 2.2 Representación tridimensional del anión FeO_4^{2-}	13
Figura 2.3 Distribución de especies de Fe (VI) en solución acuosa vs pH.....	13
Figura 2.4 Voltamperograma cíclico de Fe (VI) en medio básico.....	17
Figura 2.5 Curvas de titulación potenciométrica de iones FeO_4^{2-}	18
Figura 2.6 Espectro IR de sales de Fe (VI).....	19
Figura 2.7 Espectro de Mössbauer de K_2FeO_4	20
Figura 2.8 Intensidad luminosa vs concentración de ferrato (VI) con escopoletina.....	22
Figura 2.9 Voltametría cíclica de ferrato (VI)	24
Figura 2.10 Tipos de ánodo	25
Figura 2.11 Efecto de la densidad de corriente en la producción de ferrato (VI).....	28
Figura 2.12 Efecto de la temperatura en la producción de ferrato (VI).....	29
Figura 2.13 Sistema on-line para tratamiento de agua usando iones ferrato (VI)	31
Figura 3.1 Fresadora CNC	41
Figura 3.2 Prensa de termo transferencia.....	41
Figura 3.3 Taladro de banco	42
Figura 3.4 Autoclave.....	42
Figura 3.5 Agitador magnético	43
Figura 3.6 Bomba de vacío	43
Figura 3.7 Cámara de flujo laminar	44
Figura 3.8 Centrífuga.....	44
Figura 3.9 Espectrofotómetro UV-VIS.....	45
Figura 3.10 Fuente de poder	45

Figura 3.11 Incubadora microbiológica compacta	46
Figura 3.12 Incubadora de baja temperatura	46
Figura 3.13 Medidor multiparámetro.....	47
Figura 3.14 Multímetro.....	47
Figura 3.15 Potenciómetro.....	48
Figura 3.16 Test de jarras	48
Figura 3.17 Turbidímetro.....	49
Figura 3.18 Vórtex.....	49
Figura 4.1 Método de estriado en placa.....	52
Figura 4.2 Curva de crecimiento bacteriano.....	53
Figura 4.3 Relación entre la densidad óptica y el número de bacterias.....	54
Figura 4.4 Método de siembra por extensión de inóculo.....	56
Figura 4.5 Método de filtro por membrana.....	57
Figura 4.6 Colonias de <i>E. coli</i> y <i>Salmonella typhimurium</i> en caldo M-Endo	58
Figura 5.1 Vistas frontal e isométrica de la cámara anódica	61
Figura 5.2 Vista isométrica de componentes del reactor en software SolidWorks	61
Figura 5.3 Prueba de esfuerzos empleando una fuerza de 2,8 KN por perno.....	62
Figura 5.4 Esquema del sistema de producción de iones ferrato en software Proteus ..	66
Figura 5.5 Simulación del circuito controlador de carga.....	67
Figura 5.6 Disposición real de componentes del circuito en software Eagle	68
Figura 5.7 Esquema del módulo de producción de iones ferrato.....	69
Figura 6.1 Fotografía de módulo de producción de iones ferrato.....	70
Figura 6.2 Curva de crecimiento bacteriano	72
Figura 6.3 Curva de calibración de ufc/L vs. turbidez.....	73
Figura 6.4 Desinfección de agua de riego contaminada con <i>S. typhimurium</i>	77
Figura 6.5 Desinfección en agua real de riego con bacterias propias.....	81

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: ECA Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales	100
Anexo 2: Planos de los componentes del reactor	101
Anexo 3: Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el reactor.....	104



RESUMEN

La investigación propone demostrar la efectividad de los iones ferrato (VI) para el tratamiento de agua destinada al riego de cultivos. La propuesta surge en un contexto en el que se requiere aumentar la disponibilidad de agua apta para su uso en el sector agrícola, que se encuentra amenazado por diversos factores. El uso de tecnología basada en iones ferrato, una especie química muy oxidante, es ideal para resolver esta necesidad debido a que permite desinfectar el agua de manera rápida, efectiva, económica y amigable con el medio ambiente. Esta investigación es planteada en el marco del proyecto “093_PI”, que fue presentado por la Universidad de Lima y se desarrolló en conjunto con el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

Se diseñó y construyó un reactor capaz de producir iones ferrato (VI) a escala de laboratorio y un sistema de alimentación de energía solar adaptado a sus condiciones de operación; se evaluó la eficacia desinfectante sobre agua real de riego del estanque del INIA, usando tanto su carga microbiológica nativa como la bacteria modelo *Salmonella Typhimurium ATCC 14028*.

Como resultado, se obtuvo dos reducciones logarítmicas utilizando una dosis de 3,0 mg FeO_4^{2-} por litro y cuatro reducciones logarítmicas con 5,5 mg FeO_4^{2-} por litro. Se concluye que el tratamiento con iones ferrato (VI) fue efectivo para desinfectar el agua usada en este estudio.

Finalmente, se realizó un análisis económico en el que se calculó que la inversión requerida para la construcción del módulo a escala de laboratorio tuvo un valor de S/ 321 mientras que los costos de operación ascienden a S/ 0,51 por gramo de ferrato (VI).

Palabras clave: ferrato, desinfección de agua, riego de hortalizas, oxidación, salmonella

ABSTRACT

The present research aims to prove the effectiveness of the ferrate (VI) ions in disinfecting water for its further use in crop irrigation. The proposal arises in a context in which it is necessary to increase the availability of water suitable for use in the agricultural sector, which is threatened by many factors. The use of technology based on ferrate ions, a very oxidant chemical species, is ideal to solve this need because it allows to disinfect the water quickly, effectively, economically and eco-friendly. This research is presented in the framework of the project "093_PI", which was propounded by the University of Lima and is developed in cooperation with the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA).

First of all, a lab scale reactor capable of producing ferrate ions was designed and built, as well as a power solar system adapted to its operation conditions. Then, its disinfectant effectiveness was tested over irrigation water from the pond of the INIA, using both its own microbial load and the bacteria *Salmonella Typhimurium ATCC 14028*.

In the first case, a two log reduction was achieved using a dose of 3,0 mg FeO_4^{2-} , whilst a four log reduction was achieved using a dose of 5,5 mg FeO_4^{2-} . In both cases, it was concluded that the treatment with ferrate (VI) ions was effective for disinfecting the water used in this study.

Finally, an economic analysis was performed and it was calculated that the capital expenditure required to build the lab scale module had a value of S/ 321 while the operative costs were S/ 0,51 per gram of ferrate (VI).

Keywords: ferrate, water disinfection, vegetable irrigation, oxidation, salmonella

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Problemática

1.1.1 La agricultura y el agua de riego

La agricultura es una actividad económica muy importante en el Perú. En el año 2017 se consolidó como la segunda mayor generadora de divisas para el país (Ministerio de Agricultura y Riego, 2018). Al segundo trimestre del 2018, la agricultura, sumada a la pesca y minería significaron el ingreso de 4,01 millones de personas -que representan el 24,4% de los ocupados- y una contribución del 5,86% al PBI considerando sólo las actividades de agricultura y ganadería. Sin embargo, este sector tiene una huella hídrica muy considerable, pues usa el 76% de los recursos hídricos disponibles, según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015).

Actualmente existen varios factores que amenazan a la agricultura en el Perú. Un factor de especial preocupación es el cambio climático, pues provoca que las reservas naturales de agua disminuyan por el retroceso de los glaciares, que el patrón de lluvias cambie y que se llegue a situaciones de estrés hídrico. Además, está la existencia de grandes diferencias hidrológicas y de infraestructura entre las regiones: La costa alberga alrededor del 63% de la población y solo cuenta con el 2% de los recursos hídricos, en cambio, en la selva se concentra cerca del 98% de estos, pero tiene una baja densidad poblacional y un escaso desarrollo industrial (ANA, 2015).

También es importante mencionar que se utiliza una tecnología muy rudimentaria en el sector agrícola, lo que se traduce en un mal aprovechamiento de los recursos naturales; por ejemplo, los productores que utilizan reservorios o represas para almacenar el agua en épocas de lluvia representan solo el 11,2% del total nacional (Tabla 1.1) y están ubicados en su mayoría en la costa (Salazar, 2013).

Por último, se encuentra el deterioro de la calidad del agua existente cuya razón principal es el vertimiento de efluentes municipales e industriales a las aguas superficiales. De estas, los ríos constituyen la fuente principal de agua de riego en el Perú.

Tabla 1.1

Productores agropecuarios según procedencia de agua de riego

Tipo de procedencia del agua	Total productores	% productores
Pozo	48 322	4,5%
Río	518 833	48,6%
Laguna o lago	56 392	5,3%
Manantial o puquio	281 801	26,4%
Reservorio/represa	119 374	11,2%
Pequeño reservorio	31 887	3,0%
Otros	11 567	1,1%
Total	1 068 176	

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2012)

Todas las circunstancias mencionadas anteriormente hacen proclive el uso de aguas no seguras para el riego. El uso de agua no segura para riego de cultivos es motivo de enfermedades gastroentéricas, especialmente peligrosas en niños con malnutrición, adultos mayores de 60 años y pacientes inmunodeprimidos. La tabla 1.2 lista una serie de patógenos encontrados en aguas residuales domésticas que a su vez pueden estar presentes en aguas superficiales.

Tabla 1.2

Principales agentes infecciosos presentes en las aguas para riego agrícola

Agente patógeno	Enfermedad
Bacterias	
<i>Shigella</i> spp.	Shiguelosis (disentería bacilar)
<i>Salmonella typhi</i>	Fiebre tifoidea
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Escherichia coli</i> (entero patogénica)	Gastroenteritis y septicemia, síndrome urémico hemolítico
<i>Yersinia enterocolitica</i>	Yersiniosis (enterocolitis)
<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis, artritis reactiva
Protozoos	
<i>Entamoeba histolytica</i>	Amebiasis (disentería amebiana)
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (gastroenteritis)
<i>Cryptosporidium</i>	Criptosporidiosis, diarrea, fiebre
<i>Microsporidium</i>	Diarrea

(continúa)

(continuación)

Helmintos	
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis (infección por helmintos)
<i>Ancylostoma(spp.)</i>	Larva migrans cutáneo (infección por Anquilostomas)
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Estrongiloidiasis (infección por nematodos)
<i>Trichuris trichiura</i>	Tricuriasis (infección por T. trichiura)
<i>Taenia (spp.)</i>	Teniasis (infección por tenia)
Virus	
Enterovirus	Gastroenteritis, anomalías cardíacas, meningitis, otras
Virus de hepatitis A y E	Hepatitis infecciosa
Adenovirus	Enfermedad respiratoria, infecciones oculares, gastroenteritis
Rotavirus	Gastroenteritis
Parvovirus	Gastroenteritis

Fuente: ANA (2016)

1.1.2 Contaminación de cultivos

Cuando ocurre un brote por alguna enfermedad vinculada a una hortaliza es difícil atribuirlo a una causa puesto a que existen diversas fuentes de contaminación. Entre estas se encuentran el uso de estiércol contaminado, la manipulación con poca higiene, el descuido en la disposición de los materiales y equipos para labrar la tierra, la presencia de ganado en los campos de cultivo y el uso de agua de riego no adecuada (World Health Organization y Food and Agriculture of the United Nations, 2008) Entre todas las causas, el uso de agua de riego no segura es el principal vehículo de transmisión de infecciones gastrointestinales (Doyle, 1990).

Al contaminarse los cultivos por una de estas razones, existe otro problema: la persistencia de los patógenos. Esto significa no solo que los patógenos sobreviven con el pasar del tiempo en la superficie de las hojas, sino que penetran en estas a través de las estomas y se instalan en el sistema vascular de la planta, por lo que no desaparecerían con el lavado (Islam et al., 2004; Solomon, Yaron y Matthews, 2002; Soodb, Sahotap y Hunjanm, 2018).

En el Perú se han hecho estudios de contaminación en hortalizas. Un estudio realizado por Muñoz, Vilca, Ramos y Lucas (2013), realizado entre los años 2003 y 2004, encontró contaminación fecal en hortalizas de alto consumo en cuatro grandes mercados de la ciudad de Lima: La Parada, Ramón Castilla, Ceres y Caquetá. Se recolectaron tres

tipos de vegetales: lechuga, col y espinaca, una de cada una por puesto. De cada mercado se tomaron 45 verduras, resultando en un total de 180 muestras. El estudio demostró que el 18,9% del total de verduras presentaron niveles de coliformes superiores a lo establecido como apto por la *International Commission on Microbiological Specifications for Foods* (ICMSF, 1981).

Otro estudio realizado por Rivera, Rodríguez y López (2009) analizó cinco hortalizas en tres de los mercados más importantes de Cajamarca. La totalidad de las muestras (85) presentaron bacterias coliformes con NMP promedio por gramo muy por encima de 10^3 bacterias. En más del 40% de las hortalizas analizadas se determinó la presencia de coliformes fecales, siendo el perejil y la lechuga los que presentaron los índices más altos de contaminación con NMP mayores a 1 000 por gramo.

La elección de la bacteria del género *Salmonella* en este trabajo es relevante debido a que es una de las cuatro principales causas de enfermedades diarreicas. Además, se transmite generalmente por los alimentos y es una bacteria omnipresente y resistente, ya que puede sobrevivir durante semanas en un ambiente seco y varios meses en agua, según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018).

En Estados Unidos, un estudio entre el año 1996 y 2000 determinó que la salmonelosis fue la infección transmitida por alimentos más reportada en ese periodo, afectando mayormente a niños menores a 5 años. Asimismo, fue la causante del mayor número de hospitalizaciones y muertes, además de costos médicos directos por USD 365 millones anuales (Centers for Disease Control and Prevention, 2011). Dentro de las categorías de alimento que causan enfermedades infecciosas en dicho país están el pollo (12%), el cerdo (10%) y vegetales sembrados (10%) (Dewey-Mattia, Manikonda, Hall, Wise y Crowe, 2018). En el Perú la situación es similar, ya que entre el año 2010 y 2012, a través del Sistema de Vigilancia Epidemiológica, se reportaron en promedio 35 brotes anuales de enfermedades transmitidas por alimentos, 47% de los cuales se relacionaron clínicamente con casos agudos de salmonelosis (Soto, 2011).

Para garantizar la conservación del agua, el gobierno peruano cuenta con la norma de “Estándares de calidad de agua”, que considera a las aguas según su uso: poblacional y recreacional, para extracción y cultivo de especies acuáticas, para riego de vegetales y bebida de animales y para la conservación del ambiente acuático. La tabla del Anexo 1

contiene los estándares de calidad para riego de hortalizas (específicamente el subtipo agua para riego no restringido) que servirá de guía a este estudio.

1.2 Objetivos generales y específicos

1.2.1 Objetivo General

- Evaluar la efectividad de la desinfección de agua contaminada con microorganismos coliformes a base de iones ferrato (VI) a partir del diseño y construcción de un módulo a escala de laboratorio alimentado con energía solar.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y fabricar un reactor generador de iones ferrato a escala de laboratorio, así como un sistema de generación de energía solar para alimentarlo.
- Producir iones ferrato a través de la disolución anódica de un electrodo de hierro y evaluar la concentración molar producida.
- Construir una curva de crecimiento de la bacteria *Salmonella typhimurium* para determinar la duración de sus fases de desarrollo y otra curva que relacione la turbidez de la solución bacteriana con su concentración.
- Realizar ensayos de desinfección de *Salmonella typhimurium* en una matriz de agua de riego con varias concentraciones de ferrato (VI) y ensayos de desinfección en agua real para riego con varias concentraciones de ferrato (VI).
- Realizar una evaluación del costo de inversión y del costo de producción de ferrato (VI).

1.3 Alcance

Se construirá una unidad productora de iones ferrato (VI) a escala de laboratorio y alimentada por energía solar. Después, se evaluará la desinfección del agua proveniente del estanque del INIA contra varias concentraciones de ferrato. Esta desinfección se llevará a cabo partiendo de la propia carga microbiológica del agua, así como de un inóculo de la bacteria modelo *Salmonella typhimurium*. Esta bacteria se usará en

reemplazo de la bacteria *Salmonella typhi* (causante de la fiebre tifoidea), debido al riesgo que implica su manipulación y a que su comportamiento es casi idéntico (Garai, Gnanadhas y Chakravorty, 2012). También se realizarán pruebas con agua de riego del estanque mencionado sin ninguna alteración.

1.4 Justificación

1.4.1 Técnica

Es necesario mejorar la calidad del agua para aumentar la disponibilidad de agua apta para el riego. El uso de iones ferrato es ideal para este propósito debido a que es un oxidante con una cinética rápida, entonces actúa y se descompone sin dejar subproductos que maltraten a las plantas.

1.4.2 Económica

Resultados preliminares de pruebas realizadas en el laboratorio indican que el costo de tratamiento es bajo, aproximadamente S/ 0,07 /m³ de agua. (insumos sin inversión de capital).

1.4.3 Social

Se busca elevar tecnológicamente a agricultores haciéndolos acceder a un producto novedoso para tratar agua destinada al riego de hortalizas. Como principal beneficio, se espera reducir la incidencia de contaminación de cultivos, y, por tanto, los casos de enfermedades entéricas debidos a esta causa. Además, al usar agua tratada, se incrementaría la calidad y el valor de sus productos, haciéndolos aptos para mercados más exigentes.

1.5 Hipótesis general y específicas

1.5.1 Hipótesis general

- El uso de iones ferrato (VI) es efectivo para la desinfección de agua destinada para el riego de acuerdo a los lineamientos de los ECA para agua.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Un reactor electroquímico con alimentación de energía solar es apto para la producción de iones ferrato (VI) través de la disolución anódica de un electrodo de hierro a escala de laboratorio.
- El uso de iones ferrato (VI) es efectivo para la desinfección de agua contaminada con la bacteria modelo *S. typhimurium*.
- El uso de iones ferrato (VI) es efectivo para la desinfección de agua contaminada con las bacterias propias del estanque de agua del INIA.

1.6 Variables independientes y dependientes

Variables independientes:

- Masa de ferrato añadida al agua de riego

Variables dependientes:

- Número de bacterias inactivadas
- pH
- Oxígeno disuelto
- Turbidez
- Conductividad

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Historia del ferrato, primeros descubrimientos, definición, propiedades físicas y químicas.

El hierro es un metal que se encuentra en la naturaleza como hierro elemental o en sus formas oxidadas más comunes, hierro (II) y hierro (III). Este elemento es el segundo más común en la corteza terrestre y está presente en una amplia variedad compuestos con múltiples aplicaciones en los campos de nano tecnología, medicina, catálisis, energía y remediación ambiental (Sharma, Zboril y Varma, 2015).

Los ferratos, por su parte, son sales sintetizadas en laboratorio que resultan de la oxidación de hierro. Se caracterizan por poseer un color morado y por tener un alto poder oxidante. Los estados de oxidación del hierro en estas sales van desde +4 hasta +8, de los cuales el ferrato +6 es el que compete a este estudio. De los mencionados ferratos, este último es el más estable y fácil de sintetizar en comparación con los demás (Tsapin et al., 2000).

Tabla 2.1

Compuestos de hierro con diferentes estados de oxidación

Elemento/compuesto	Nombre	Mineral/sal
Fe	Hierro elemental	-
FeO	Óxido ferroso	Wustita
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico	Hematita,
Fe ₃ O ₄	Óxido ferroso férrico	Magnetita, Maghemita
FeOOH • nH ₂ O	Oxihidróxido de hierro	Limonita
FeO ₃ ²⁻ / FeO ₄ ⁴⁻	Ferrato (IV)	Na ₂ FeO ₃ , Na ₄ FeO ₄
FeO ₄ ³⁻	Ferrato (V)	K ₃ FeO ₄
FeO ₄ ²⁻	Ferrato (VI)	Na ₂ FeO ₄ , K ₂ FeO ₄
FeO ₅ ²⁻	Ferrato (VIII)	Na ₂ FeO ₅

Fuente: Tiwari y Lee (2011)

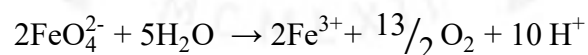
Elaboración propia

Los orígenes del ferrato se remontan a 1715 cuando el químico G.E. Stahl observó un color morado al disolver en agua una sal fundida conformada por una mezcla de nitratos de potasio y polvo de hierro. Un siglo más tarde, en 1834, volvió a sintetizarse una sustancia similar al calentarse una serie de mixturas de potasio y minerales de hierro. Pocos años después, en 1841, el físico J.C. Poggendorf documenta la aparición de un color morado luego de la oxidación de un ánodo de hierro en presencia de un electrolito fuertemente alcalino. El químico E. Fremy sugirió que este nuevo compuesto se trataría de FeO_3 , sin embargo, varios métodos demostrarían posteriormente que en efecto se trataba de hierro en dicho estado de oxidación (+6) pero en la forma de iones ferrato (FeO_4^{2-}). A comienzos del siglo XX el ferrato (VI) cobró interés por su competencia en el desarrollo de baterías de Ni-Fe y de súper baterías de hierro (Mácová et al., 2009).

Recientemente, el destacado poder oxidante del ferrato (VI) sobre compuestos orgánicos e inorgánicos, su acción desinfectante, así como el efecto coagulante y la inocuidad de sus subproductos lo colocan como una de las alternativas de remoción de contaminantes tóxicos más atractivas y eco amigables (Jiang y Lloyd, 2002; Sharma et al., 2015).

- **Propiedades físicas y químicas**

Los ferratos son sales poco estables en condiciones ambientales, ya que al entrar en contacto con el agua se descomponen para formar compuestos de Fe (III). Asimismo, las sales se descomponen cuando son calentadas a temperaturas superiores a los 250 °C, pasando antes por estados de oxidación +4 y +5.



En este sentido, las sales se mantienen más estables a bajas temperaturas, y pueden conservarse en estado sólido (en un ambiente exento de humedad), o disueltas en soluciones altamente básicas.

En cuanto al ferrato (VI), este posee un elevado potencial de reducción, que, en medio ácido, es mayor al de los agentes oxidantes más comunes (Ninane et al., 2008), tal como se ve en la tabla 2.2:

Tabla 2.2

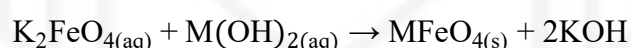
Agentes oxidantes comunes y su potencial de reducción

Agente oxidante	Potencial de reducción E_0 (V)	Medio
Ferrato (VI) ($H_3FeO_4^+$)	2,2	Ácido (pH = 0)
Ozono (O_3/O_2)	2,07	Ácido, neutro, básico.
Permanganato (MnO_4^-/MnO_4)	1,68	Ácido
Cloro (Cl_2/Cl^-)	1,51	Ácido
Ferrato (VI) ($HFeO_4^-$)	1,4	Neutro (pH = 7)
Hipoclorito ($HClO/Cl^-$)	1,3	Neutro
Hipoclorito ($HClO/Cl^-$)	<1	Alcalino
Ferrato (VI) (FeO_4^{2-})	0,7	Básico (pH = 14)
Permanganato (MnO_4^-/MnO_4)	0,59	Básico

Fuente: Ninane et al. (2008)

Elaboración propia

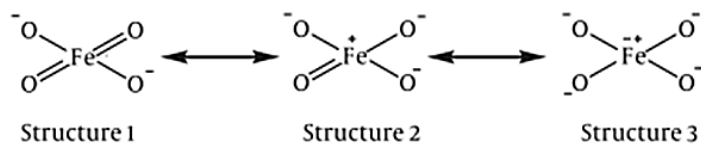
Existe una gran variedad de sales de ferrato (VI), siendo Na_2FeO_4 y K_2FeO_4 las más comunes. Estas dos sales son solubles en agua y se producen fácilmente por oxidación de un ánodo de hierro sólido en medio alcalino. Por otro lado, se tienen sales poco solubles como las de Cs, Rb, Li, Ba, Sr y Ag, que se preparan comúnmente por sustitución y precipitación a partir de las sales de sodio o potasio (Sharma y Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society, 2008).



En cuanto a su geometría, estudios de espectroscopía de rayos X, así como estudios de isótopos de oxígeno en medios acuosos, sugieren que el ferrato (VI) tiene una estructura tetraédrica conformada por un átomo de Fe en el centro rodeado por cuatro átomos de O con los que establece un enlace covalente (Hoppe, Schlemper y Murmann, 1982). Otros estudios sugieren además que el ion ferrato (VI) posee tres estructuras de resonancia híbridas, siendo la segunda y tercera las predominantes (Talaiekhosani, Bagheri, Talaei y Jaafarzadeh, 2016).

Figura 2.1

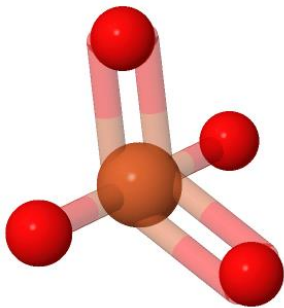
Estructuras de resonancia del anión FeO_4^{2-} en solución acuosa



Fuente: Talaiekhosani et al. (2016)

Figura 2.2

Representación tridimensional del anión FeO_4^{2-}

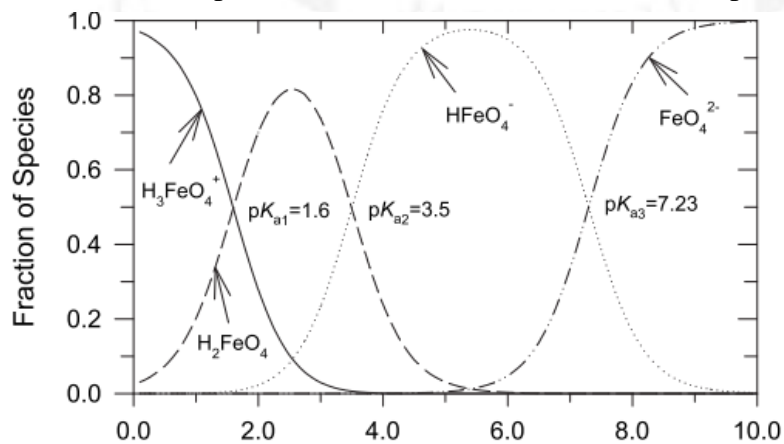


Fuente: Chemapps (2019)

Por último, con respecto a la existencia y distribución de las distintas especies del ion ferrato (VI). Estas dependen de las condiciones de pH del medio en el que se encuentra disuelto (Sharma, 2011) como se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3

Distribución de especies de Fe (VI) en solución acuosa vs pH



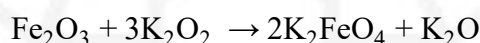
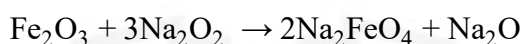
Fuente: Sharma (2011)

2.2 Desarrollo de métodos de síntesis

La preparación de ferrato (VI) tiene tres vías que se señalan a continuación:

- **Síntesis seca**

Este método se considera difícil y peligroso ya que requiere de altas temperaturas, lo cual incrementa el riesgo de detonaciones (Talaiekhzani et al., 2016). La sal de ferrato se consigue con la calcinación de óxido de hierro (III) y peróxidos de sodio o potasio a temperaturas de entre 350-370 °C y en presencia de oxígeno seco libre de CO₂ (Kiselev, Kopelev, Zavyalova, Perfiliev y Kazin, 1989). Las reacciones mencionadas son las siguientes:



Asimismo, es posible realizar la calcinación sin necesidad de acondicionar el aire atmosférico, pero a una temperatura de 700 °C durante 13 horas. (Maghraoui, Zerouale y Ijjaali, 2015). También se ha estudiado la factibilidad de usar residuos de hierro galvanizado para reemplazar parte del óxido de hierro (III), siendo necesarias temperaturas de 800 °C (Cici y Cuci, 1998). Sin embargo, llevar a cabo estas reacciones por encima de los 500 °C incrementa considerablemente el riesgo de explosión (Jiang y Lloyd, 2002).

- **Síntesis húmeda**

Se hace reaccionar cloro gaseoso con una solución enfriada de KOH, luego se agrega KOH sólido a la solución para obtener una suspensión, después se remueve el precipitado (KCl) dejando una solución fuertemente alcalina de hipoclorito de potasio (KClO). A esta solución se le agrega nitrato de hierro pulverizado en condiciones de enfriamiento <5 °C. En estas condiciones el hierro (III) pasa a hierro (VI). Luego son necesarias varias etapas de filtrado y lavado y finalmente secado para obtener ferrato de potasio sólido (Li, Li y Graham, 2005).

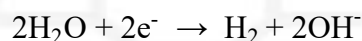
- **Síntesis electroquímica**

Consiste en disolver y oxidar un ánodo de hierro en un medio alcalino (hidróxido de sodio, potasio, bario, etc.) mediante la aplicación de un potencial eléctrico. Se han realizado numerosos estudios en cuanto a la optimización de parámetros tales como composición del ánodo, concentración del electrolito, densidad de corriente y temperatura (He, Wang, Yang y Zhang, 2006). También es posible emplear un electrodo inerte y una solución de hierro en medio alcalino, pero la primera forma es la que predomina. En ambos casos, las reacciones involucradas son las siguientes:

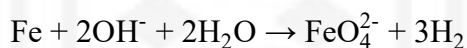
Reacción anódica:



Reacción catódica



Reacción General:

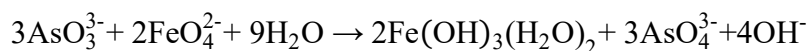
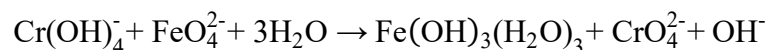


2.3 Determinación de la concentración de las sales de ferrato

Según la bibliografía recopilada para el presente estudio existen tres tipos de métodos para la determinación de la concentración de ferrato en solución acuosa: Métodos volumétricos, electroquímicos y espectrofotométricos.

2.3.1 Métodos volumétricos

Consisten en la titulación de Fe(VI) empleando Cr(III) o As(III) como valorantes (Schreyer, Thompson y Ockerman, 1950a, 1950b). En ambos casos, se parte de soluciones altamente alcalinas que contienen el valorante (ion arsenito o cromito) en exceso, a la cual se le añade un volumen de la solución de ferrato (VI) con concentración desconocida, ocurriendo las reacciones correspondientes:



En el caso del cromo, la solución de resultante, que contiene una cantidad de iones cromato en proporción al ferrato (VI), es acidificada para formar dicromatos y posteriormente titulada con una solución estándar de iones ferrosos en presencia del indicador difenilamina sulfonato de sodio, que señala el punto final de la titulación al cambiar de color. Por otro lado, al usar arsénico, el exceso de iones arsenito es titulado con una solución estándar de iones bromato usando anaranjado de metilo como indicador de pH.

Este método es apropiado para la titulación de Na_2FeO_4 , K_2FeO_4 y BaFeO_4 , siendo necesario el calentamiento de la solución en el último caso, dada la baja solubilidad de la sal de bario en agua (Luo, Strouse, Jiang y Sharma, 2011). Si bien el método es relativamente sencillo y permite determinar concentraciones de ferrato en rangos de milimolar a molar, tiene como desventaja la generación de residuos tóxicos de arsénico o cromo, que requieren de tratamiento adicional antes de desecharlos.

2.3.2 Métodos electroquímicos

- **Técnica de voltametría cíclica**

Este método es ampliamente usado en la electroquímica analítica y consiste en medir una respuesta de corriente al aplicar un barrido de potencial eléctrico.

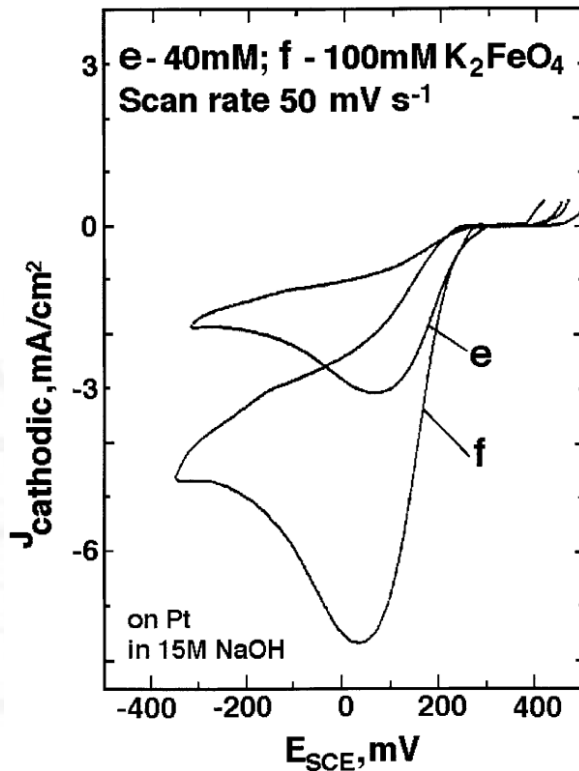
La técnica emplea un sistema de tres electrodos: un electrodo de trabajo, en donde se da la reacción que permite medir el analito; un electrodo auxiliar o contraelectrodo, en donde ocurre la semirreacción complementaria; y un electrodo de referencia, que mantiene un potencial estable en base al cual se determinan los potenciales de trabajo.

El resultado de la VC es un voltamperograma, en donde se aprecia un pico de reducción de Fe(VI), cuya densidad de corriente es proporcional a la concentración de ferrato en solución (Venkatadri, Wagner y Bauer, 1971). Este pico se ubica aproximadamente a 50 mV vs un electrodo de referencia de calomelanos saturado (SCE),

usando Pt como electrodo de trabajo, velocidad de barrido de 50 mV/s y en solución de NaOH 15M (Licht et al., 2001).

Figura 2.4

Voltamperograma cíclico de Fe (VI) en medio básico



Fuente: Licht et al. (2001)

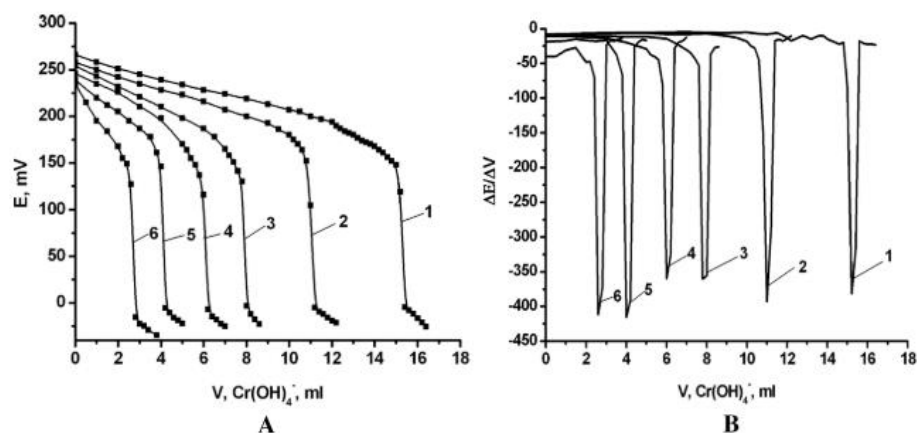
En comparación a los métodos volumétricos, se pueden medir concentraciones más bajas (menores a 100mM) y con mayor precisión, pues no se depende de un indicador visual sujeto a un mayor margen de error.

- **Titulación potenciométrica**

Por otro lado, se tiene la técnica de titulación potenciométrica, que es una técnica tanto electroquímica como volumétrica. Al igual que la titulación previamente presentada, se usa Cr (III) como valorante, pero se emplea un potenciómetro en lugar de un indicador visual para determinar el punto final de la titulación. Esto permite realizar titulaciones mucho más precisas y con resultados más replicables (Golovko et al., 2011).

Figura 2.5

Curvas de titulación potenciométrica de iones FeO_4^{2-}



Nota: Cr(OH)_4^- como agente titulante. A: curvas integrales; B: curvas diferenciales.

Fuente: Golovko et al. (2011)

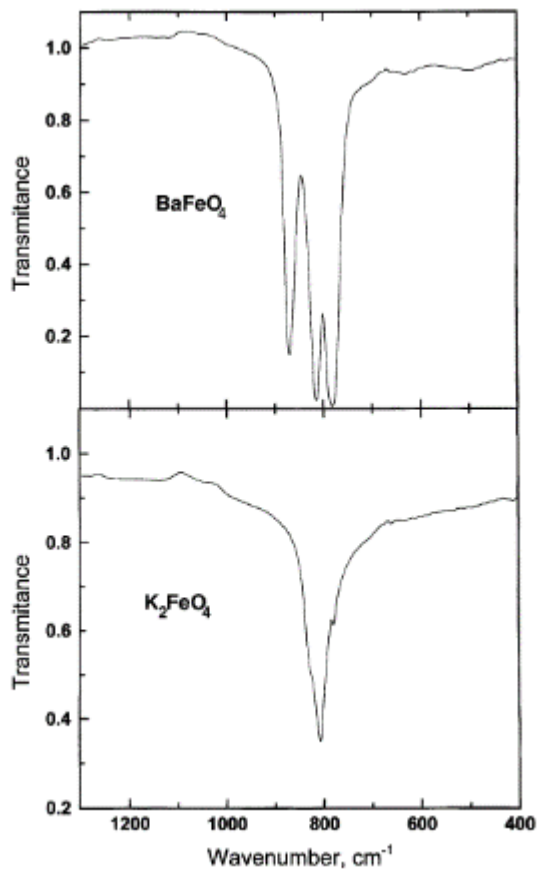
2.3.3 Métodos espectrofotométricos

- **FTIR**

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier es una técnica analítica para caracterización de materiales que brinda información cualitativa y cuantitativa sobre la composición de muestras, ya sean sólidas, líquidas o gaseosas (Smith, 2011). Con esta técnica es factible la caracterización de sales de ferrato (VI) tales como K_2FeO_4 y BaFeO_4 (Licht et al., 2001), encontrándose picos de transmitancia característicos de estas sales alrededor de los 800/cm. En este sentido, la presencia de ferrato en la muestra puede determinarse al encontrar el patrón en la gráfica mostrada, mientras que la concentración puede calcularse en función del tamaño del pico observado.

Figura 2.6

Espectro IR de sales de Fe (VI)



Nota: BaFeO₄ (arriba) y K₂FeO₄ (Abajo)

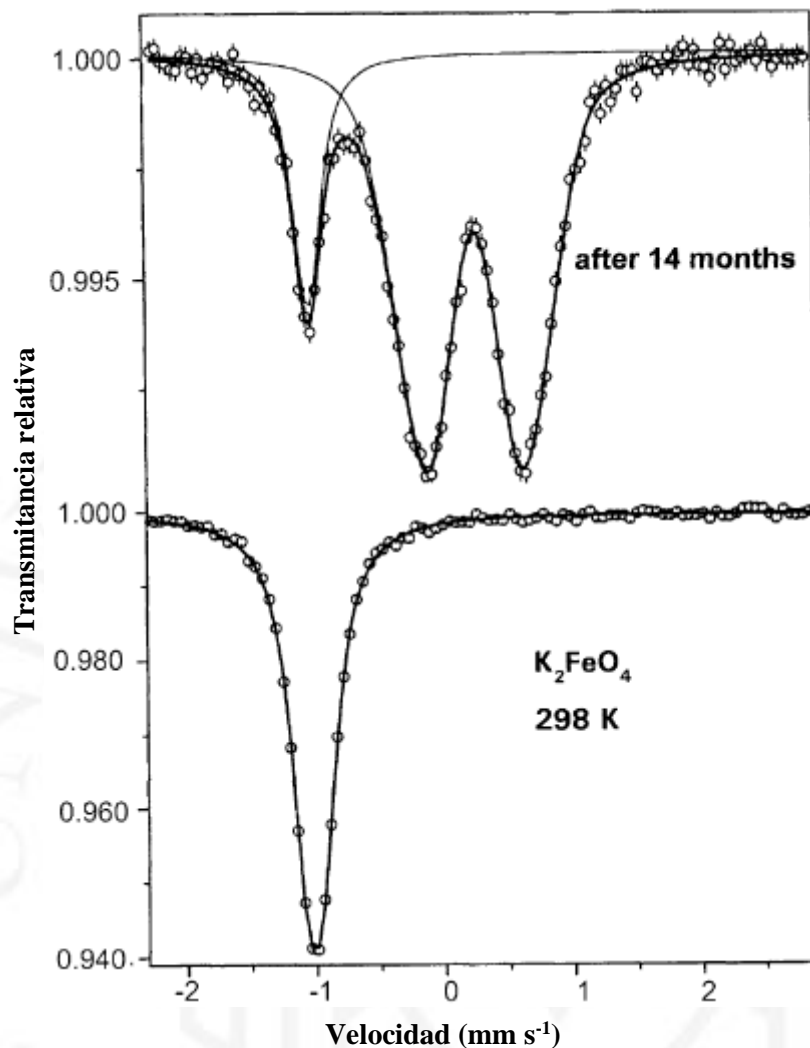
Fuente: Smith (2011)

- **Espectroscopía de Mössbauer**

Esta técnica consiste en la emisión y absorción de rayos gamma en muestras sólidas y permite obtener información química, estructural y magnética de la muestra. De esta manera, es posible medir la concentración de Fe en estados de oxidación de entre +2 y +6. En la gráfica de espectro de Mössbauer, que muestra la transmisión relativa del haz de rayos gamma a través de la muestra vs la velocidad relativa del núcleo emisor frente al núcleo receptor, el Fe (VI) exhibe un pico pronunciado a -1 mm/s, cuyo tamaño es proporcional a la concentración de la sal en la muestra.

Figura 2.7

Espectro de Mössbauer de K_2FeO_4



Nota: Abajo, muestra fresca de K_2FeO_4 ; Arriba, muestra mantenida en un desecador durante 14 meses, en donde se observan también picos de Fe (III)

Fuente: Nowik, Herber, Kolytyn, Aurbach y Licht (2005)

- **Método colorimétrico directo**

El método colorimétrico se basa en la técnica de espectrometría UV/VIS, que utiliza radiación electromagnética con longitudes de onda de entre 200 y 800 nm para la determinación cuantitativa de componentes en una muestra líquida y traslúcida. El método permite calcular la absorbancia del analito en solución, que según la ley de Lambert-Beer, es directamente proporcional a su concentración.

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = C \times \varepsilon \times L$$

Donde:

A: Absorbancia (adimensional)

I_0 : Intensidad luminosa del haz de luz en el origen (cd)

I: Intensidad luminosa tras atravesar la solución (cd)

C: Concentración de la solución (mol/L)

ϵ : Coeficiente de extinción molar del analito (L/(mol.cm))

L: Longitud atravesada por el haz de luz en el medio (cm)

Para determinar la cantidad de ferrato (VI) en solución, se sabe en primer lugar que este exhibe un pico principal de absorción a 505 nm y otro pico menos pronunciado a entre 275 y 320 (Bielski y Thomast, 1987).

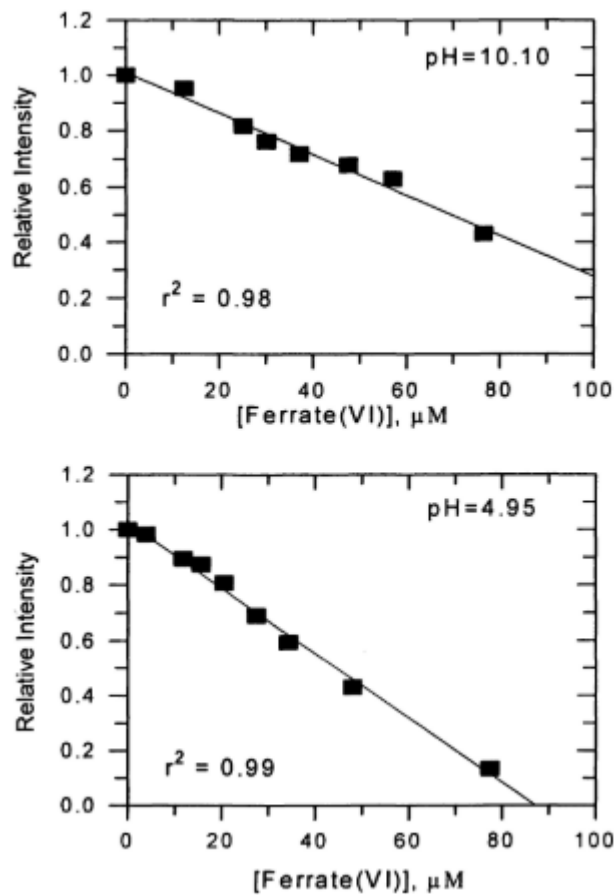
- **Método de fluorescencia**

La espectrometría de fluorescencia o fluorimetría es una técnica utilizada ampliamente para el análisis de compuestos orgánicos y para la detección de metales pesados. Tiene como principio la emisión fluorescente de un analito producto de su excitación con radiación electromagnética. Para que esto sea posible, el analito debe contener un componente fluorocromo, que absorbe energía de la radiación incidente a una longitud de onda específica y da como respuesta una radiación de menor energía.

Según Noorhasan, Sharma y Baum (2008), es posible usar fluorimetría para detectar ferrato (VI) en soluciones tanto ácidas como básicas en concentraciones del orden de 10 μ M con ayuda de la escopoletina (7-hidroxi-6-metoxicromen-2-nona). La escopoletina es un agente fluorescente, el cual puede ser excitado con una longitud de onda incidente de 335 nm y cuyo pico de emisión fluorescente se encuentra alrededor de los 460 nm. Al agregar ferrato (VI) a una solución con escopoletina, esta se oxida perdiendo su propiedad fluorescente. Si la escopoletina se encuentra en exceso, se puede conocer la cantidad de ferrato (VI) agregado pues es inversamente proporcional al agente fluorescente remanente.

Figura 2.8

Intensidad luminosa vs concentración de ferrato (VI) con escopoletina



Fuente: Noorhasan et al. (2008)

2.4 Optimización de parámetros para producción de ferrato (VI) por método electroquímico

Los estudios de optimización de producción de ferrato (VI) tienen como objetivos lo siguiente: mejorar la estabilidad del producto, es decir, que la descomposición se retarde; obtener una solución concentrada y, sobre todo, que la superficie del ánodo en contacto con el anolito tenga propiedades que promuevan su continua disolución.

Este último objetivo es el más importante debido a que al comenzar la electrólisis, una capa 'oxo-hidróxida' comienza a formarse y con el tiempo previene la disolución del ánodo, impidiendo la formación de ferrato (VI) (Lescuras-Darrou, Lopicque y Valentin, 2002). Es vital que se encuentre el conjunto de parámetros que permitan el debilitamiento, la desintegración o la formación de poros en dicha capa durante la electrólisis.

La cantidad de investigaciones dedicadas a la composición del ánodo y al tipo de electrolito sugieren que estos podrían ser los parámetros más importantes en la síntesis de ferrato (VI). Sin embargo, también se estudian la temperatura, la densidad de corriente, el tiempo de electrólisis y la razón superficie del electrodo sobre volumen del anolito.

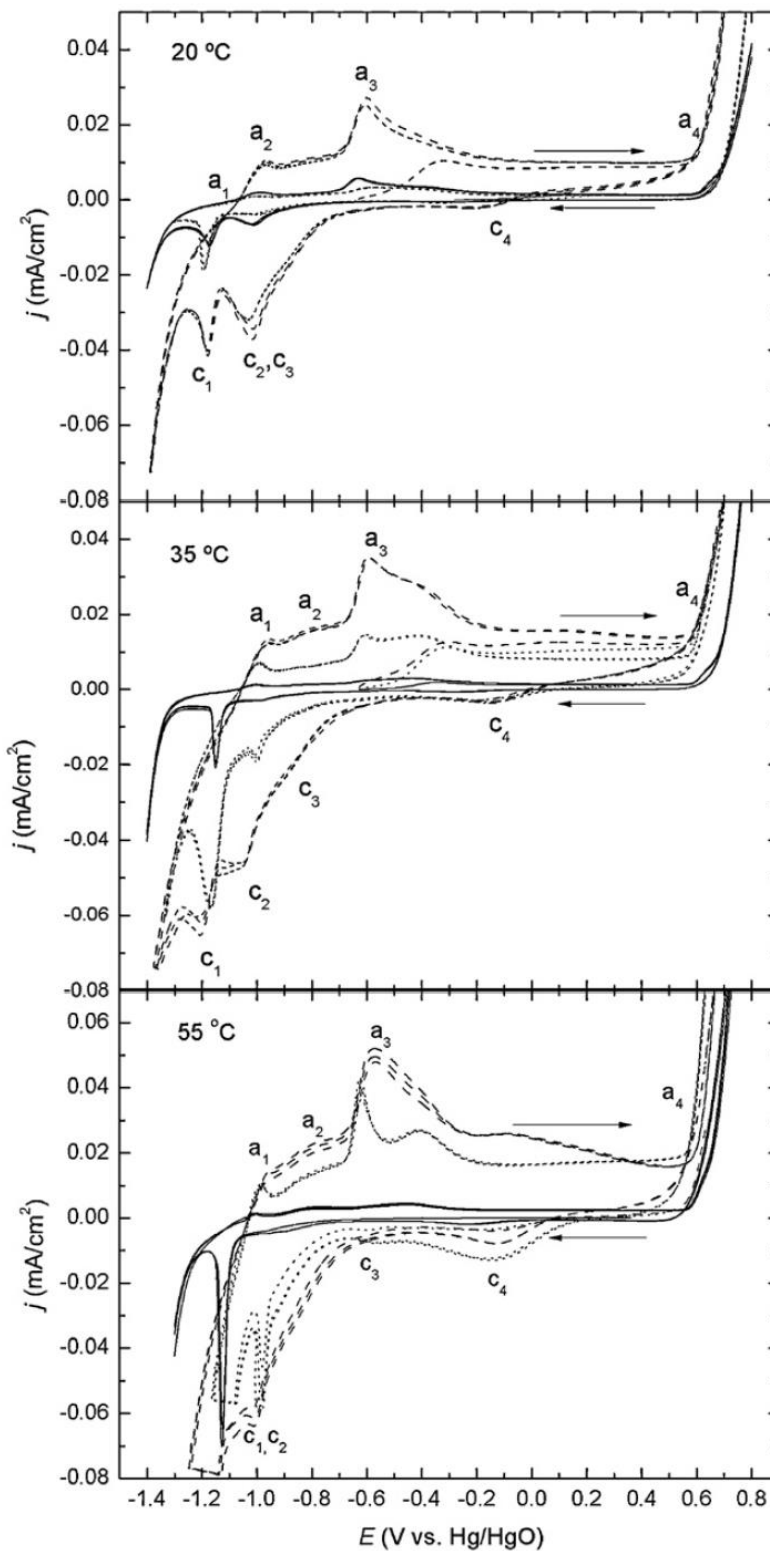
Es importante mencionar que la optimización de los parámetros está dada para unos autores, por la mayor eficiencia de corriente o menor gasto energético, mientras que, para otros, lo es la mayor concentración de ferrato (VI). La investigación de Quino-Favero, Eyzaguirre, Mogrovejo, Prieto y Flores del Pino (2018) concluyó en que la eficiencia energética más alta no está asociada necesariamente con el menor costo de producción, por lo que la optimización no debería basarse únicamente en ese criterio.

También es importante mencionar que la optimización se debe ver en todo su conjunto, es decir, considerando todas las variables a la vez. Para cada electrodo habrá una temperatura, densidad de corriente y electrolito ideales. Para dar un ejemplo, la Figura 2.9 representa la voltametría cíclica de tres ánodos (hierro fundido blanco, hierro fundido gris y hierro puro) en NaOH 10M a diferentes temperaturas. Pueden reconocerse 4 picos anódicos (del a1 hasta el a4) en que el hierro en estado elemental pasa progresivamente a hierro (VI), y 4 picos catódicos que corresponden al proceso inverso.

El ferrato (VI) específicamente, se forma en el pico a4 y es difícil distinguirlo debido a que está traslapado por la evolución de oxígeno, por ello, la cantidad de ferrato (VI) se asocia a la cantidad de hierro que pasa a hierro (III) en el pico catódico c4. Puede observarse que, a 20 °C, en el caso del hierro fundido blanco, los picos correspondientes a la disolución anódica son de un orden de magnitud mayor respecto a los otros dos electrodos. Sin embargo, esta situación cambia al incrementar la temperatura, especialmente para el hierro fundido gris, pues las densidades de corriente de sus picos anódicos se incrementan e incluso en el pico c4 (asociado a la cantidad de ferrato (VI)) su densidad de corriente supera al del hierro fundido blanco.

Figura 2.9

Voltametría cíclica de ferrato (VI)



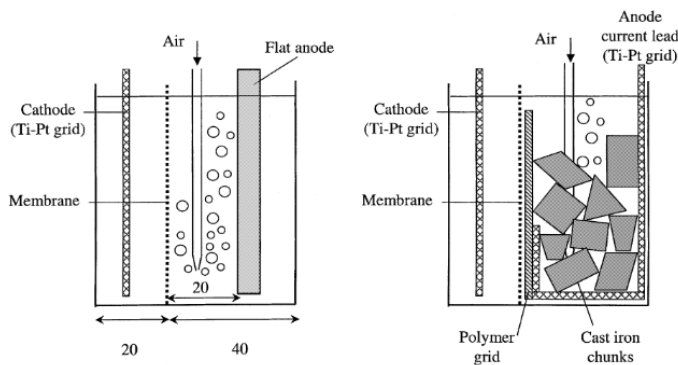
Nota: Parámetros: NaOH 10 M, velocidad: 100 mV/s para los ánodos: hierro fundido blanco (- - -), hierro fundido gris (...), hierro puro (-) a temperaturas 20 °C, 35 °C y 55 °C.

Fuente: Nikolić-Bujanović, Čekerevac, Vojinović-Miloradov, Jokić y Simičić (2012)

2.4.1 Tipo de ánodo (geometría, composición, activación)

El tipo de ánodo más usado consiste en una placa rectangular dispuesta vertical y paralela al cátodo que tiene la misma forma, aunque también se han usado varias alternativas con la finalidad de incrementar la superficie en contacto con el anolito como: malla de hierro (He et al., 2006), trozos de hierro empaquetados (ver figura 2.10), hierro en polvo compactado (De Koninck, Brousse y Bélanger, 2003) y ánodos inertes con hierro en solución como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Cañizares, Arcís, Sáez y Rodrigo, 2007; Čekerevac, Nikolić Bujanović, Jokić y Simičić, 2013). Además, algunos estudios proponen tratar el ánodo antes de la electrólisis por medio de un decapado, lavado y pulido (Barişçi, Ulu, Särkkä, Dimoglo y Sillanpää, 2014; Wang, Liu, Zeng y Song, 2015); por medio de polarización catódica (Ding, Yang y Wu, 2004) o durante la electrólisis mediante ultrasonido (A. Sánchez-Carretero, Rodrigo, Cañizares y Sáez, 2010).

Figura 2.10
Tipos de ánodo



Nota: A la derecha: Esquema común de placas paralelas, a la izquierda: Trozos de hierro empaquetados en canasta de Ti-Pt.

Fuente: Lescuras-Darrou, Lopicque y Valentin (2002)

En cuanto a la composición del ánodo, si bien el elemento de interés es el hierro, estudios han confirmado que el desempeño en la producción es altamente favorecida cuando están presentes el carbono y el silicio (Máková, Bouzek y Sharma, 2008). Es por ello que generalmente las investigaciones usan aceros o hierros fundidos blancos (carbono en forma de Fe_3C) o grises (mayor carbono en forma de grafito). La siguiente tabla resume el desempeño de varias investigaciones que usan distintos ánodos.

Tabla 2.3.

Tabla de parámetros usados en otras investigaciones

Ánodo	Densidad de corriente mA/ cm ²	Electrolito NaOH (M)	Tiempo de electrólisis (Min)	Eficiencia de corriente	Ferrato mmol/ L	Energía kWh/ kg	Referencia
Esponja de hierro	0,054	10	180	0,32	80	7,9	(Sun et al., 2016)
						(61,8) ^b	(Sun et al., 2016)
Acero	3,6	10	25	0,17	1,9	15,4	(Alsheyab, Jiang y Stanford, 2010a)
Acero	3,6	16	25	0,56	2,8	5,3	(Alsheyab et al., 2010a)
Hierro fundido blanco	5	14	60	0,63			(Bouzek, Roušar y Taylor, 1996)
Acero dulce	16	14	180	0,39	79,5		(Bouzek y Roušar, 1993)
Magnetita	3,3	16	300	0,52	25		(Ding et al., 2004)
Hierro puro	4,4	14	60	0,64			(Bouzek y Roušar, 1997)
Lana de hierro	17	10	5	0,59	0,5		(Denvir y Pletcher, 1996b, 1996a)
Lana de hierro	17	10	180	0,17	10		(Denvir y Pletcher, 1996b, 1996a)
Acero plateado	1	10	5	0,7			(Denvir y Pletcher, 1996b, 1996a)
Acero plateado	1	10	180	0,3			(Denvir y Pletcher, 1996b, 1996a)
Polvo de hierro ^a	1	10 (KOH)			1,5	(500) ^b	(Sáez, Rodrigo y Cañizares, 2008)
Goetita ^a	100	14 (KOH)			0,27	(24) ^b	(Ana Sánchez-Carretero, Sáez, Cañizares, Cotillas y Rodrigo, 2011)

Nota: a Electrodo de diamante dopado con boro. b Carga, Q pasa en Ah/ L

Fuente: Sun et al. (2016)

2.4.2 Composición y concentración del electrolito

Varios estudios coinciden en la superioridad del hidróxido de sodio frente a hidróxidos de otros cationes como el potasio, litio o bario y es por ello que prácticamente todos los estudios lo usan indistintamente del ánodo usado, con excepción de aquellos que buscan la recuperación sólida de ferrato (VI) (Lapicque y Valentin, 2002). La posible explicación para esto se halla en la diferencia de solubilidad del ferrato (VI) y sus intermediarios en estos electrolitos y en el impacto de los cationes en la superficie de las capas del electrodo y sus propiedades protectoras (Mácová et al., 2008).

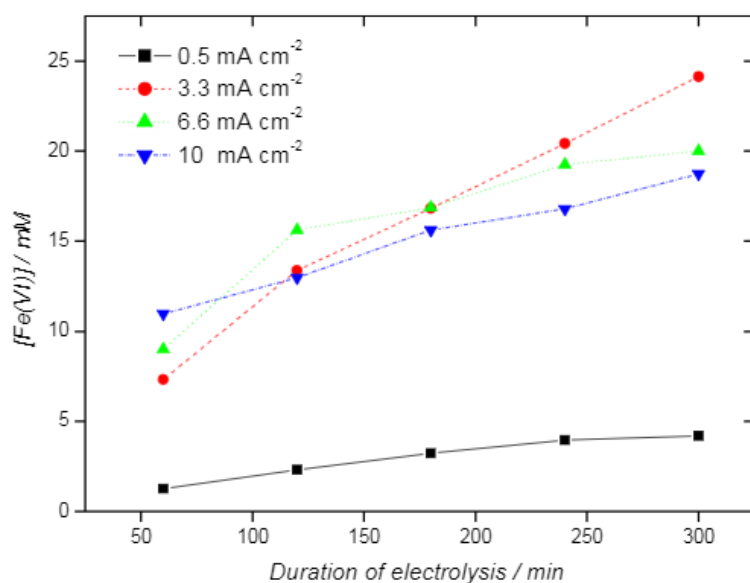
En otro estudio investigaron el efecto del electrolito (NaOH, KOH y mezcla de ambos) en la estabilidad del ferrato (VI) y concluyeron que el menor ratio de descomposición se hallaba usando NaOH puro, por lo que resultó ser el electrolito más adecuado (Barişçi et al., 2014). Sobre la concentración hay menor confluencia, sin embargo, los mejores resultados aparecen en electrolitos concentrados 14-16 M (Alsheyab et al., 2010a; Bouzek et al., 1996) o saturados 20 M (Barişçi et al., 2014).

2.4.3 Densidad de corriente

Se define a la densidad de corriente a la intensidad de corriente eléctrica que pasa a través del área del ánodo en contacto con el anolito. Este parámetro no ha sido tan estudiado, sin embargo, los valores que se encuentran en las investigaciones van desde 1 hasta 10 mA/cm². En la figura 2.11 Ding, probó 5 densidades de corriente que engloban este rango. Con un electrodo de magnetita poroso obtuvo su mejor resultado con 3,3 mA/cm² al cabo de 300 minutos. Puede observarse que, para todas las densidades de corriente, un incremento en el tiempo de electrólisis se tradujo en mayor producción de ferrato (VI).

Figura 2.11

Efecto de la densidad de corriente en la producción de ferrato (VI)



Fuente: Ding et al. (2004)

El estudio de Alsheyab et al. (2010a) usó un ánodo de hierro de alta pureza y los autores encontraron que su valor óptimo de densidad de corriente fue 36 A/m² (o 3,6 mA/cm²) basándose en eficiencia de corriente, sin embargo, su mejor producción la obtuvieron con 16,3 mA/cm² como puede observarse en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4

Eficiencia energética frente a distintas densidades de corriente testeadas

Densidad de corriente (A/m ²)	Voltaje de la celda (V)	FeO ₄ ²⁻ (g/100 ml)	Corriente calculada (A)	Eficiencia de corriente	Consumo de Energía (kWh/kg)
18	1,95	0,009	0,03	30%	8,8
36	1,95	0,022	0,07	35%	7,2
54	2	0,031	0,1	33%	8
72	2,15	0,036	0,12	29%	9,9
91	2,15	0,042	0,14	27%	10,6
109	2,25	0,045	0,15	24%	12,4
127	2,3	0,041	0,13	19%	16,3
145	2,3	0,048	0,16	19%	16,6
163	2,5	0,054	0,18	19%	17,2
181	2,5	0,046	0,15	15%	22,7

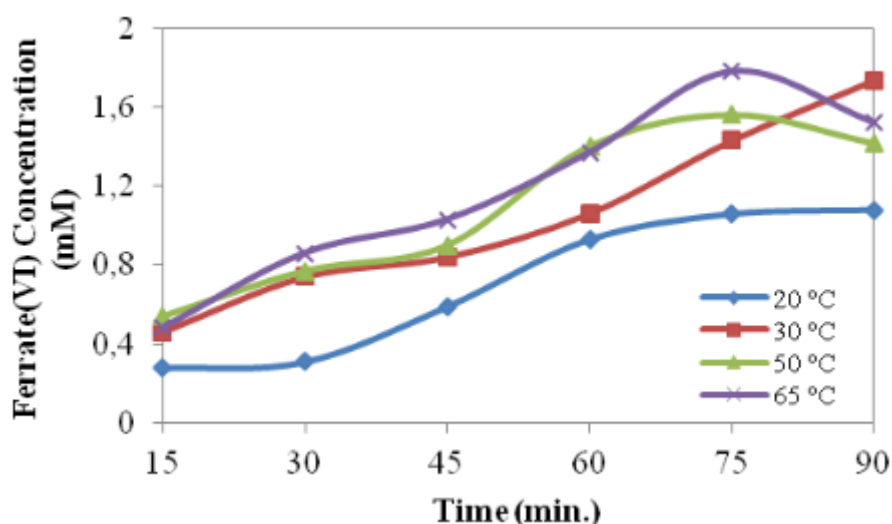
Fuente: Alsheyab et al. (2010a)

2.4.4 Temperatura

Existe considerable coincidencia en que el incremento de temperatura favorece la producción de ferrato (VI) pero al mismo tiempo también favorece su descomposición. En la figura 2.12 puede observarse este fenómeno: la producción de ferrato es más alta hasta los 75 minutos de electrólisis cuando la temperatura es 65 °C, pero cae pasado ese tiempo.

Figura 2.12

Efecto de la temperatura en la producción de ferrato (VI)



Nota: Parámetros: Ánodo de hierro de alta pureza, Electrolito: NaOH 20 M, Densidad de corriente: 1.47 mA/cm².

Fuente: Barişçi et al. (2014)

2.5 Uso del ferrato (VI) para purificación de aguas contaminadas

Durante décadas, los procesos de cloración han sido el eje principal para el tratamiento y potabilización del agua. Sin embargo, el uso de cloro conlleva a la aparición de subproductos nocivos que incluyen cloraminas orgánicas e inorgánicas, trihalometanos, halocetonas y ácidos acéticos halogenados, que son difíciles de eliminar y tienen efectos nocivos tanto sobre los humanos así como sobre animales y plantas (Bedner, MacCrehan y Helz, 2004). Asimismo, con respecto al riego de cultivos, el uso de aguas cloradas puede devenir en daño tisular. Esto sucede debido a que el cloro no es retenido por el suelo, sino que viaja por el tejido vascular de la planta y se acumula en las hojas, pudiendo causar quemaduras y defoliación. Una acumulación excesiva causa que las hojas se

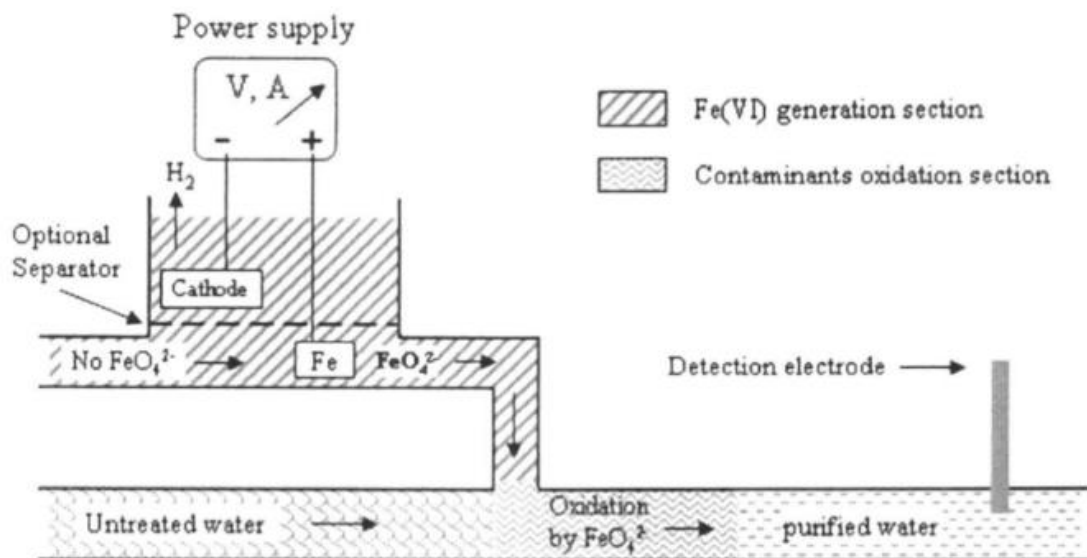
quemem y se caigan. Por el contrario, el ferrato (VI) es un agente purificante mucho más conveniente, puesto que además de su alto poder oxidante, se reduce a compuestos de Fe (III), los cuales tienen un efecto coagulante y no representan ningún riesgo para el medio ambiente.

En este sentido, se ha estudiado y demostrado la efectividad del ion FeO_4^{2-} para oxidar y remover metales pesados tales como el arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio y zinc (Murmman y Robinson, 1974); así como una pluralidad de compuestos orgánicos e inorgánicos como amoníaco, cianuros, tiocianatos, sulfuros, alcoholes, toluenos, cicloalcanos, cetonas, carbohidratos, aminobencenos, entre otros (Licht y Yu, 2005). Además, el ferrato (VI) es efectivo para la inactivación de microorganismos y para la remoción de partículas coloidales y sólidos en suspensión en el agua (Jiang y Lloyd, 2002).

A pesar su efectividad, el uso de ferrato (VI) para el tratamiento de agua presenta grandes retos como la dificultad para almacenar y transportar efectivamente las sales que contienen este anión, así como la necesidad de lograr un método de producción eficiente y competitivo en cuanto a costos frente a otras tecnologías disponibles. Ante esto, han surgido soluciones basadas en la producción *in situ* del anión FeO_4^{2-} para ser aplicado directamente sobre el cuerpo de agua, siendo la más aplicada la configuración on-line (Licht y Yu, 2005), en la que el ferrato (VI) se produce en un flujo paralelo al del agua a tratar para luego dosificarse en la cantidad necesaria para desinfectar el efluente (Figura 2.13).

Figura 2.13

Sistema on-line para tratamiento de agua usando iones ferrato (VI)



Fuente: Licht y Yu (2005)

2.5.1 Otras tecnologías para la purificación de aguas contaminadas

La elección de un tratamiento de agua depende de varios factores como: la calidad de agua deseada, los volúmenes de agua a tratar, el área necesaria para la planta de tratamiento, los gastos de instalación, los gastos operativos, los gastos de mantenimiento, los posibles subproductos del tratamiento, el efecto residual, entre otros. A continuación, se mencionan algunos tratamientos para desinfección:

- **Cloración**

Es el proceso más común en el mundo para desinfectar el agua. Puede usarse hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o cloro gaseoso. En cualquiera de estas formas, el cloro reacciona con el agua por hidrólisis y se forma ácido hipocloroso e iones hipoclorito. El ácido hipocloroso es el ingrediente principal de la desinfección y actúa de dos formas: por oxidación y por transferencia de iones cloro.

También puede producirse ácido hipocloroso in situ en un proceso que se denomina: “activación electroquímica de soluciones acuosas”. Se trata de un proceso electroquímico en el cual una solución de cloruro de sodio o potasio se dispone en una celda electroquímica dividida por una membrana dieléctrica. Al aplicar un voltaje se

forma una mezcla de soluciones donde predomina el ácido hipocloroso. Luego esta mezcla se dosifica en el agua a irrigar.

La cloración es un proceso económico y efectivo contra bacterias y virus, aunque no contra ciertos protozoos. Lleva siendo usado exitosamente hace más de cien años, aunque se debe tener en consideración que, en abundancia de materia orgánica, el ácido hipocloroso forma subproductos que son perjudiciales para la salud (trihalometanos y ácidos haloacéticos). Otro punto a considerar es que el ácido hipocloroso reacciona rápidamente con el amonio para crear cloraminas que también tienen un efecto desinfectante, aunque menos potente. Si bien esto es un efecto deseado porque incrementa el efecto residual, se debe tener en cuenta que no pueden suministrarse fertilizantes a base de amonio en el agua de riego si se tiene esta tecnología. El cloro consumido durante la desinfección se conoce como demanda de cloro, mientras que el remanente se conoce como cloro libre. Se debe evitar exceder la demanda de cloro en la dosis debido a que la mayoría de plantas es sensible al cloro y puede causarles fitotoxicidad.

- **Dióxido de cloro**

El dióxido de cloro actúa únicamente por oxidación y se produce in situ. Para producirlo normalmente se requieren dos soluciones: clorito de sodio y ácido clorhídrico. Estas se mezclan en un reactor y el producto de la reacción es añadido al agua de acuerdo a una dosis preestablecida o en respuesta a lecturas de sensores. A diferencia del ácido hipocloroso, éste es menos sensible a los cambios de pH, es bastante menos reactivo con sustancias que no son el objetivo como los iones de amonio, reacciona lentamente con la materia orgánica y como consecuencia, forma menos subproductos de desinfección. Sin embargo, aproximadamente el 70% del dióxido de cloro aplicado se convierte en clorito, un subproducto de desinfección que puede ser removido en un proceso adicional. La instalación de este sistema es económica, pero los reactivos son costosos.

- **Peróxido de hidrógeno**

El peróxido de hidrógeno es un potente oxidante, aunque inestable y de corta vida. Debido a ello, se han desarrollado otras formas más estables como el ácido perfórmico o

el peróxido de hidrógeno estabilizado con plata quelada. Estas sustancias se dosifican directamente al agua como el caso del hipoclorito.

- **Desinfección UV**

A pesar de que el sol es una fuente de luz UV, buena parte de esta es absorbida por la capa de ozono, por lo que, para esta aplicación es necesario fuentes artificiales de UV. El sistema consiste en que el agua a tratar pasa por una cámara de acero que contiene una lámpara de luz UV encapsulada en una manga de cuarzo. La dosis de UV se determina a partir de la intensidad de la luz y el caudal de agua. Previamente el agua a tratar debe estar libre de sólidos suspendidos para que la luz pueda incidir. En este método de tratamiento no se añaden sustancias ni se generan residuos, sin embargo, no hay un efecto residual por lo que hay un riesgo de re-contaminación. Su uso se recomienda para sistemas cerrados. Los costos operativos son relativamente bajos, pero la instalación tiene costos altos.

- **Ozonización**

El ozono, alótropo del oxígeno, se produce in situ generalmente mediante un generador de alta tensión eléctrica o por radiación UV, aunque también puede producirse en reacciones electrolíticas o químicas. Una vez producido, se hace burbujear en el agua donde actúa rápidamente. Una parte del ozono oxida directamente a los sustratos y otra parte se descompone en O₂ y un átomo de oxígeno, que es un radical altamente reactivo, oxidante y de corta vida.

El ozono es muy efectivo en un amplio rango de pH y es un potente germicida contra bacterias, virus y protozoos. Además, requiere un tiempo de contacto muy corto y no produce productos halogenados, excepto en agua con alta concentración de bromo. Empero, la ozonización no tiene efecto residual como en el caso de la irradiación UV, la instalación del sistema y la generación de ozono son muy costosas y puede ser peligroso debido a que el ozono es altamente corrosivo.

Las principales ventajas y desventajas de estas tecnologías pueden apreciarse en el siguiente cuadro comparativo:

Tabla 2.5

Cuadro comparativo de las distintas tecnologías de desinfección de agua

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Cloración	<ul style="list-style-type: none"> -Es efectivo contra bacterias y virus. -Tiene efecto residual. -La instalación y los costos operativos son económicos. -De uso habitual, probado con éxito. 	<ul style="list-style-type: none"> -No es efectivo contra ciertos protozoos. -La mayoría de plantas son sensibles al cloro, un exceso puede causar toxicidad. -Reacciona con amonio, por lo que no debe usarse si simultáneamente se usan fertilizantes a base del mismo. -Es corrosivo. -Muy sensible al pH. Debe mantenerse entre 6 y 7. -Forma sales insolubles cuando reacciona con metales, por lo que debe haber un proceso para retirarlos para evitar daños en los canales. -En abundancia de materia orgánica forma subproductos perjudiciales para la salud como trihalometanos (carcinogénicos) y ácidos haloacéticos.
Dióxido de cloro	<ul style="list-style-type: none"> -Activo en pH amplio. -Potente oxidante. -Tiene un buen efecto controlando el sabor y olor del agua. -Destruye los precursores de los trihalometanos. -Necesita un tiempo de contacto corto. -Es menos reactivo con sustancias que no son el objetivo como los iones de amonio. -Es superior al ácido hipocloroso removiendo hierro y manganeso. 	<ul style="list-style-type: none"> -Los reactivos son costosos. -Forma cloritos y cloratos como subproductos de desinfección. -Se requieren trabajadores con mayor calificación porque el proceso es más complejo.

(continúa)

(continuación)

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Peróxido de hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> -Potente oxidante. -Los costos de instalación son bajos. -No forma subproductos nocivos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Descomposición rápida en presencia de materia orgánica. -Es muy selectivo, su actuación cambia con la temperatura, pH, dosis, tiempo de reacción. etc.
Desinfección UV	<ul style="list-style-type: none"> -Es efectivo contra virus, esporas y protozoarios. -Es de fácil uso para los operadores. -Constituye un proceso físico por lo que no requiere la adición de ningún químico. -Requiere poco espacio. 	<ul style="list-style-type: none"> -No tiene efecto residual. -La instalación es costosa. -A veces los organismos pueden reparar los efectos destructivos del UV mediante un proceso llamado “fotoreactivación” -La turbidez perjudica su eficacia.
Ozonización	<ul style="list-style-type: none"> -Potente oxidante. -Requiere corto tiempo de contacto. -Agrega oxígeno disuelto al agua. -No se crean residuos que deban ser removidos. -No produce productos halogenados, excepto en agua con alta concentración de bromo. 	<ul style="list-style-type: none"> -No tiene efecto residual. -Altos costos de instalación y operación. -Ha sido poco usado. -Muy corrosivo. -Es extremadamente irritante por lo que se requiere mucho control contra fugas.

Fuente: Pettit (2016). Elaboración propia.

2.6 Otros usos del ferrato (VI)

- **Almacenamiento de carga y baterías**

Desde hace más de cien años, compuestos a base de hierro han sido estudiados como materiales anódicos y catódicos en celdas electroquímicas para el almacenamiento de carga. Entre ellas se tienen a la batería de níquel – hierro, inventada por Thomas Edison a principios del siglo XX (Zhou et al., 2012), así como la batería de litio-ferrofosfato (Hassoun, Croce, Hong y Scrosati, 2011), desarrollada por primera vez a finales del mismo siglo.

Asimismo, el Fe (VI) ha sido incorporado en la composición de cátodos para baterías, en virtud de su gran capacidad de almacenamiento de carga y la abundancia y disponibilidad del hierro en corteza terrestre, dando lugar a las llamadas baterías de súper-hierro. Estas características, sumadas a su baja solubilidad, facilidad para la transferencia de carga y alta capacidad de oxidación hacen a algunas de las sales de hierro hexavalente ideales para esta aplicación. Existen cuatro tipos de baterías basadas en Fe (VI): baterías alcalinas primarias (no recargables), baterías primarias de litio (no recargables), baterías alcalinas recargables y baterías recargables no acuosas.

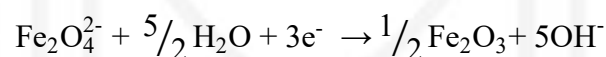
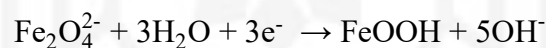
Tabla 2.6

Capacidad de carga teórica de diferentes sales de Fe (VI)

Sal de Ferrato	Li ₂ FeO ₄	Na ₂ FeO ₄	K ₂ FeO ₄	Rb ₂ FeO ₄	Cs ₂ FeO ₄	SrFeO ₄	BaFeO ₄	AgFeO ₄
Capacidad de carga	3e ⁻	3e ⁻	3e ⁻	3e ⁻	3e ⁻	3e ⁻	3e ⁻	5e ⁻
Capacidad específica (mAh/ g)	601	485	406	276	209	388	313	399

Fuente: Licht y Yu (2008)

La capacidad de almacenamiento de carga del ferrato radica en la transferencia de 3 e⁻ que tiene lugar durante la reducción de Fe (VI) a Fe (III) (Licht y Yu, 2008):



- **Oxidación fotocatalítica**

La oxidación de compuestos orgánicos persistentes en medios acuosos mediante acción fotocatalítica hace referencia a la degradación de estos contaminantes gracias a la acción de la luz y de un catalizador. Esta se basa en la excitación de un e⁻ de un semiconductor mediante el efecto fotoeléctrico, generando un par electrón-hueco que a su vez produce un radical libre altamente oxidante, generalmente el hidroxilo (OH•). Entre los catalizadores más estudiados está el TiO₂, que al ser irradiado por luz ultravioleta es altamente efectivo para la producción de radicales hidroxilos. Sin embargo, es frecuente que los pares electrón-hueco se recombinen, lo cual limita la eficacia del proceso oxidativo de los contaminantes.

La combinación de la fotocatalisis UV/TiO₂ con el uso de ferrato (VI) en pequeñas cantidades (0,08 a 0,16 mmol/ L) ha demostrado tener un efecto sinérgico en la oxidación de compuestos orgánicos tales como amoníaco, ácido fórmico, bisfenol y cianatos. (Sharma, Graham, Li y Yuan, 2010). Los autores afirman que el efecto es mayor a la suma de efectos independientes del ferrato (VI) y el sistema UV/TiO₂, lo que puede explicarse principalmente por la inhibición de la recombinación de pares electrón-hueco y por la producción de especies de ferrato (V) altamente reactivas.

- **Agente anti-bioincrustación**

Un problema común en los sistemas que utilizan corrientes de agua dentro de sus procesos es la bio-incrustación o formación de películas de microorganismos en las superficies de los conductos. Para dar solución a este problema, industrias tales como la agro-pecuaria, la alimentaria y la de generación de energía hidroeléctrica utilizan agentes químicos anti-incrustantes, necesarios para el mantenimiento y correcto funcionamiento sus sistemas.

Estos agentes comúnmente contienen cloro como agente biocida, cuyos subproductos altamente nocivos para especies de plantas y animales acuáticos han llevado a estrictas regulaciones por la Unión Europea (Hernández Moreno, Blázquez, Andreu Sánchez, Bermejo Nogales y Fernández Cruz, 2019). Por otro lado, los agentes alternativos suelen presentar problemas como ineficacia para controlar el crecimiento de películas, un costo muy elevado o alta toxicidad.

A diferencia de estos agentes, el ferrato ha probado ser efectivo para el control de la formación de películas biológicas sin ser nocivo para el medio ambiente (Fagan y Waite, 1983). Los autores demostraron que la aplicación de ferrato (VI) en dosis de 10⁻⁵ mol/L cada 20 minutos son suficientes para la prevención de bio-incrustaciones.

- **Síntesis de compuestos orgánicos**

En la industria química es frecuente la necesidad de emplear agentes oxidantes tales como Cr (VI) y Mn (VII) para llevar a cabo la síntesis de distintos compuestos orgánicos. A diferencia de ellos, el Fe (VI) no produce subproductos tóxicos y es además altamente selectivo para la transformación de alcoholes secundarios a aldehídos, así como para la desaminación y oxidación de aminoácidos, entre otros.

2.7 Potencial de industrialización del ferrato (VI)

La industrialización del ferrato supone llevar a gran escala el módulo de tratamiento. Para el caso del reactor, es necesario considerar los siguientes parámetros: la relación superficie anódica/volumen de electrolito, el voltaje, la corriente, la densidad de corriente, el rendimiento espacio-tiempo del producto, entre otros. (Alsheyab, Jiang y Stanford, 2010b). Este estudio ha encontrado solo dos investigaciones que han logrado conducir pruebas piloto en plantas de tratamiento en condiciones reales y se exponen a continuación.

El estudio de Jiang, Stanford y Alsheyab (2009) condujo una prueba en la planta de tratamiento Hailsham North en el Reino Unido y comparó la eficacia del ferrato frente a iones férricos en términos de remoción de fósforo, sólidos suspendidos, DBO y DQO. Como resultado obtuvieron que una dosis de 0,16 mg/L de Fe^{+6} (contra los 25 mg/L de Fe^{+3} usados normalmente con sulfato férrico) resultó efectiva para reducir los valores de los parámetros antes mencionados, lo cual significaría un ahorro importante en el costo de coagulante y una gran disminución de los lodos al final del tratamiento.

Otra investigación de Jiang, Durai, Petri, Grummt y Winzenbacher (2016) realizó pruebas para determinar si el ferrato (VI) podría reemplazar algunos de los productos químicos usados en la planta de tratamiento Lake Constance en Alemania que incluye procesos de filtrado, pre ozonización, coagulación y floculación y concluyeron que podía reemplazar al cloruro férrico como coagulante y al peróxido de hidrógeno usado para remover el ozono residual. Además, junto con la ozonización, el ferrato removió el 10% de los micro-contaminantes presentes en el efluente (metformina, benzotiazol y acesulfame) a diferencia del cloruro férrico donde no hubo remoción.

2.8 Pruebas de mutagénesis

Una preocupación al elegir un tratamiento de agua es la posibilidad de formación de subproductos dañinos, mutagénicos y/o carcinogénicos. La prueba de mutagénesis busca descubrir sustancias peligrosas que alteran el material genético de las células. Esta prueba fue desarrollada por Bruce Ames y sus colegas en la universidad de California en Berkeley, de ahí que se llame Test de Ames. Debido a que existe una correlación alta entre la mutagénesis y la carcinogénesis y que las pruebas para determinar si un agente

es carcinogénico o no toma mucho tiempo, esta prueba resulta de mucha utilidad para alertar sobre una sustancia.

La prueba consiste en observar si existe una reversión en la mutación de una cepa de bacteria que ha sido adrede alterada genéticamente cuando ésta se encuentra en presencia de la sustancia estudiada. Si dicha sustancia es capaz de alterar a la bacteria para regresar a un estado anterior a la mutación inducida, se dice que es mutagénica. Esta verificación se hace incubando la bacteria en medio de cultivo. La bacteria que ha sido mutada no crece en el medio sin importar el tamaño del inóculo, sin embargo, en presencia del mutagénico, las bacterias sí se presentan.

Por medio del test de Ames, el trabajo de (DeLuca, Chao y Smallwood, 1983) confirmó no solo que el ferrato (VI) removió los contaminantes sino que no produjo sub-productos mutagénicos. Los resultados de la investigación llevada a cabo por (Jiang et al., 2016) también arrojaron negativo a mutagénesis en todas las muestras de agua tratadas con ferrato (VI) usando el mismo test e inclusive otro método adicional.

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y EQUIPOS

En este capítulo se listan los reactivos y equipos usados en el desarrollo de la parte experimental del presente trabajo, desde la fabricación del reactor hasta los ensayos de desinfección.

3.1 Reactivos

A continuación, se presentan los reactivos según su función durante el desarrollo de los experimentos. Estos reactivos son de alta pureza y fueron obtenidos de Sigma Aldrich y Merck. El cultivo de la bacteria *Salmonella typhimurium* ATCC 14028 fue provisto por el Laboratorio de Biología Celular y Virología de la Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Tabla 3.1

Reactivos usados en este estudio

Función	Reactivo
Obtención de iones ferrato (VI)	NaOH
Preparación del medio y cultivo de bacterias	Caldo de soya tripticasa (TSB)
	Agar agar
	Caldo m-endo
	Cultivo de <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 14028
Ensayo de desinfección	NaCl
	KCl
	KH ₂ PO ₄
	MgCl ₂ ·6H ₂ O
	Na ₂ HPO ₄
	CaCl ₂
	NaS ₂ O ₃


Elaboración propia

3.2 Equipos

3.2.1 Maquinaria para la fabricación del reactor con alimentación solar

Figura 3.1


Fresadora CNC

Marca	Emco	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	CONCEPT MILL 155		1 502	1 284	1 925
Voltaje (V)	230	Consumo Energético	5 000	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - PC y PLC integrado - Dimensiones de trabajo: 300 mm eje X, 200 mm eje Y, 285 mm eje Z - Velocidad del cabezal: 150 - 5 000 rpm 					

Fuente: Iberdidac (2012)

Figura 3.2


Prensa de termo transferencia

Marca	Insta	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	Insta 201		600	510	390
Voltaje (V)	220	Consumo Energético	1 800	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Mesa de trabajo: 330 mm X, 330 mm eje Y - Controlador digital integrado - Apertura de graduación vertical 					

Fuente: Insta Graphic Systems (2019)

Figura 3.3

Taladro de banco

Marca	Dayton	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	53UG96		665	434	998
Voltaje (V)	110-220	Consumo Energético	1 000	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Mesa de trabajo: 280 mm X, 300 mm eje Y - Velocidad del cabezal: 420 - 4 800 rpm - Pantalla de protección con interruptor de seguridad magnético 					

Fuente: Grainger (2019a)

3.2.2 Equipo para los ensayos de desinfección

Figura 3.4

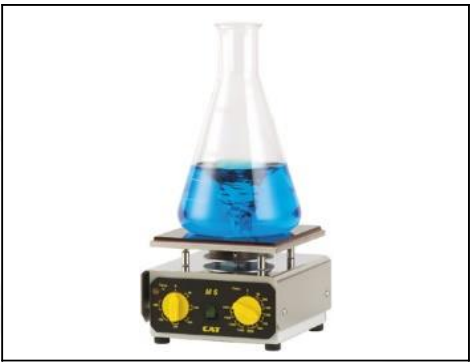
Autoclave

Marca	All American	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	25X		321	321	425
Voltaje (V)	240	Consumo Energético	1 650	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad bruta: 24 L - Presión máxima: 30 psi - Temperatura máxima: 125 °C 					

Fuente: Innovar Tecnología Biomedica SAS (2019)

Figura 3.5


Agitador magnético

Marca	Cat	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	ECM 6		150	150	120
Voltaje (V)	230	Consumo Energético	640	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Rango de temperatura: 40-250 °C - Rango de velocidad: 10-1 200 RPM 					

Fuente: ProfiLab24 (2019)

Figura 3.6


Bomba de vacío

Marca	Leybold	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	Trivac D 1,6 B		508	150	250
Voltaje (V)	220	Consumo Energético	750	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Caudal: 1,6 m³/h - Presión límite: < 0,4 μbar 					

Fuente: Montajes Electromecánicos e Ingeniería SA (2016)

Figura 3.7


Cámara de flujo laminar

Marca	Telstar	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	AV-100		1 230	670	700
Voltaje (V)	230	Consumo Energético	1 500	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Caudal (m3/s): 1 178-1 392 - Velocidad del aire (m/s): 0.40 - Filtros HEPA H14 Eficiencia: > 99,999 % (DOP) Clase 10 					

Fuente: Direct Industry (2019)

Figura 3.8

Centrífuga

Marca	Thermo Scientific	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	Heraeus Labofuge 200		375	284	240
Voltaje (V)	230-240	Consumo Energético	65	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad máxima: 5 300 rpm - Velocidad mínima: 1 600 rpm - Capacidad: 12 tubos x 15 mL 					

Fuente: Daigger Scientific (2019)

Figura 3.9


Espectrofotómetro UV-VIS

Marca	Perkin Elmer	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	Lambda - 40		650	560	260
Voltaje (V)	100 - 240	Consumo Energético	250	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Longitudes de onda de 190 a 1 100 nm - Lámparas halógena y de deuterio - Precisión de 0,1 nm 					

Fuente: Artisan Technology Group (2019)

Figura 3.10


Fuente de poder

Marca	BK Precision	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	1667		274	203	114
Voltaje (V)	100-240	Consumo Energético	285	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Operaciones a voltaje constante - Operaciones a corriente constante - Precisión: 1% 					

Fuente: Final Test S.A. (2019)

Figura 3.11


Incubadora microbiológica compacta

Marca	Thermo Scientific	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	IMC 18		470	260	415
Voltaje (V)	100-240	Consumo Energético	45	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad: 18 L - Rango de temperatura: 17 a 40 °C - Precisión: 1 °C 					

Fuente: Thermo Fisher Scientific (2019a)

Figura 3.12

Incubadora de baja temperatura

Marca	Precision Scientific	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	815		864	787	1 956
Voltaje (V)	230	Consumo Energético	650	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de 566 L - Rango de temperatura: -10 a 50 °C 					

Fuente: Thermo Fisher Scientific (2019b)

Figura 3.13


Medidor multiparámetro

Marca	Hach	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	HQ14D		197	95	45
Voltaje (V)	9V	Consumo Energético	-	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Mide pH, conductividad, salinidad, O2 disuelto, TDS, resistividad. -Almacenamiento de datos automático - Adaptador de conector USB para la transmisión de datos 					

Fuente: Hach (2019)

Figura 3.14


Multímetro

Marca	Fluke	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	77		185	90	43
Voltaje (V)	9V	Consumo Energético	-	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> -Rango de medición de voltaje: 6 - 1 000 V (CA) y 0,6 -1 000 V (CC) -Rango de medición de amperaje: 0,060 - 10,0 A (CA y CC) - Precisión: 0,3% (V), 1,5%(A) 					

Fuente: Grainger (2019b)

Figura


3.15 Potenciómetro

Marca	Ezodo	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	PL-700PC		145	103	250
Voltaje (V)	100-240	Consumo Energético	50	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Rango de pH (de 2 a 16) - Resolución: 0,01 unidades de pH - Mide pH, conductividad, TDS, temperatura, salinidad - Incluye agitador magnético 					

Fuente: Bikrikbd (2019)

Figura 3.16

Test de jarras

Marca	Platypus	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	4 G		650	210	280
Voltaje (V)	100-240	Consumo Energético	66	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<ul style="list-style-type: none"> - Emula condiciones de planta de floculación 					

Fuente: Australian Scientific (2019)

Figura 3.17


Turbidímetro

Marca	Lovibond	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	TB 210 IR		190	110	55
Voltaje (V)	9V	Consumo Energético	-	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<p>Precisión: 2,5% (0-500 NTU) y 5% (500-1000 NTU) -Resolución: 0,01-9,99 NTU =0,01 NTU 10,0-99,9 NTU=0,1 NTU, 100-1000=1 NTU</p>					

Fuente: Lovibond (2019)

Figura 3.18

Vórtex

Marca	VELP Scientifica	Dimensiones (mm)	L	A	H
Modelo	WIZARD		220	180	70
Voltaje (V)	100-240	Consumo Energético	30	W	
Características adicionales			Imagen referencial		
<p>-Velocidad de 0 a 3 000 RPM -Cuenta con sensor IR continuo</p>					

Fuente: Velp Scientifica (2019)

CAPÍTULO 4. MÉTODOS EXPERIMENTALES

4.1 Muestreo de aguas

El siguiente método fue el descrito en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Método 9060 : Recolección) (Eaton et al., 1998).

- **Preparación de materiales**

Las muestras deben ser recolectadas en recipientes de borosilicato o en botellas de plástico que hayan sido lavadas y enjuagadas cuidadosamente con agua destilada o desionizada, y, posteriormente, esterilizadas.

- **Procedimiento**

Después de recolectar la muestra, se debe dejar amplio espacio de aire (al menos 2,5 cm) para facilitar el mezclado antes de la ejecución de pruebas. El agua recolectada debe ser representativa del cuerpo de agua en su totalidad. Es necesario mantener el recipiente de toma de muestra cerrado hasta que vaya a ser utilizado. El tapón y la tapa se deben retirar como uno solo, sin contaminar la superficie interna del tapón ni de la tapa o el cuello de la botella. El contenedor se llena sin enjuagar y se colocan la tapa y tapón inmediatamente. Se recomienda asegurar el cuello de la botella con una capucha.

Para el muestreo de aguas no potables (ríos, corrientes, lagos o reservorios), se toma la muestra cogiendo el recipiente cerca a la base y se hunde con la boca hacia abajo por debajo de la superficie. El recipiente debe estar con el cuello ligeramente levantado y en contra de la corriente. Si no hubiera corriente, se crea una artificialmente presionando la botella de frente y horizontal en una dirección lejana de la mano. El tamaño de la muestra debe ser suficiente para ejecutar todas las pruebas requeridas, preferiblemente no menor a 100 mL.

4.2 Comprobación de pureza de cepa: Método de extendido en placa

El siguiente procedimiento está basado en el *Basic Practical Microbiology* (Society for General Microbiology, 2009).

- **Preparación de medio de cultivo:**

Se rehidrata el polvo de cultivo de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Antes de la esterilización, el polvo debe estar completamente disuelto, usando calor si fuera necesario. Luego se lleva la solución a una autoclave y se calienta hasta 121°C por 15 minutos. En ese tiempo los microorganismos mueren en su totalidad incluidas las endosporas bacterianas.

Luego de la esterilización y que la temperatura del recipiente sea aproximadamente 45 °C, se toma la botella/matraz con la mano derecha y se remueve su tapa/algodón con el dedo meñique de la mano izquierda. Se flamea el cuello de la botella con el mechero, se retira parcialmente la tapa de la placa Petri con la mano izquierda, se vierte el medio en la placa Petri y se vuelve a colocar la tapa de la placa. Se flamea nuevamente el cuello del matraz y se vuelve a colocar su tapa/algodón. Después se rota suavemente la placa para asegurar que todo el medio cubra la placa uniformemente. Se deja solidificar la placa. El agar no debe tocar la tapa de la placa y la superficie debe quedar lisa y sin burbujas. Las placas deben usarse tan pronto sea posible. Si no, deben guardarse inmediatamente en bolsas de plásticos selladas para evitar que el agar se seque.

- **Procedimiento de Extendido en placa:**

El procedimiento comienza aflojando la tapa de la botella que contiene el cultivo. Se toma el asa bacteriológica con la mano derecha, se flamea y se deja enfriar. Luego, se toma la botella con la mano izquierda y se retira la tapa/algodón con el dedo meñique de la mano derecha. Se flamea el cuello de la botella y se inserta el asa en el caldo de cultivo tomándolo firmemente para luego retirarlo. Nuevamente se flamea el cuello de la botella, se repone la tapa/algodón en la botella y se coloca en la gradilla.

Después, se levanta parcialmente la tapa de la placa Petri que contiene el agar solidificado y se unta el asa cargada en la superficie del agar. Se esparce hacia adelante y hacia atrás en un área pequeña en el medio. (Ver zona “A” de la figura 4.1). Después se retira el asa y se cierra la placa Petri. Se flamea el asa y se deja enfriar. La placa se gira 90° en sentido antihorario.

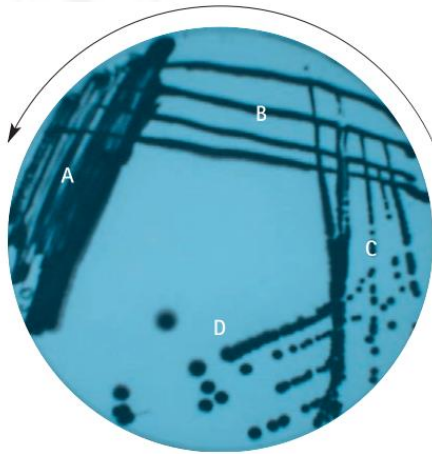
Con el asa fría, dibujar una raya comenzando en el área “A” hasta la zona (“B”) y hacer tres o cuatro líneas paralelas, asegurándose de que una pequeña cantidad del cultivo sea arrastrada. Seguidamente, se remueve el asa y se cierra la placa Petri. Se

flamea el asa, se deja enfriar y se gira nuevamente la placa 90° en sentido antihorario. Desde la zona “B” se dibuja una raya hasta la zona “C” y se dibujan tres o cuatro líneas paralelas.

Finalmente, se remueve el asa y se cierra la placa Petri. Se flamea el asa, se deja enfriar y se gira por última vez la placa 90° en sentido antihorario y se dibuja una línea de la zona “C” al centro de la placa (zona “D”). Se remueve el asa, se cierra la placa Petri y se flamea el asa. Se sella y se incuba la placa en posición invertida.

Figura 4.1

Método de estriado en placa



Fuente: Society for General Microbiology (2009)

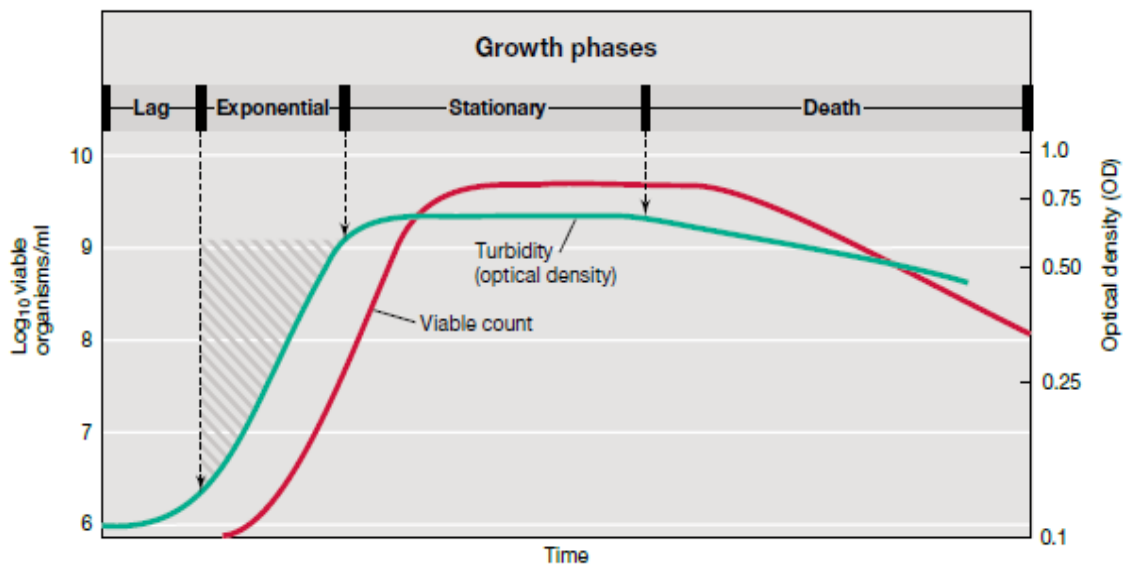
4.3 Curva de crecimiento de bacterias

Cuando se inocula una bacteria en un caldo de cultivo fresco y se la acondiciona según los parámetros de crecimiento específicos, se van a presentar cuatro fases: de latencia, exponencial, estacionaria y muerte. La fase de latencia representa la adaptación de la bacteria al medio, pues esta debe sintetizar enzimas que a su vez producen metabolitos requeridos para el crecimiento. Terminada la adaptación las bacterias comienzan a duplicarse en intervalos regulares, a esta etapa se le denomina exponencial, y es en ella que las bacterias se encuentran en un estado fisiológico óptimo. La duración de esta etapa es muy variable dependiendo de las condiciones de cultivo y a la genética de la propia bacteria.

Cuando algún nutriente esencial del medio se agota o los residuos de los organismos se acumulan, el crecimiento llega a su límite y la razón del crecimiento se vuelve cero, dando lugar a la fase estacionaria. Finalmente, las bacterias llegan a la etapa de muerte que ocurre a un ritmo exponencial, pero más lento que en la fase exponencial, debido a que células viables pueden permanecer meses o hasta años (Madigan, Bender, Buckley, Sattley y Stahl, 2018). Tal como aparece en la figura 4.2, la curva de crecimiento puede construirse midiendo la densidad óptica de la suspensión a través del tiempo.

Figura 4.2

Curva de crecimiento bacteriano.



Fuente: Madigan et al. (2018)

4.4 Estimación de concentración de bacterias en base a la turbidez de la solución bacteriana

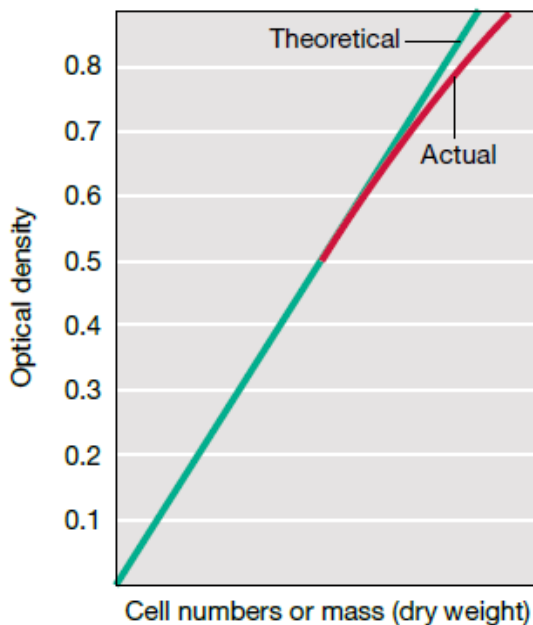
Tomado del libro *Brock Biology of Microorganisms*, (Madigan, Martinko y Parker, 2003). Un método indirecto para obtener un estimado de la cantidad de bacterias es medir la turbidez, que se define como el grado en que un líquido transparente dispersa la luz. Cuantas más células estén presentes, habrá más dispersión y más turbia se verá la suspensión. La turbidez se puede medir tanto con un fotómetro o un espectrofotómetro pues ambos pasan luz a través de la suspensión y miden la cantidad de luz dispersada. La principal diferencia entre ambos equipos es el rango de longitud de onda de la luz que emiten: El fotómetro pasa una luz de longitud de onda relativamente angosta, mientras

que el espectrofotómetro utiliza un prisma para generar una luz que incida en la suspensión a longitudes de onda específicas. Las longitudes comunes son 540 nm (verde), 600 nm (anaranjado), 660 nm (rojo).

Para utilizar las mediciones de turbidez como sustitutos de los métodos de conteo, se debe preparar una curva de calibración que relacione el número de bacterias con la turbidez. Esta curva se construye a partir de un cultivo de bacterias del cual se realizan diferentes diluciones. Se mide la turbidez de cada dilución y luego se hace un cultivo en placa de cada una para determinar el número de bacterias. En la figura 4.3 puede verse que teóricamente la turbidez y el número de bacterias son directamente proporcionales, sin embargo, en la realidad la proporcionalidad está restringida a ciertos límites. Al incrementarse la densidad de bacterias, la luz dispersada por una bacteria puede ser dispersada de vuelta por otra, lo que ocasiona la pérdida de la correspondencia uno a uno entre la turbidez y el número de bacterias.

Figura 4.3

Relación entre la densidad óptica y el número de bacterias.



Fuente: Madigan et al. (2003)

4.5 Método de conteo bacteriano: Siembra por extensión

Se tomó como referencia el Método 9215 C *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Eaton et al., 1998).

- **Preparación de materiales:**

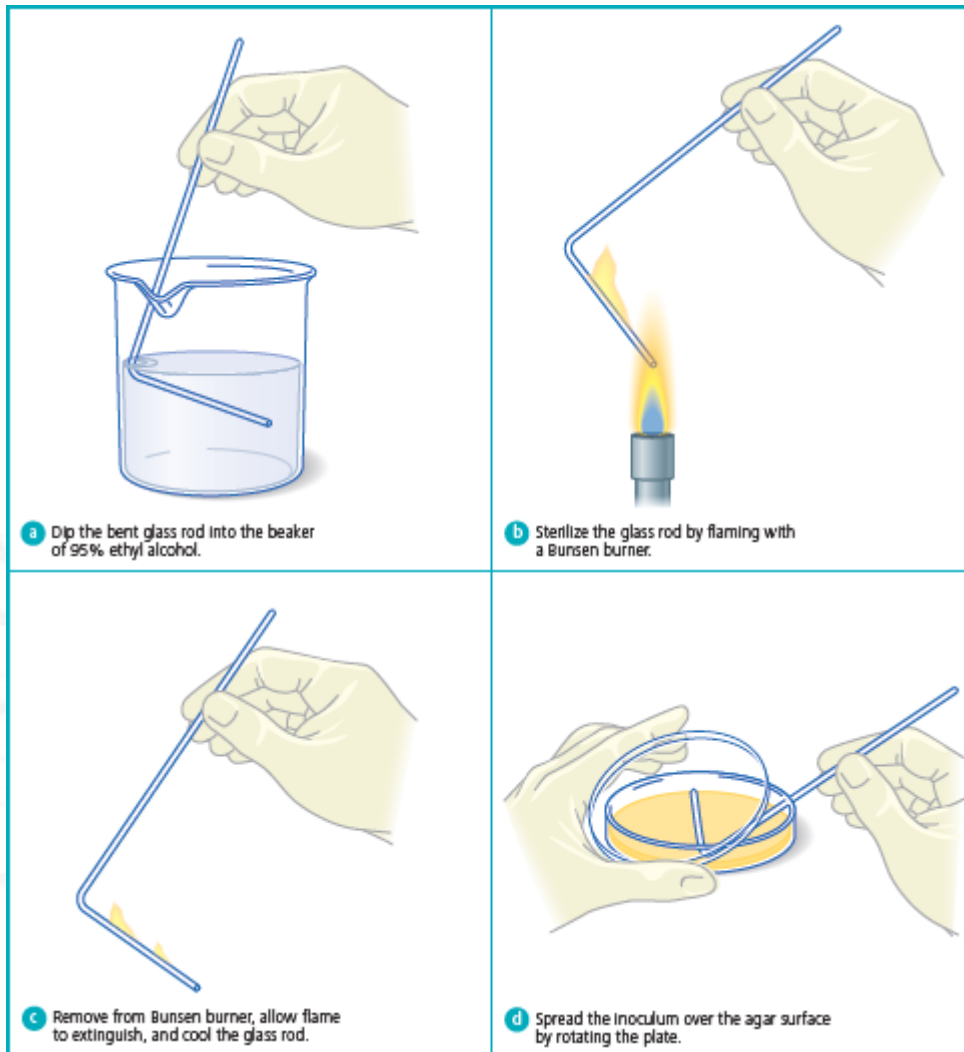
- Varilla de vidrio, pulida al fuego, de 4 mm de diámetro, 200 mm de longitud y con un ángulo de 45 ° a 40 mm desde un extremo (espátula de Drigalski). Se debe esterilizar sumergiéndola en alcohol y exponiéndola a la llama de un mechero.
- Usar pipeta de vidrio de punta redondeada, no de plástico desechable. Placas para cultivo: Verter 15 mL del medio deseado en una placa petri estéril de 100 x 15 o 90 x 15 mm y dejar que el agar solidifique. Pre-secar las placas invertidas con las tapas puestas de tal forma que haya una pérdida de 2 a 3 g. de agua en la noche. Usar las placas pre-secas inmediatamente después de secarse. Para pre-secar las placas y usarlas el mismo día, verter 25 mL de agar en la placa Petri y dejarla en la cámara de flujo laminar a temperatura ambiente (24 a 26 °C) con la tapa abierta para obtener la pérdida de agua deseada.

- **Procedimiento:**

Se pipetea de 0,1 a 0,5 mL de muestra en la superficie del agar solidificado, usando la espátula estéril para distribuir el inóculo en la superficie del medio mientras se rota la placa a mano o con una tabla giratoria. El inóculo debe ser absorbido en su totalidad antes de incubar.

Figura 4.4

Método de siembra por extensión de inóculo.



Fuente: Cappuccino y Welsh (2018)

4.6 Método de conteo bacteriano: Filtrado por membrana usando caldo M-Endo

Este método se tomó del libro de Cappuccino y Welsh (2018). Usando pinzas estériles remojadas en alcohol al 95% y flameadas, se coloca una almohadilla absorbente en cada placa Petri. Con pipetas estériles de 10 mL, se añaden 2 mL de caldo de cultivo m-Endo a cada almohadilla contenido en placas rotuladas.

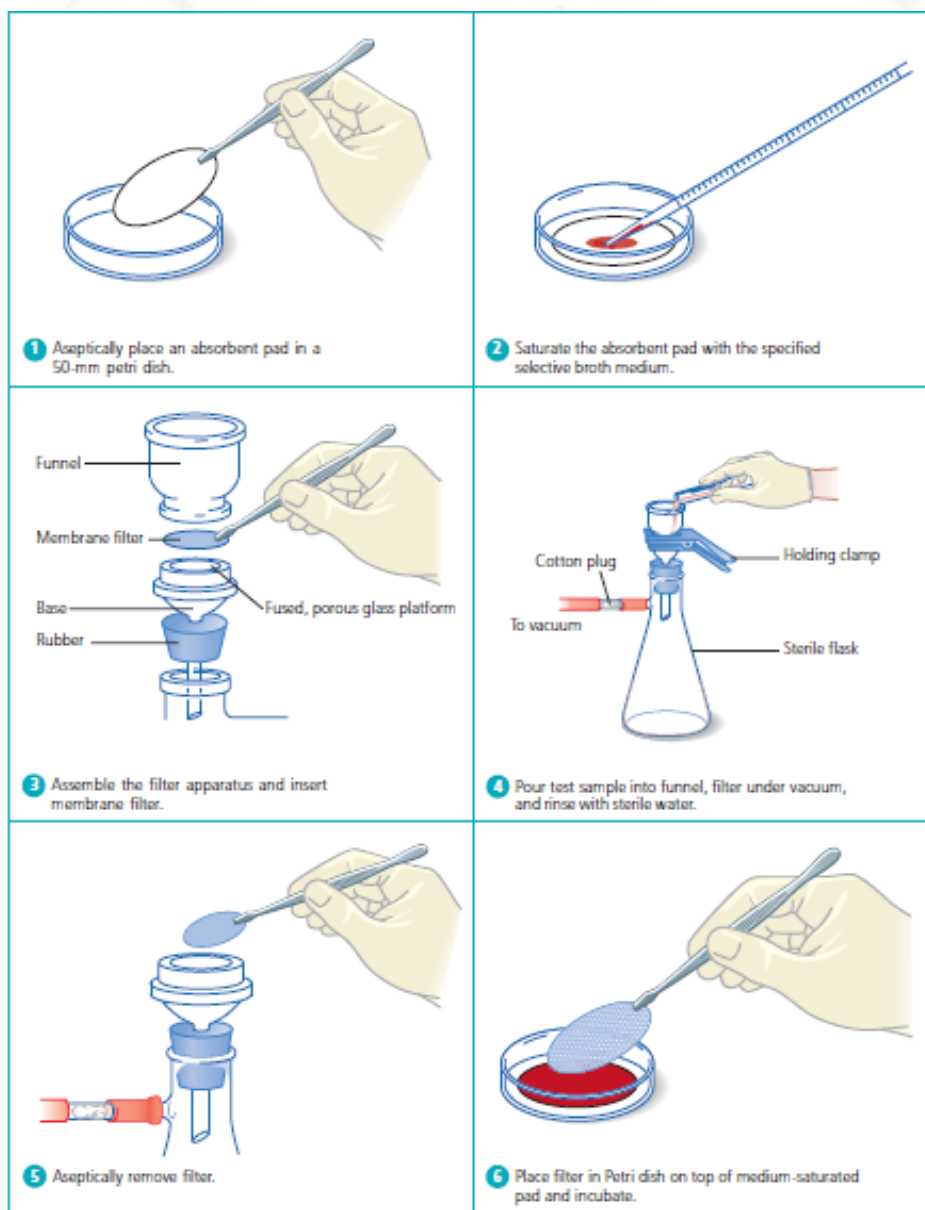
Luego, se debe ensamblar asépticamente la unidad de filtración (usando un filtro de poro 0,45 μm) y filtrar la muestra con la dilución más alta usando una bomba de vacío. Cuando la muestra haya sido filtrada en su totalidad, se lava la superficie interna del

embudo con 20 mL de agua estéril. Después, se debe desconectar la bomba, desarmar la unidad de filtrado y con pinzas estériles retirar el filtro.

Finalmente, colocar el filtro en la almohadilla absorbente saturado de medio, y volver a esterilizar las pinzas para poner un filtro nuevo en la unidad de filtrado. Incubar por 24 horas a 37 °C. El tamaño de muestra ideal es entre 20 y 80 (Clescerl, Greenberg y Eaton, 1999). El resultado luego de la incubación deberá verse como en la figura 4.6 para el caso de la bacteria de este estudio.

Figura 4.5

Método de filtro por membrana

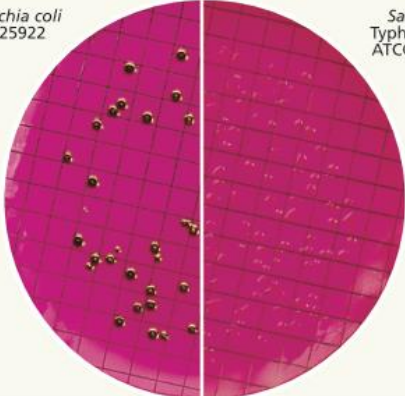


Fuente: Cappuccino y Welsh (2018)

Figura 4.6

Colonias de *E. coli* y *Salmonella typhimurium* en caldo M-Endo

ORGANISM	ATCC™	INOCULUM CFU	RECOVERY	COLONY COLOR
<i>Escherichia coli</i>	25922	20-80	Good	Red with green metallic sheen
<i>Salmonella enterica</i> subsp. <i>enterica</i> serotype Typhimurium	14028	20-80	Good	Colorless to pink
<i>Staphylococcus aureus</i>	25923	$10^3-2 \times 10^3$	Marked inhibition	–



Fuente: Becton Dickinson (2013)

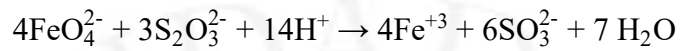
4.7 Preparación de soluciones salinas: PBS y tiosulfato de sodio

Preparación de Buffer PBS: El buffer PBS es una solución salina ampliamente usada en microbiología y cuya finalidad en este campo es preparar soluciones de células microbianas. Este buffer proporciona un medio isotónico así como un pH adecuado (6,8 – 7,4) para mantener la integridad y viabilidad de las células.

Para la preparación de PBS se siguió el procedimiento de Clescerl et al. (1999). A 900 mL de agua destilada se le agregaron 8 g de cloruro de sodio (NaCl); 0,2 g de cloruro de potasio (KCl); 0,2 g de fosfato de potasio monobásico (KH_2PO_4); 0,1 g de cloruro de magnesio hexahidratado ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y 1,15 fosfato de sodio dibásico (Na_2HPO_4). Se disolvió completamente y se añadieron 0,10 g de cloruro de calcio (CaCl_2) disuelto en un poco de agua. Ajustar el pH a 7,4 con HCl o NaOH como sea apropiado. Llenar hasta un litro y esterilizar haciendo pasar por un filtro de 0,22 μm o equivalente.

Preparación de Solución de Tiosulfato: Esta solución se usó con la finalidad de reducir el ferrato (VI) residual en las jarras con agua a tratar, de modo que todas las bacterias estuvieran expuestas al oxidante la misma cantidad de tiempo, tal como en otras investigaciones (Cho, Lee, Choi, Chung y Yoon, 2006; Kazama, 1995).

La preparación está compuesta por una solución de tiosulfato de sodio en buffer PBS. La solución de tiosulfato de sodio se preparó en PBS para amortiguar el cambio en el pH de las soluciones bacterianas a causa de la adición de dicha sal. La relación molar ferrato (VI) y tiosulfato es de 4:3, sin embargo, se puso en exceso y se consideró la masa más grande de ferrato (VI) usada en esta investigación.



$$5,5 \text{ mg} \times \frac{1 \text{ mol FeO}_4^{2-}}{119\,843 \text{ mg}} \times \frac{5 \times (3 \text{ moles S}_2\text{O}_3)}{4 \text{ mol FeO}_4^{2-}} \times \frac{248,18 \text{ g}}{1 \text{ mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}} = 0,043 \text{ g}$$

Para agregar un volumen de buffer que no afecte la concentración de bacterias, se escogió trabajar con 500 μL . Por lo que la concentración se calculó de la siguiente manera:

$$\frac{0,043 \text{ g Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}{0,0005 \text{ L}} = 86 \text{ g Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O/L}$$

CAPÍTULO 5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE IONES FERRATO CON UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN SOLAR

5.1 Diseño de reactor

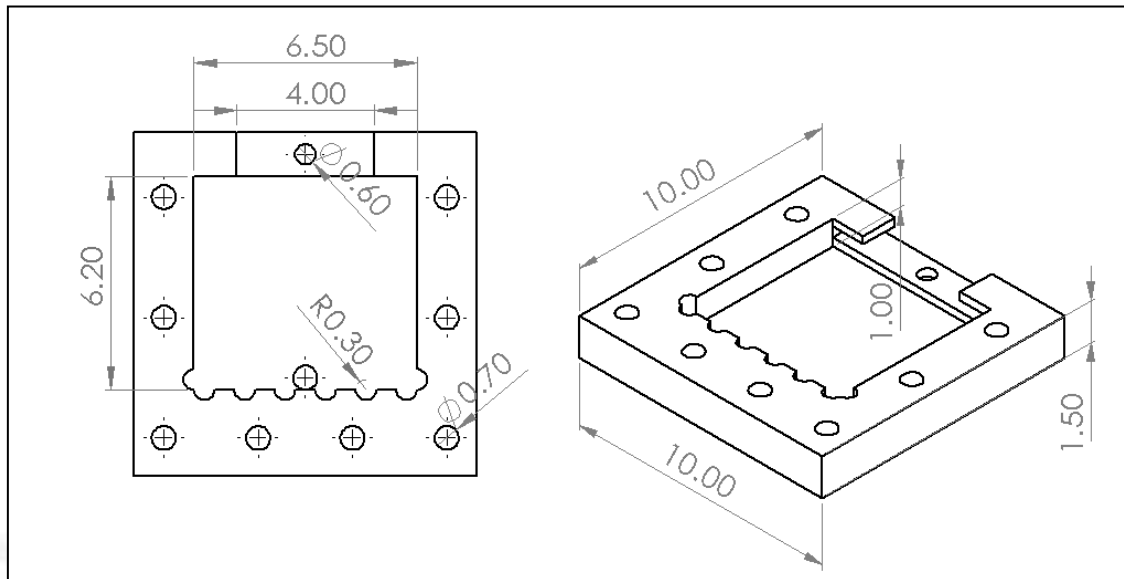
El reactor para la producción de iones ferrato fue diseñado en función de los parámetros sugeridos por la investigación de Quino-Favero et al. (2018), debido a que se usó el mismo ánodo como fuente de hierro. El principal parámetro para el diseño fue la relación S/V (superficie del ánodo sobre el volumen del anolito).

Este reactor se compone de una cámara anódica y una catódica, ambas fabricadas en acrílico (polimetilmetacrilato o PMMA), en donde se alojan un ánodo de hierro de alta pureza de 6,5 cm × 6,2 cm × 0,3 cm y un cátodo de acero inoxidable de iguales dimensiones. Ambas cámaras se llenan de solución de hidróxido de sodio durante el funcionamiento del reactor y se encuentran divididas por una membrana de intercambio catiónico modelo Zibo Cantian CTIEM-1.

La cámara anódica está fabricada en un bloque de 10 cm × 10 cm × 1,5 cm, y consiste en una cavidad rectangular de 6,5 cm × 6,2 cm × 1,0 cm. En la base cuenta con un orificio pasante de 0,7 cm de diámetro que permite la extracción de la solución de iones ferrato cuando termina la producción. Asimismo, posee ocho muescas semicirculares de 0,3 cm de diámetro en la base y paredes laterales inferiores. La finalidad de estas muescas es comunicar el electrolito en ambas caras del ánodo, puesto que ambas se aprovechan para estar en contacto con la solución básica y producir ferrato (VI). Adicionalmente, en la parte superior se tiene una pestaña a cada lado que permite encajar el electrodo en su posición al centro de la cámara. Finalmente, en el centro de la parte superior se tiene un orificio de 0,6 cm de diámetro en donde se ensambla una bornera para facilitar el contacto eléctrico.

Figura 5.1

Vistas frontal e isométrica de la cámara anódica

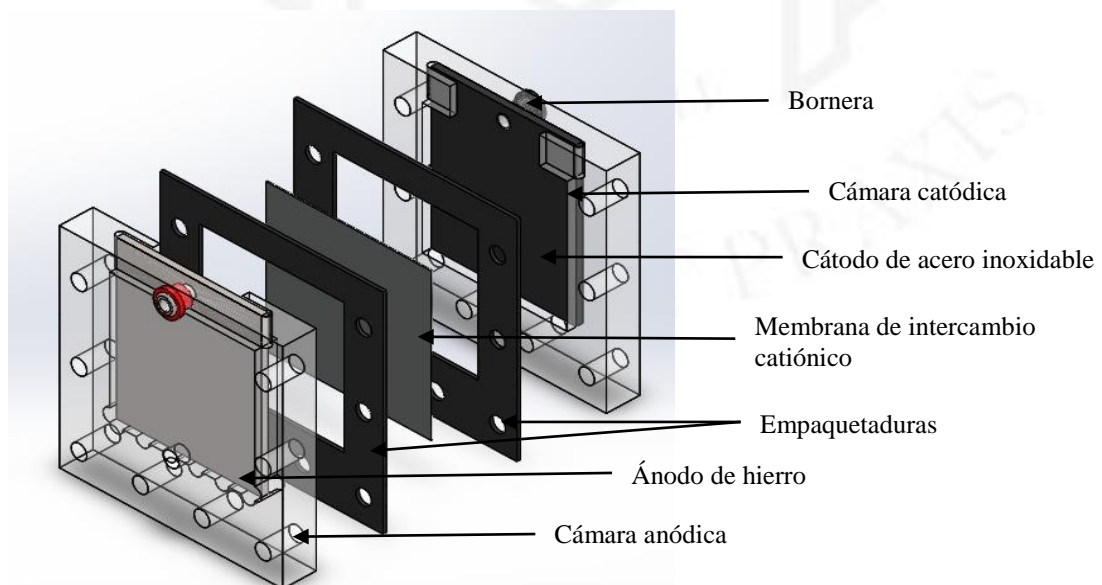


Elaboración propia

Por su parte, la cámara catódica posee la misma estructura que la anódica, sin embargo, su profundidad es menor (0,7 cm) y no cuenta con las muescas inferiores pues no es necesario que la solución de NaOH pase de un lado a otro del electrodo. Las vistas frontal e isométrica de los componentes del reactor se encuentran en la sección de anexos.

Figura 5.2

Vista isométrica de componentes del reactor en software SolidWorks



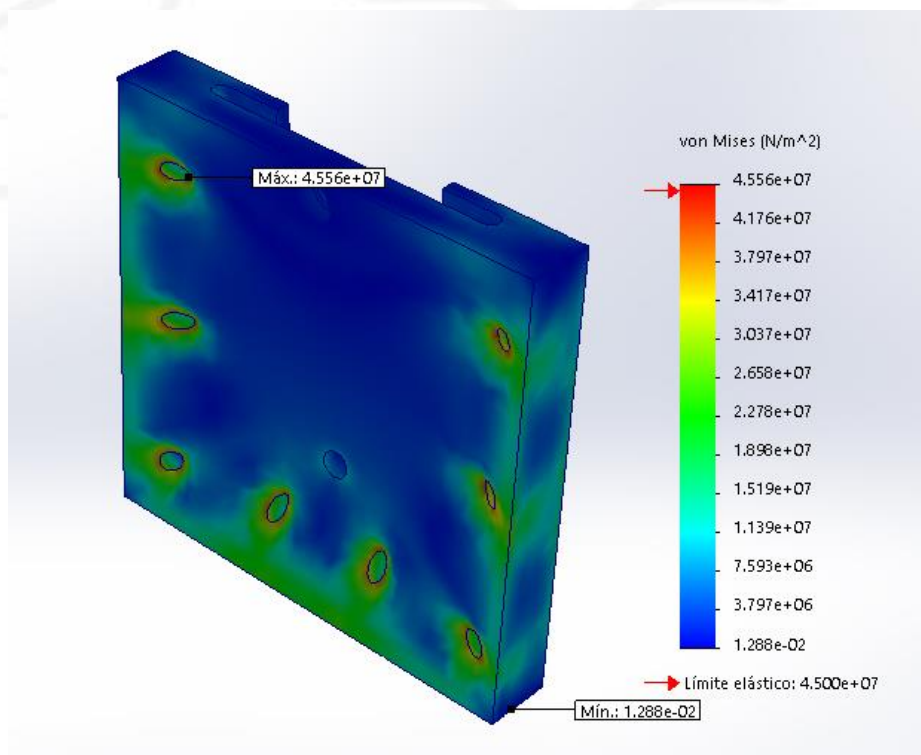
Elaboración propia

5.1.1 Prueba de esfuerzos sobre el reactor

Adicionalmente, se llevó a cabo una prueba estática de esfuerzos sobre el reactor, con el fin de evaluar la presión y deformaciones que podría sufrir al estar ensamblado. La prueba se llevó a cabo empleando un factor de seguridad de 1,8 y considerando valores de 2,0, 2,5, 2,8 y 3,0 KN para la fuerza ejercida por cada uno de los ocho pernos que mantendrán unidos los componentes del reactor. De ella, se pudo concluir que el reactor es capaz de resistir 2,8 KN de fuerza por cada uno de los pernos, antes de que el material acrílico de las paredes exteriores llegue a su límite elástico, en términos de tensión de Von Mises ($4,5 \times 10^7 \text{ Nm}^{-2}$). Asimismo, la mayor deformación se da en la sección cercana al orificio para extraer la solución de ferrato (ver Anexo 3).

Figura 5.3

Prueba de esfuerzos empleando una fuerza de 2,8 KN por perno.



Elaboración propia.

5.2 Diseño del sistema de alimentación solar

El sistema de alimentación solar es el conjunto de componentes que generan y suministran la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del reactor, cumpliendo simultáneamente con los requerimientos de voltaje (**V**) e intensidad de corriente (**I**) en las magnitudes que el mismo demande.

En este sentido, el sistema está compuesto por dos módulos: el módulo de generación y el módulo regulador de corriente. El **módulo de generación** cumple la función de generar energía eléctrica de manera autónoma y de almacenarla para su uso cuando sea requerido. El **módulo regulador de corriente** permite ajustar la intensidad de corriente que circula a través del reactor y al mismo tiempo mantenerla en un nivel constante.

5.2.1 Módulo de generación

Este módulo está compuesto por un panel solar fotovoltaico, un regulador de carga y una batería de plomo-ácido. Las dimensiones de estos componentes fueron seleccionadas en función de la demanda energética del reactor durante su operación normal por 5 horas (un lote de producción). Este proceso requiere de un voltaje de entre 8 y 10 V y una intensidad de corriente de 650 mA. Partiendo de estas condiciones se dimensionaron estos componentes como se muestra a continuación:

- **Panel solar fotovoltaico**

Según la configuración del reactor, los paneles deben ser capaces de entregar hasta 10 V y 650 mA, por tanto, una potencia eléctrica demandada (P_{dem}) de 6,5 W.

$$\text{Potencia eléctrica demandada} = P_{dem} = V \times I = 10 \text{ V} \times 0,65 \text{ A} = 6,5 \text{ W}$$

Esta potencia debe ser suministrada durante 5 horas para la producción de un lote, lo que equivale a un requerimiento de energía (E_{dem}) de 32,5 Wh/lote.

$$E_{dem} = P_{dem} \times \text{Tiempo/lote} = 6,5 \text{ W} \times 5 \text{ h/lote} = 32,5 \text{ Wh/lote}$$

Adicionalmente, la energía eléctrica que el sistema puede suministrar durante un día ($E_{sistema}$) debe ser mayor o igual a la energía demandada por el reactor. La $E_{sistema}$ se

calcula en base a la potencia del sistema (W_{sistema}^1) y al número de horas sol picos equivalentes disponibles (HS_pE). Las HS_pE fueron previamente calculadas a partir de la radiación solar diaria promedio incidente en Lima, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2003). Se tomó como base la radiación promedio en agosto, debido a que este es el mes con menos radiación, es decir, el más crítico, con un valor promedio de 4,0 HS_pE .

$$E_{\text{sistema}} = W_{\text{sistema}} \times HS_pE = n \times W_p \times HS_pE \geq E_{\text{dem}}$$

Por lo tanto, el conjunto de paneles que alimente al sistema debe tener como mínimo una potencia (W_{sistema}) de 8,13 W/lote. Para cubrir esta demanda se seleccionó un panel solar de 10 W (Omicron SP-10 10W 17,8V 0,8A)

$$W_{\text{sistema}} \geq \frac{E_{\text{dem}}}{HS_pE} \geq \frac{32,5 \frac{\text{Wh}}{\text{lote}}}{4,0\text{h}} \geq 8,13 \text{ W/lote}$$

- **Batería eléctrica**

De igual manera, la batería debe poder operar con una tensión de al menos 10 V e intensidad de 0,65 A. Asimismo, se consideró que la capacidad de la batería (Q_{bat}) debe ser suficiente para la producción de un lote de ferrato, considerando tres días de autonomía. Este factor servirá como medida de seguridad ante condiciones climáticas desfavorables que impidan que los paneles solares generen energía eléctrica regularmente. Asimismo, el dimensionamiento de la batería considera una profundidad de descarga (P_d) del 50%, recomendada por el fabricante para extender la vida útil de la misma. De entre las opciones disponibles en el mercado, se eligió una batería de 12 V capaz de operar con una intensidad de corriente máxima de 2 A (RITAR RT1245 batería de plomo-ácido 12V 4,5Ah).

1

W_{sistema} se obtiene al multiplicar la potencia pico (W_p) de cada panel multiplicada por el número de paneles solares (n). La W_p es un parámetro del panel solar que indica la máxima potencia eléctrica que genera a condiciones estándares.

$$Q_{\text{bat}} \geq \frac{3 \times E_{\text{dem}}}{V_{\text{bat}} \times P_d} \geq \frac{3 \times 8,13 \frac{\text{Wh}}{\text{lote}}}{12 \text{ V} \times 0,5} \geq 4,07 \text{ Ah/lote}$$

- **Controlador de carga**

Las dimensiones del controlador de carga se definen en función de su voltaje de operación (que debe ser el mismo que el voltaje nominal del panel solar y de la batería), así como de su corriente nominal de entrada/salida. En cuanto a la corriente nominal, esta debe ser como mínimo la requerida por el reactor, en este caso, 0,65 A. Teniendo estas consideraciones, se eligió el modelo Juta Solar 12 V - 12 A.

5.2.2 Módulo regulador de corriente

Este módulo consiste en un circuito capaz de controlar el voltaje constante y corriente variable que suministra el módulo generador y entregar al reactor una corriente constante y voltaje variable. El diseño del circuito puede observarse en la figura 5.3 mientras que el esquema real del circuito puede verse en la figura 5.5.

Los componentes utilizados para fabricación de este circuito son:

- Papel transfer para impresión de circuitos
- Placa de cobre para circuitos de 5 cm x 5 cm
- MOSFET IRFP064N
- OPAM LM358N
- Potenciómetro B 5K
- Resistencias de 1 Ω (R1) y 25k Ω (R2)
- Convertidor de potencia Step Down LM2596S
- Disipador de calor de aluminio
- Estaño para soldadura

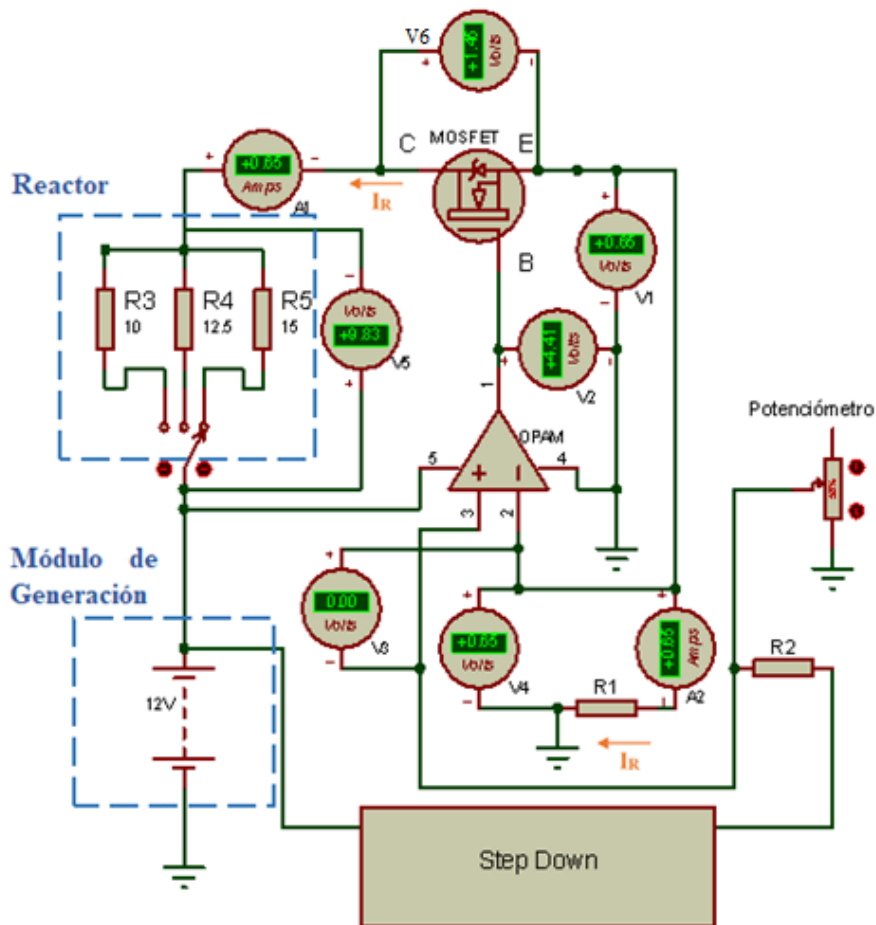
El funcionamiento del módulo regulador de corriente (Figura 5.3) se basa en la configuración de un amplificador operacional (OPAM) y del transistor de efecto de campo MOS (MOSFET). El OPAM es un dispositivo que compara dos tensiones (de la entrada inversora (2) y no inversora (3)) y según cual es mayor, entrega un voltaje de salida (1) equivalente al de alimentación positiva (5) o negativa (4). Cuando el OPAM se configura en lazo cerrado con retroalimentación negativa, como la usada en este circuito,

tiene la propiedad de igualar la tensión de las entradas inversora y no inversora. Por otro lado, el MOSFET funciona al recibir una señal de voltaje en la patilla base (B) que se traduce en un paso de corriente proporcional a dicha señal por las otras dos patillas, colectora (C) y emisora (E).

En el módulo regulador, la salida del OPAM (1) sirve de señal para el MOSFET, mientras que su terminal emisor (E) se conecta al terminal (2) del OPAM, cerrando así el lazo de realimentación negativa. Con esto se consigue que el potencial en los puntos (2), (3) y (E) se igualen. Asimismo, este potencial, medido con los voltímetros V1 y V4 es igual al voltaje de la resistencia R1, por tanto, proporcional a la corriente que pasa por ella (I_R). Dado que dicha corriente es la misma que la que pasa por el MOSFET, es también igual a la corriente que pase por la carga, que en este caso es el reactor para producción de ferrato.

Figura 5.4

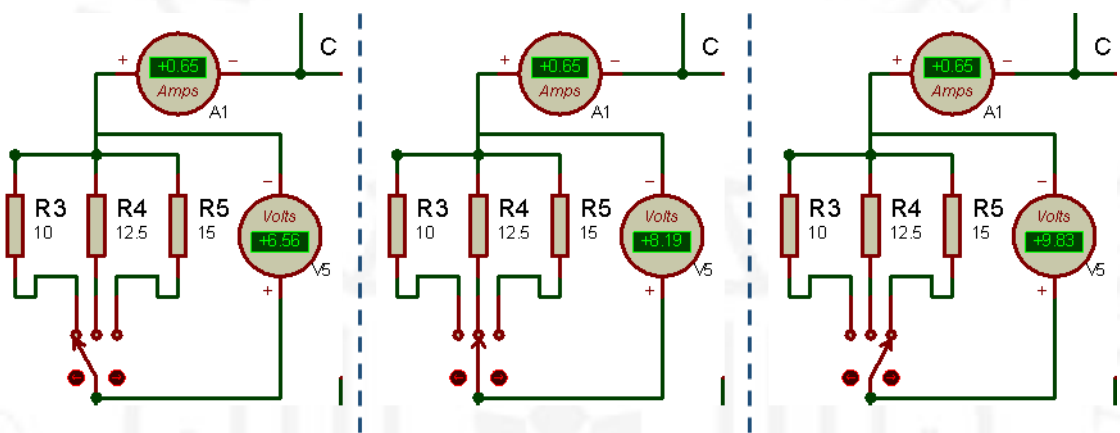
Esquema del sistema de producción de iones ferrato en software Proteus



Elaboración propia

Adicionalmente, la configuración del circuito permite ajustar la caída de tensión del MOSFET en respuesta a la variación de la resistencia del reactor, el cual está representado en la figura como un juego de tres resistencias (R3, R4 y R5) conectadas a un interruptor de 3 vías que permite alternar entre ellas. De esta manera, la corriente I_R que pasa por el reactor se mantiene constante, aunque su resistencia varíe, como se aprecia en la Figura 5.4.

Figura 5.5
Simulación del circuito controlador de carga

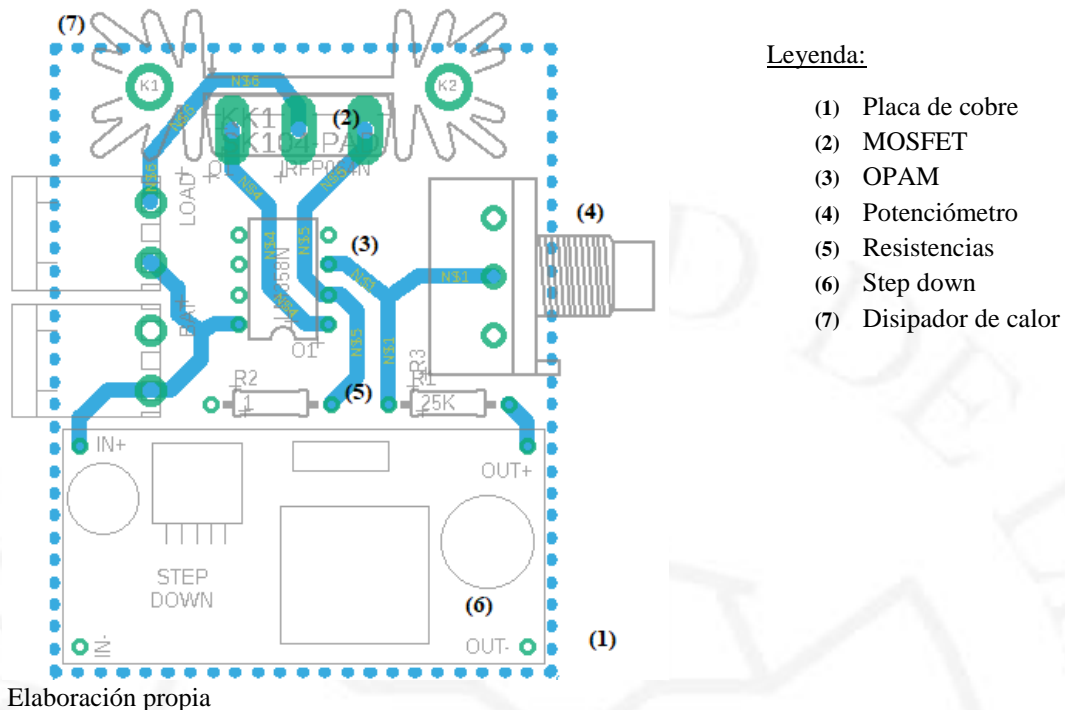


Elaboración propia

Finalmente, el potenciómetro conectado en serie con R2 permite regular el potencial del terminal (3) del OPAM, y, en consecuencia, permite regular también la corriente I_R .

Figura 5.6

Disposición real de componentes del circuito en software Eagle



Leyenda:

- (1) Placa de cobre
- (2) MOSFET
- (3) OPAM
- (4) Potenciómetro
- (5) Resistencias
- (6) Step down
- (7) Disipador de calor

5.3 Construcción del reactor de producción de iones ferrato con alimentación solar

- **Reactor**

A partir del sólido diseñado en SolidWorks y mediante el software Edgcam se elaboró el código G, el cual es una secuencia de instrucciones para las operaciones de maquinado en la fresadora CNC. Este código se cargó en dicha máquina y se ejecutó. El procesamiento de cada pieza tomó 1 hora, tiempo que contempla la preparación del equipo, el posicionamiento de la materia prima y el maquinado.

Posteriormente, se perforaron orificios pasantes en las piezas para los pernos y las borneras usando un taladro de banco. Después, se acopló un electrodo a cada pieza de acrílico usando como unión la bornera. Finalmente se empernaron las piezas de acrílico junto con las empaquetaduras y la membrana.

- **Circuito regulador de corriente**

Las pistas del circuito (Figura 5.5) se imprimieron sobre papel transfer con una impresora láser. Posteriormente, el diseño se transfirió sobre una placa de cobre para

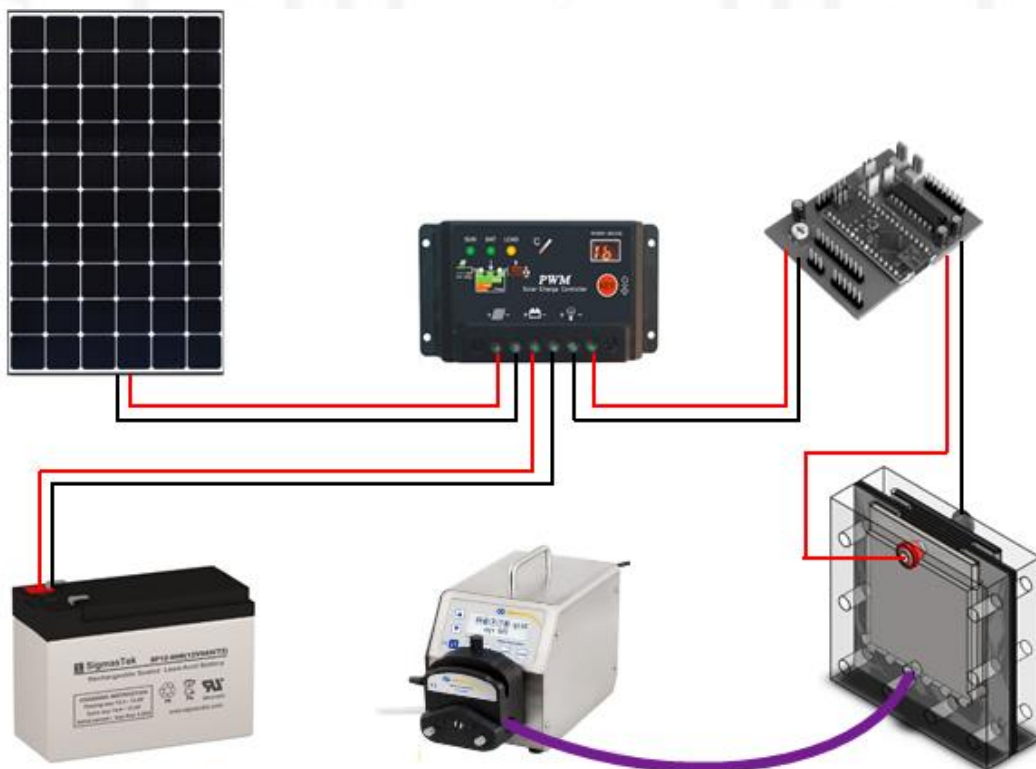
circuitos usando una prensa de termo transferencia. Una vez transcurrido el tiempo necesario, se retiró la pieza y se bañó en cloruro férrico. Esto sirvió para retirar el excedente de cobre y dar forma al circuito. Finalmente la placa se limpió y se lijó, dejándola lista para perforarla y soldar los componentes.

- **Ensamble del sistema**

Al controlador de carga se le conectó primero la batería y luego el panel solar, completando así el módulo de generación de energía. La salida del controlador de carga se conecta al circuito de regulador de corriente, el cual a su vez alimenta al reactor. En la figura 5.6 puede verse el esquema del módulo. Se ha añadido una bomba al sistema para ilustrar la salida del ferrato (VI), sin embargo para los experimentos no fue necesario su uso.

Figura 5.7

Esquema del módulo de producción de iones ferrato



Elaboración propia

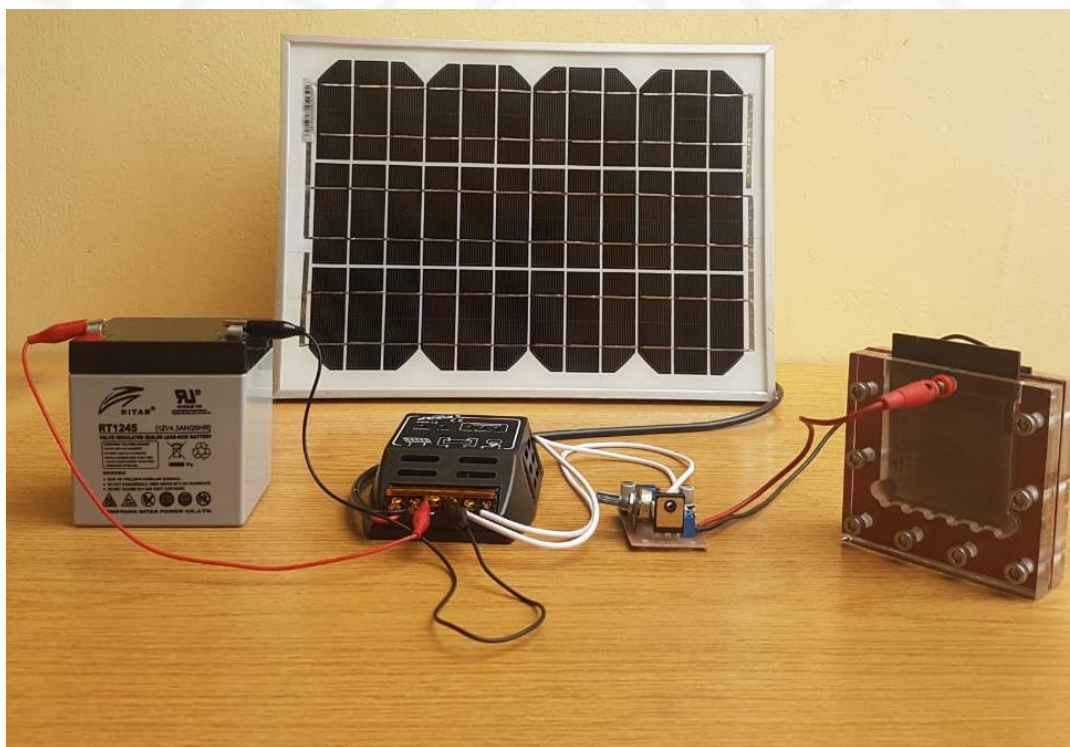
CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Producción de iones ferrato a través de la disolución anódica de un electrodo de hierro y determinación de su concentración molar.

Armado el sistema según el esquema de la Figura 5.6, previo pulido y decapado del ánodo con una solución diluida de HCl, se llenaron ambas cámaras del reactor (catódica y anódica) con la solución de NaOH 20 M hasta cubrir toda la superficie de los electrodos. Se conectó un multímetro en serie con el reactor para poder verificar que el circuito esté suministrando 650 mA (8 mA/cm^2) (regulado con la perilla del potenciómetro) y se dejó funcionando por 5 horas.

Figura 6.1

Fotografía de módulo de producción de iones ferrato



Elaboración propia

Como se mencionó en la sección 5.1.1, se usó un ánodo con la misma composición que la reportada por Quino-Favero et al. (2018). La composición se determinó por espectrometría de masa usando un Spectrol Spectrolab en la compañía peruana Fundación Central.

Tabla 6.1

Composición del ánodo

C	Cr	Cu	Zr	Si	Mo	Nb	B	Mn	Ni
0,0470	0,0210	0,0110	<0,01	0,0550	<0,01	<0,01	<0,01	0,1280	0,0130
Ti	N	P	Al	V	O	S	Co	W	Fe
0,0010	0,0060	0,0120	0,0190	<0,01	0,0200	0,0060	<0,01	<0,01	99,6500

Fuente: Quino-Favero et al. (2018)

Para la determinación de la concentración de ferrato (VI) se usó el método espectrofotométrico. El ferrato (VI) posee un color morado característico que corresponde al espectro visible. Se midió a 505 nm debido a que la máxima absorción de ferrato (VI) se da a esa longitud de onda y se usó una extinción molar de 1 050 L/(mol .cm), que fue determinada en otra investigación (Stanford, Jiang y Alsheyab, 2009).

Para obtener la concentración se midió la absorbancia de una cubeta que contenía una solución de ferrato (VI) diluida 15:2 500 en NaOH 20 M y se le restó el resultado de la absorbancia del blanco (solo electrolito). Para convertir la absorbancia a mol/L se usó la ley de Lambert-Beer (sección 2.3) que indica que la absorbancia está directamente relacionada con la concentración y con la longitud de la trayectoria del haz de luz que atraviesa la muestra y se multiplicó el resultado por su factor de dilución.

6.2 Construcción de curva de crecimiento de la bacteria *Salmonella typhimurium* para determinar la duración de sus fases de desarrollo.

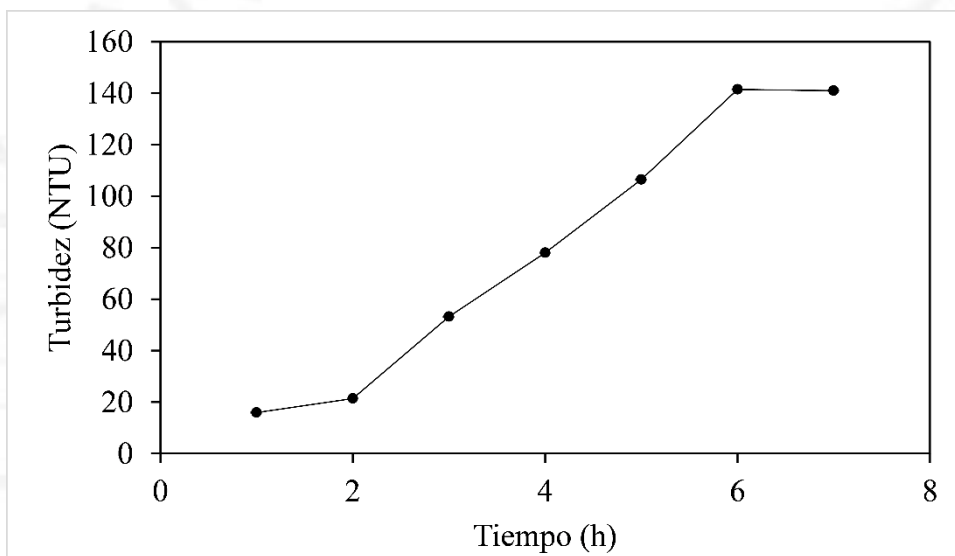
Se recibió del laboratorio de la UPCH un tubo con caldo TSB (trypticase soy broth) que contenía la cepa *S. typhimurium* ATCC 14028 y se reprodujo en placas de TSA (trypticase soy agar) por medio del método de estriado para confirmar la pureza del cultivo. Con un asa estéril se transfirieron las colonias en varios tubos con agar y se incubaron por 24 horas. Pasado este tiempo se almacenaron en la refrigeradora a 7°C. Esos tubos constituyeron el stock de bacterias para los experimentos de esta tesis.

Para construir la curva se sembraron 3 asadas de uno de los frascos stock en 50 mL de medio de cultivo TSB contenido en un Erlenmeyer con indentaciones y se incubó a 37°C en un agitador orbital durante 18 horas a 200 RPM para lograr la reproducción de los microorganismos. A este cultivo luego de las 18 horas se le denominó “cultivo fresco”. Se tomaron 5 mL del mismo y se introdujeron en otro matraz de 50 mL con caldo

TSB. Este segundo matraz también se dispuso a incubar y a agitar a la misma velocidad. Cada hora se retiró 1 mL de caldo con bacterias, se diluyó en 10 mL de agua salina (NaCl al 0,85%) y se midió en el turbidímetro. Se terminaron de hacer las mediciones cuando se alcanzó la fase estacionaria. Tal como indica la figura 6.1, la fase exponencial acaba cuando empieza la estacionaria: a las 6 horas. Con este gráfico se determinó el tiempo de incubación para obtener el cultivo en su fase más saludable: 5 horas.

Figura 6.2

Curva de crecimiento bacteriano



Nota: Puntos negros corresponden a promedios de experimentos hechos por duplicado.
Elaboración propia.

6.3 Construcción de una curva que relacione la turbidez de la solución bacteriana con su concentración.

El siguiente experimento tuvo como finalidad relacionar mediante la turbidez la concentración bacteriana de una muestra.

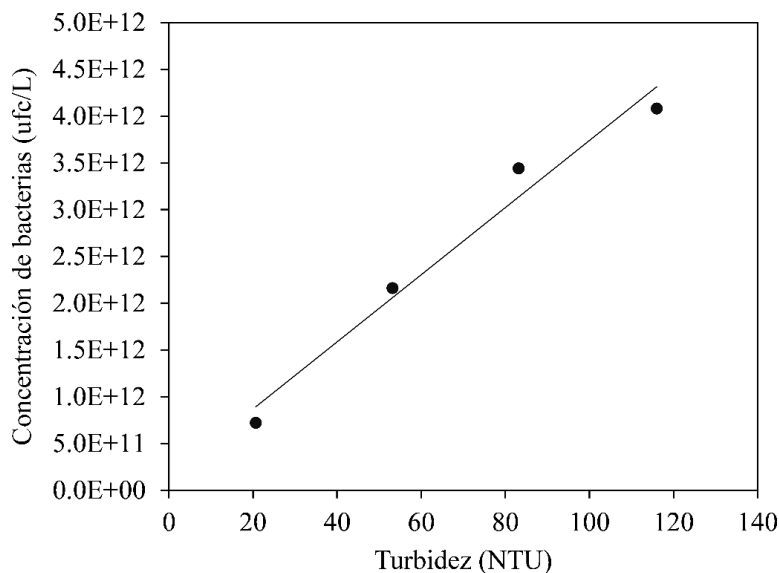
A una muestra de cultivo fresco que estuvo incubando en un agitador orbital durante 18 horas se le retiraron 5 mL y se sembraron en 50 mL de medio de cultivo TSB contenidos en un matraz. Se incubó este segundo matraz en el mismo agitador durante 5 horas a 37 °C, que es el tiempo en el que la bacteria alcanza la fase exponencial tardía. Después se procedió con el lavado de las bacterias con solución salina (NaCl al 0,85%) con la finalidad de obtener la muestra denominada “base”. El lavado consistió en retirar 10 mL de la muestra base en un tubo estéril de plástico, centrifugar el tubo por cinco

minutos a 1321 x g y drenar el sobrenadante para luego llenar nuevamente el tubo hasta un volumen de 10 mL con solución salina. Se centrifugó 2 veces. Esto con la finalidad de obtener un inóculo con colonias separadas y también para aislar a las colonias de las sustancias contenidas en el caldo.

Luego se hicieron 4 diluciones en tubos de vidrio con las siguientes proporciones 7/20, 5/20, 3/20 y 1/20 (muestra base: agua salina). Se midió la turbidez de cada uno de los 4 tubos. Posteriormente, por dilución sucesiva, se diluyeron los 4 frascos 10^6 veces. De la última dilución de cada muestra se extrajeron 250 μL y se depositaron en placas Petri con agar MacConkey. Se difuminaron las bacterias en el agar con ayuda de un rastrillo bacteriológico estéril y se dejaron incubar durante 24 horas (Método de extendido en placa). Por cada muestra se hicieron 2 placas Petri y se contabilizaron las unidades formadoras de colonias (UFC). Por último, se construyó un gráfico con la finalidad de relacionar la turbidez con la cantidad de UFC. La función de la curva es $1,480 \times 10^{11} + 3,591 \times 10^{10}$ y el coeficiente de determinación fue de 0,9718. De esta forma cada vez que se prepare una muestra base, podría conocerse la concentración inicial al reemplazar la turbidez en la función.

Figura 6.3

Curva de calibración de ufc/L vs. turbidez



Nota: Puntos negros corresponden a promedios de experimentos hechos por duplicado. Elaboración propia.

6.4 Ensayo de desinfección en agua real para riego con inóculo de bacteria *S. typhimurium* contra varias concentraciones de ferrato (VI)

Las pruebas de desinfección se condujeron en agua del reservorio del INIA que proviene directamente del Río Rímac. En setiembre de 2016, como parte de un monitoreo llevado a cabo por el INIA se caracterizó el agua de este reservorio, cuyos resultados de contenido de metales, no metales, DBO y DQO se muestran a continuación:

Tabla 6.2

Caracterización de agua de reservorio INIA.

Elemento	mg/L	Elemento	mg/L	Elemento	mg/L	Elemento	mg/L
Li	0,1114	Co	0,0010	Cd	0,0022	U	0,0006
B	0,2860	Ni	0,0018	Sn	<0,0004	Na	25,7936
Be	<0,0006	Cu	0,0314	Sb	0,0026	Mg	9,3026
Al	0,8215	Zn	0,3818	Ba	0,0439	K	4,8655
P	1,4135	As	0,0228	Ce	0,0012	Ca	88,3311
Ti	0,0343	Se	<0,0002	Hg	<0,0001	Fe	0,9039
V	0,0013	Sr	0,9062	Tl	<0,0003	Si	7,4385
Cr	0,0030	Mo	0,0054	Pb	0,0104	DBO ¹	9,8000
Mn	0,0962	Ag	<0,0002	Bi	<0,0003	DQO ²	32,6000

*Nota: 1 Demanda biológica de oxígeno, 2 Demanda química de oxígeno
Informe con valor oficial No. 77688L/16-MA-MB emitido por laboratorio Inspectorate
Elaboración propia

Para esta prueba se extrajo agua del estanque del INIA siguiendo el protocolo de muestreo previamente descrito. En el laboratorio, media hora después de la recolección del agua, se midieron los parámetros más relevantes para nuestro estudio (temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad y turbidez). Esta agua pasó por varias filtraciones. Se pasó el líquido a través de papel filtro en un embudo para retirar las partículas grandes y finalmente se hizo pasar por un filtro de 0,45 μ m con una bomba de vacío. Se definió el pH de trabajo en 8,2 debido a que es el valor promedio de los medidos en las estaciones del monitoreo descrito anteriormente. Dado que el agua a tratar se encontró en un pH muy cercano (8,17), no fue necesario un ajuste.

Previamente se prepararon el ferrato (VI) y la muestra base de bacterias. Luego se midió la turbidez a la muestra base de bacterias para determinar la concentración inicial y se midió la concentración del ferrato (VI) por espectroscopía UV/Vis.





En el test de jarras se llenó cada jarra con 1 L del agua filtrada. Se inoculó un volumen de la muestra base a cada jarra para llegar a 10^9 bacterias por litro y se mezcló a $99,2 \text{ s}^{-1}$ por 1 minuto. Luego se agregaron 2,5, 3,5, 4,5 y 5,5 mg de ferrato (VI) a las jarras A1, B1, C1 y D1 respectivamente y se agitaron durante 1 minuto a $515,4 \text{ s}^{-1}$ y luego por 15 minutos a $99,2 \text{ s}^{-1}$. Acabado ese tiempo se vertió un volumen de 500 μL de solución de tiosulfato de sodio a cada jarra para terminar de reducir el ferrato (VI). Asimismo, se preparó una jarra a la cual solo se le agregó bacterias, el tiosulfato y un volumen de NaOH 20 M equivalente al dosificado en la última jarra, de modo que actúe como control y que la variación en el valor de pH no confunda los resultados.

Para determinar el número de bacterias remanentes después de los ensayos de desinfección, se filtraron 50 μL de cada jarra a través de un filtro de 0,45 μm , añadiendo solución salina para distribuir adecuadamente las células en el filtro. Dichos filtros fueron dispuestos en placas Petri de plástico estériles que contenían almohadillas con caldo M-Endo. Para la jarra control se hicieron dos diluciones sucesivas de 1:100 y se filtró 1 mL. Las placas se incubaron a $37 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 h luego de las cuales se hizo el recuento de las UFC. A partir de este recuento se calculó el número total de bacterias remanentes en cada jarra.

En la tabla 6.3 se pueden apreciar las placas luego de la incubación. La figura 6.4 muestra la disminución de bacterias con el tratamiento de ferrato (VI). Puede observarse que con la dosis más baja hubo una reducción de aproximadamente dos órdenes de magnitud y que con la dosis más alta hubo una reducción de más de cuatro órdenes de magnitud. Un resultado similar fue encontrado en el estudio hecho por Jiang, Wang y Panagouloupoulos (Jiang, Wang y Panagouloupoulos, 2007), en que usó *Escherichia coli* y un pH inicial de 7,5. En dicho estudio demostró que la acción del ferrato (VI) se vio favorecida con la disminución del pH, por lo que sería recomendable disminuir el pH inicial del efluente.

Tabla 6.3

Resultados de desinfección en agua de riego contaminada con *S. typhimurium*

<p>Jarra A1 (2,5 mg FeO_4^{2-}). Vf: 500 μL Conteo: 383 bacterias</p> 	<p>Jarra B1 (3,5 mg FeO_4^{2-}). Vf: 500 μL Conteo: 159 bacterias</p> 
<p>Jarra C1 (4,5 mg FeO_4^{2-}). Vf: 500 μL Conteo: 108</p> 	<p>Jarra D1 (5,5 mg FeO_4^{2-}). Vf: 500 μL Conteo: 3</p> 

(continúa)

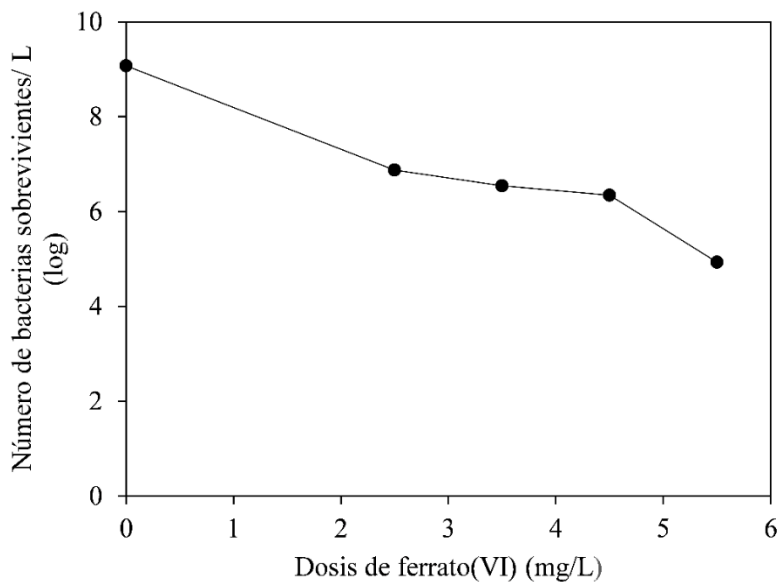
(continuación)



Vf: Volumen pasado por el filtro
Elaboración propia

Figura 6.4

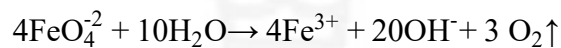
Desinfección de agua de riego contaminada con *S. typhimurium*



Nota: Puntos negros corresponden a promedios de experimentos hechos por duplicado.
Elaboración propia.

En cuanto a los parámetros finales del agua tratada, se incrementaron el pH (muy considerablemente), el oxígeno disuelto, la conductividad y la turbidez (Tabla 6.4). Tanto el pH como la conductividad se incrementaron debido a la adición de hidróxido de sodio,

matriz de los iones ferrato. El pH deberá corregirse antes o después de la dosificación de ferrato (VI) para cumplir con el estándar máximo recomendado por el ECA para agua de riego (8,5); la conductividad, por otra parte, alcanzó el valor máximo de 823 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con la dosificación máxima, muy por debajo del valor máximo recomendado (2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). El incremento del oxígeno disuelto se considera una bondad del sistema, debido a que el agua rica en O_2 es favorable para el desarrollo saludable de las raíces de sembríos (Marlow, 2009). Asimismo, el ECA recomienda que este valor sea mayor a los 4 ppm. El incremento de O_2 disuelto se debe a que el ferrato (VI) oxida el agua liberando oxígeno, de acuerdo con la siguiente reacción (Cui, Zheng y Deng, 2018; Goff, Kidwell, Lauher y Murmann, 1973):



Por último, el incremento de la turbidez se debió a la formación de flocs producto de la acción coagulante del ferrato (VI). Debido a que no se dio tiempo para la sedimentación de los flocs, la muestra resultó turbia. De otro modo, la turbidez no se hubiera incrementado considerablemente.

Tabla 6.4
Resultados de los parámetros del agua post-tratamiento

	Jarra A1	Jarra B1	Jarra C1	Jarra D1	Blanco 1	Agua filtrada
pH	9,61	9,83	9,98	10,13	10,15	8,17
T (°C)	27,20	27,20	27,10	27,10	27,00	26,80
O_2 (mg/L)	6,93	7,02	7,15	7,21	6,75	6,80
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	729	764	788	823	805	560
Turbidez (NTU)	4,10	8,82	11,40	21,30	8,10	<0,1

Elaboración propia

6.5 Ensayo de desinfección en agua real para riego con bacterias propias contra varias concentraciones de ferrato (VI)

Se tomó agua del estanque de INIA como en el punto 6.4 e inmediatamente se dispuso en un cooler con hielo para poder trasladarlo al laboratorio con la finalidad de conservar los microorganismos. En menos de dos horas de haber tomado la muestra se hizo el test



de jarras, ajustando previamente el pH a 8,20 para igualarlo al pH definido inicialmente. Se probaron cuatro dosis de ferrato (VI): 0,75, 1,50, 2,25 y 3,00 mg en las jarras A2, B2, C2 y D2 respectivamente, considerando que en experiencias previas se había determinado un máximo de 60 mil bacterias coliformes por litro en ese punto de agua. Las velocidades y tiempos de agitación fueron los mismos que el experimento anterior y también se agregaron 500 µL de la preparación de tiosulfato.

Los volúmenes filtrados por cada jarra fueron 10 mL para las jarras A2-C2, 50 mL para la jarra D2 y 2,5 mL para el blanco. Se incubaron a 37 °C por 24 horas y se hizo el recuento de las UFC. En la Tabla 6.5 pueden observarse las placas luego de la incubación. Puede notarse que hubo hasta cinco tipos de colonias distintas.

El resultado de la desinfección fue una disminución del número de bacterias del orden de dos logaritmos con la máxima dosis, tal como se puede apreciar en la figura 6.5. Esta disminución es del mismo orden que la obtenida en la desinfección anterior con la misma masa de ferrato (VI), por lo que el inóculo de *S. typhimurium* resultó adecuado para representar la carga bacteriana real. También puede observarse en la figura 6.5 que la dosis de ferrato (VI) necesaria para disminuir el número de bacterias coliformes al límite máximo establecido en el ECA fue de 2 mg.

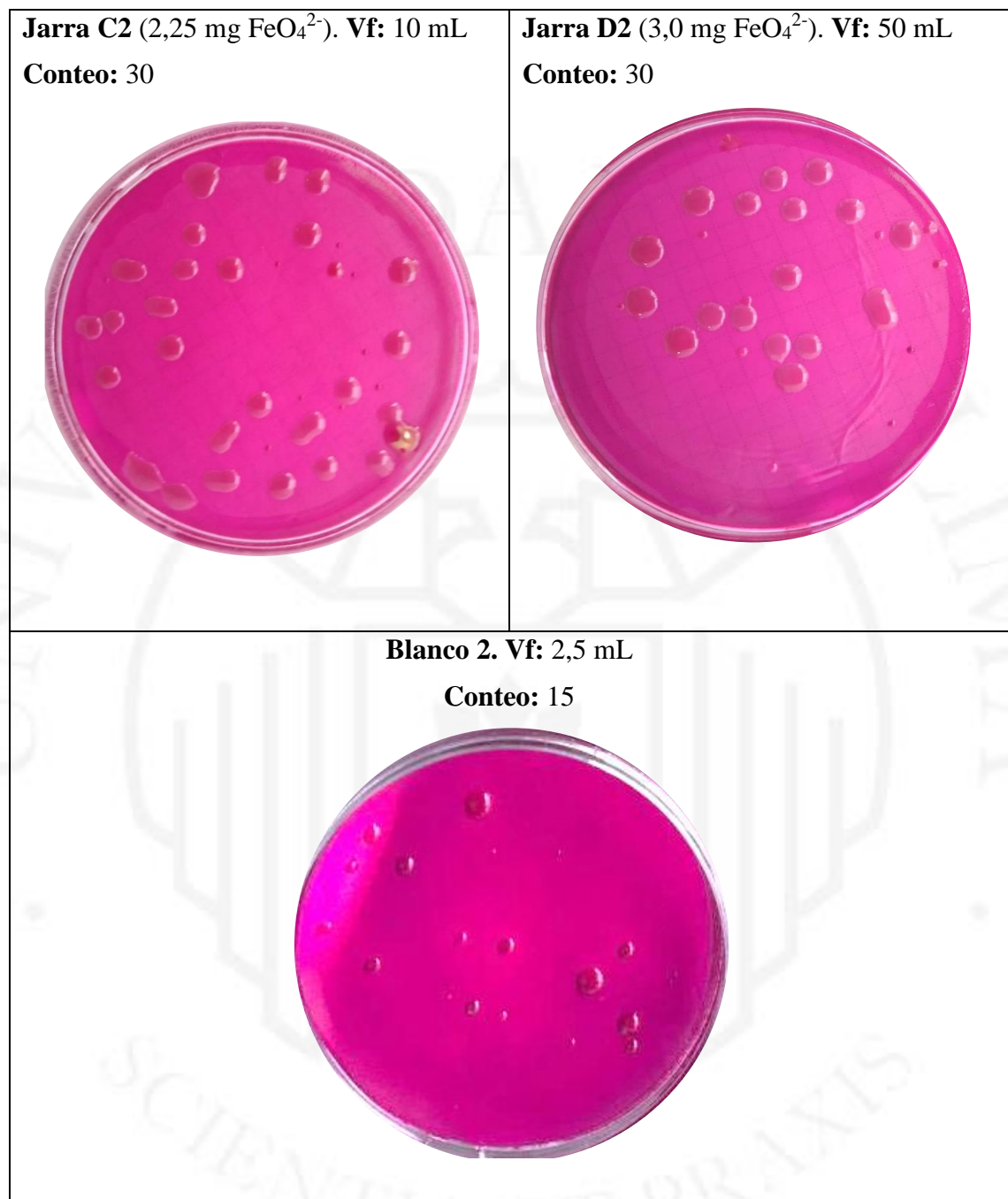
Tabla 6.5

Resultados de desinfección en agua de riego con bacterias propias

Jarra A2 (0,75 mg FeO_4^{2-}). Vf: 10 mL Conteo: 150	Jarra B2 (1,5 mg FeO_4^{2-}). Vf: 10 mL Conteo: 96
	

(continúa)

(continuación)

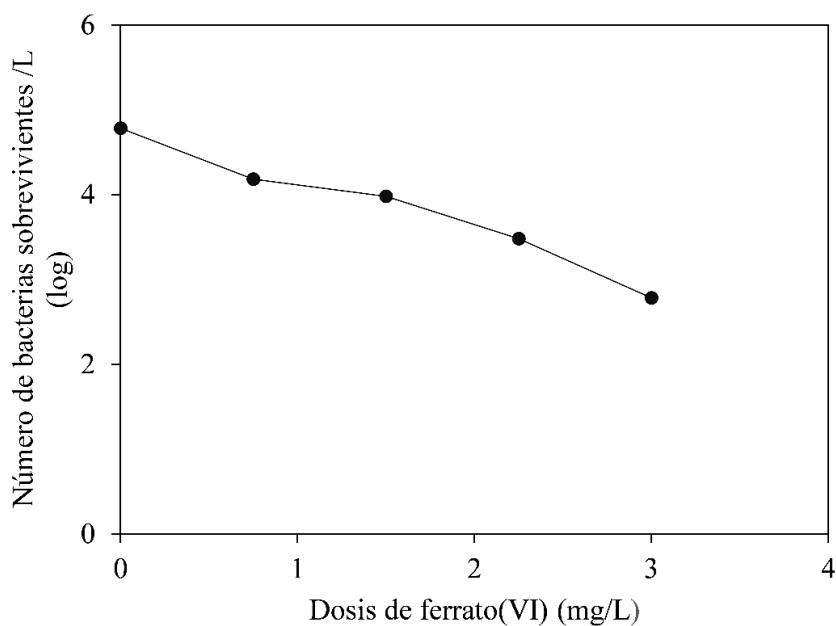


Vf: Volumen pasado por el filtro

Elaboración propia

Figura 6.5

Desinfección en agua real de riego con bacterias propias



Nota: Puntos negros corresponden a promedios de experimentos hechos por duplicado.
Elaboración propia.

Con la experiencia anterior se esperaba un aumento de todos los parámetros medidos, a excepción de la temperatura. En la tabla puede observarse que efectivamente hubo un aumento del pH, O₂ y conductividad. Sin embargo, la turbidez disminuyó posiblemente debido a se partió de un agua turbia y los flocs formados capturaron y arrastraron hacia el fondo una parte de las partículas presentes.

Tabla 6.6

Resultados de los parámetros del agua sin filtrar post-tratamiento

	Jarra A2	Jarra B2	Jarra C2	Jarra D2	Blanco 2	Agua real *	Agua real
pH	9,50	10,00	10,39	10,72	10,48	8,17	9,53
T (°C)	19,80	19,90	19,90	20,10	20,60	21,30	19,30
O ₂ (mg/L)	11,38	11,38	11,40	11,47	10,49	10,67	11,16
Conductividad (µS/cm)	616	638	676	703	705	588	531
Turbidez (NTU)	27,30	29,10	25,20	28,80	27,20	32,60	31,80

Nota. Agua real*: agua real luego de ajustar el pH.
Elaboración propia

6.6 Evaluación de la inversión y del costo de tratamiento del agua para riego con los iones ferrato

La inversión requerida para el tratamiento de agua en base a iones ferrato a escala de laboratorio asciende a S/ 321,00. Esta inversión se desglosa en las requeridas para el reactor, el módulo de generación de energía solar y el controlador de corriente (Tablas 6.7 a 6.9).

Tabla 6.7

Desglose de inversión requerida para fabricar el reactor

Concepto	Costo unit. S/	Unidades	Costo total S/	Vida útil (años)
Acrílico PMMA 1,5 mm	15,34/ m ²	0,02 m ²	0,31	2
Perno + tuerca	0,8	8	6,40	
Arandela metálica	0,14	16	2,24	
Empaquetadura	35/m ²	0,02 m ²	0,70	
Bornera	1,0	2	2,00	
Membrana CTIEM-1	2720/ m ² (*)	0,01 m ²	27,2	
Electrodo de acero inoxidable (cátodo)	97,2/ m ²	0,00403 m ²	0,39	
Servicio de maquinado	75	1	75,00	
Sub total 1:			108,60	

Nota: (*) \$600 EXW+ \$200 flete, tipo de cambio: 3,4 PEN por USD.

Elaboración propia

Tabla 6.8

Desglose de inversión para el módulo de generación de energía solar

Concepto	Costo unit. S/	Unidades	Costo total S/	Vida útil (años)
Panel solar monocristalino	80,00	1	80,00	25
Controlador de carga	35,00	1	35,00	8
Batería de plomo 12V	40,00	1	40,00	8
Sub total 2:			155,00	

Elaboración propia

Tabla 6.9

Desglose de inversión requerida para el módulo controlador de corriente

Concepto	Costo unit. S/	Unidades	Costo total S/	Vida útil (años)
Cableado	0,50/ m ²	0,5 m	0,25	4
Papel transfer A4	0,50/ m ²	0,25	0,13	
Placa de cobre para circuitos	60,00/ m ²	0,025 m ²	1,50	
MOSFET IRFP064N	8,00	1	8,00	
OPAM LM358N	2,00	1	2,00	
Potenciómetro B 5K	2,50	1	2,50	
Resistencias	0,05	2	0,10	
Convertidor de potencia LM2596S	6,50	1	6,50	
Conector banana	1,50	4	6,00	
Borneras	0,20	2	0,40	
Fabricación de la placa	30,00	1	30,00	
Sub total 3:			57,40	

Elaboración propia.

- **Costo de tratamiento por m³ de agua**

El costo del tratamiento se compone del costo de los consumibles y de la depreciación del sistema (Costos Indirectos de Fabricación). Los precios del hidróxido de sodio y acero fueron cotizados con proveedores locales. En un lote se producen 0,72 g de Fe (VI) según se evidencia a continuación, con un costo de materiales de S/ 0,27/ g Fe (VI).

$$\frac{0,25 \text{ moles de FeO}_4^{2-}}{\text{L}} \times \frac{119,843 \text{ g FeO}_4^{2-}}{1 \text{ mol de FeO}_4^{2-}} \times \frac{0,024 \text{ L}}{1 \text{ lote}} = \frac{0,72 \text{ g de FeO}_4^{2-}}{\text{lote}}$$

– Costo de soda cáustica por gramo de ferrato (VI):

$$\frac{\text{S}/7,50}{\text{L de NaOH al 50\%}} \times \frac{0,024 \text{ L}}{1 \text{ batch}} \times \frac{1 \text{ lote}}{0,72 \text{ g FeO}_4^{2-}} = \frac{\text{S}/0,25}{\text{g FeO}_4^{2-}}$$

– Costo de hierro disuelto por gramo de ferrato (VI):

$$\frac{\text{S}/300}{\text{plancha}} \times \frac{\text{plancha}}{0,004 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ m}^3}{7 \ 850 \text{ kg hierro}} \times \frac{1 \text{ kg hierro}}{450 \text{ g FeO}_4^{2-}} = \frac{\text{S}/0,021}{\text{g FeO}_4^{2-}}$$

- Costo de materia prima por gramo de ferrato (VI):

Costo del electrolito + costo del hierro disuelto: S/ 0,271.

Para el cálculo de la depreciación del sistema, se consideró que su vida útil se divide en cuatro: La del reactor (tres años), la del panel solar (25 años), la del control de carga y batería (ocho años) y la del módulo controlador de corriente (cuatro años). Teniendo en cuenta que el sistema se deprecia linealmente, el costo anual asciende a S/ 63,13.

Tabla 6.10

Costos de depreciación anual

Años	1	2	3	4	5
Reactor	36,2	36,2	36,2	36,2	36,2
Panel Solar	3,20	3,20	3,20	3,20	3,20
Control de carga y batería	9,38	9,38	9,38	9,38	9,38
Módulo controlador de corriente	14,35	14,35	14,35	14,35	14,35
Total S/	63,13	63,13	63,13	63,13	63,13

Elaboración propia.

Considerando que se producirá un lote diario de 0,72 g de ferrato (VI) durante los 365 días del año, el costo de depreciación por gramo asciende a S/ 0,24. Por lo tanto, el costo total para la producción de un gramo de ferrato (VI) es S/ 0,51. De este desglose, solo el electrolito tiene una contribución del 49% del costo total.

Adicionalmente, el costo de tratamiento de un m³ de agua, usando la dosis de ferrato (VI) necesaria para desinfectar el agua del estanque del INIA con bacterias propias, asciende a S/ 1,02.

$$\frac{2,0 \text{ mg FeO}_4^{2-}}{1 \text{ L agua}} \times \frac{1 \text{ 000 L agua}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ 000 mg}} \times \frac{\text{S/ } 0,51}{\text{g FeO}_4^{2-}} = \frac{\text{S/ } 1,02}{1 \text{ m}^3}$$

CONCLUSIONES

- El reactor electroquímico con alimentación de energía solar diseñado y fabricado a escala de laboratorio fue apto para producir iones ferrato (VI) través de la disolución anódica de un electrodo de hierro.
- El uso de ferrato (VI) fue efectivo para desinfectar tanto el agua contaminada con la bacteria modelo *S. typhimurium* como con las bacterias propias del estanque del INIA, pues en el primer caso se redujo la carga bacteriana en más de cuatro órdenes de magnitud utilizando una dosis de 5,5 mg FeO_4^{2-} , mientras que en el segundo caso hubo una disminución de dos órdenes de magnitud aplicando 3,0 mg FeO_4^{2-} .
- La bacteria *S. typhimurium* fue representativa de la carga bacteriana propia del estanque de INIA para los fines de este estudio, porque, en ambos casos, aplicando una misma dosis de FeO_4^{2-} (3,0 mg) hubo una reducción de dos órdenes de magnitud del número de UFC.
- Considerando el límite máximo recomendado por el ECA (10^4 bacterias por litro), se requiere una dosis de 2,0 mg de FeO_4^{2-} para desinfectar el agua del estanque de INIA, con una concentración inicial de 6×10^4 bacterias por litro.
- Para satisfacer la demanda energética del reactor de producción de ferrato (VI) a escala de laboratorio con energía solar, considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Lima, se requieren de un módulo fotovoltaico de 12 V y 10 W, así como una batería de plomo de 12V y 4,5Ah.
- A escala de laboratorio, el costo de producción por gramo de FeO_4^{2-} asciende a S/ 0,51, mientras que el costo de desinfección por m^3 del agua del estanque de INIA es de S/ 1,02.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el uso de ferrato (VI) líquido implica dosificar una solución altamente alcalina y a que el ferrato (VI) tiene un mayor desempeño en pH ácido, se recomienda acidificar el agua previamente con cloruro férrico.
- Los flocs resultantes de la aplicación de ferrato (VI) al agua para riego deben ser retenidos en una malla (geotubo), de tal modo que el agua de riego cumpla con el estándar que atañe al hierro total y que esta sea de mayor calidad.
- Una forma de reducir el costo de producción de ferrato es fabricarlo a mayor escala. De este modo es posible conseguir proveedores de hidróxido de sodio que ofrezcan un menor precio, considerando que este insumo representa el 49% del costo total.
- El circuito controlador de corriente debe protegerse de la corrosión y a la vez debe mantenerse ventilado para evitar el sobrecalentamiento de los componentes. En cuanto al panel solar, este debe limpiarse periódicamente debido a que el polvo impide el funcionamiento de las celdas fotovoltaicas. Por último, se debe verificar que la carga de la batería no descienda del mínimo especificado.

REFERENCIAS

- Alsheyab, M., Jiang, J.-Q. y Stanford, C. (2010a). Electrochemical generation of ferrate (VI): Determination of optimum conditions. *Desalination*, 254(1–3), 175–178. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.035>
- Alsheyab, M., Jiang, J. Q. y Stanford, C. (2010b). Engineering aspects of electrochemical generation of ferrate: A step towards its full scale application for water and wastewater treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 210(1–4), 203–210. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0242-2>
- ANA. (2015). *Huella hídrica del Perú. Sector agropecuario*.
- ANA. (2016). Manual de buenas prácticas para el uso seguro y productivo de las aguas residuales domésticas. *Ministerio de agricultura y riego*, 230. Recuperado de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/manual_de_buenas_practicas_para_el_uso_seguro_y_productivo_de_las_aguas_residuales_domesticas.pdf
- Artisan Technology Group. (2019). Perkin-Elmer Lambda 40 UV/VIS Spectrometer. Recuperado de https://www.artisanhg.com/Scientific/53316/Perkin_Elmer_Lambda_40_UV_VIS_Spectrometer
- Australian Scientific. (2019). Platypus Jar Tester. Recuperado de <https://www.austscientific.com.au/product/platypus-jar-tester-flocculator/>
- Barişçi, S., Ulu, F., Särkkä, H., Dimoglo, A. y Sillanpää, M. (2014). Electrosynthesis of ferrate (VI) ion using high purity iron electrodes: Optimization of influencing parameters on the process and investigating its stability. *International Journal of Electrochemical Science*, 9(6), 3099–3117. Recuperado de <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84897835719&partnerID=tZOtx3y1>
- Becton Dickinson. (2013). *Data sheet of m Endo Broth MF*. Recuperado de http://www.bd.com/europe/regulatory/Assets/IFU/Difco_BBL/274930.pdf
- Bedner, M., MacCrehan, W. A. y Helz, G. R. (2004). Making chlorine greener: investigation of alternatives to sulfite for dechlorination. *Water research*, 38(10), 2505–2514. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.03.010>
- Bielski, B. H. J. y Thomast, M. J. (1987). *Studies of Hypervalent Iron in Aqueous*

- Solutions. I. Radiation-Induced Reduction of Iron(VI) to Iron(V) by.* 41(26), 7761–7764.
- Bikribd. (2019). Ezodo PL-700ALS Laboratory PH Meter Multifunctional Water Quality Tester. Recuperado de <https://bikribd.com/en/ad/ezodo-pl-700als-laboratory-ph-meter-multifunctional-water-quality-tester-for-sale-dhaka-5095>
- Bouzek, K. y Roušar, I. (1993). The study of electrochemical preparation of ferrate(VI) using alternating current superimposed on the direct current. Frequency dependence of current yields. *Electrochimica Acta*, 38(13), 1717–1720. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(93\)85067-9](https://doi.org/10.1016/0013-4686(93)85067-9)
- Bouzek, K. y Roušar, I. (1997). Influence of anode material on current yield during ferrate(vi) production by anodic iron dissolution: Part III: Current efficiency during anodic dissolution of pure iron to ferrate(vi) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, 27(6), 679–684. <https://doi.org/10.1023/A:1018483603666>
- Bouzek, K., Roušar, I. y Taylor, M. A. (1996). Influence of anode material on current yield during ferrate(vi) production by anodic iron dissolution Part II: Current efficiency during anodic dissolution of white cast iron to ferrate(vi) in concentrated alkali hydroxide solutions. *Journal of Applied Electrochemistry*, 26(9), 925–931. <https://doi.org/10.1007/BF00242044>
- Cañizares, P., Arcís, M., Sáez, C. y Rodrigo, M. A. (2007). Electrochemical synthesis of ferrate using boron doped diamond anodes. *Electrochemistry Communications*, 9(9), 2286–2290. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2007.06.034>
- Cappuccino, J. y Welsh, C. (2018). Microbiology: A Laboratory Manual. En *Microbiology* (11a ed.). Pearson Education Limited.
- Čekerevac, M., Nikolić Bujanović, L., Jokić, A. y Simičić, M. (2013). Ferrate(VI) synthesis at a boron-doped diamond anode. *J. Serb. Chem. Soc.*, 78(2), 265–279. <https://doi.org/10.2298/JSC120309108C>
- Centers for Disease Control and Prevention. (2011). Morbidity and Mortality Weekly Report. Recuperado de https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm6022a5.htm?s_cid=mm6022a5_w
- Cho, M., Lee, Y., Choi, W., Chung, H. y Yoon, J. (2006). Study on Fe(VI) species as a disinfectant: Quantitative evaluation and modeling for inactivating Escherichia coli. *Water Research*, 40(19), 3580–3586.

- <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2006.05.043>
- Cici, M. y Cuci, Y. (1998). Production of some coagulant materials from galvanizing workshop waste. *Waste Management*, 17(7), 407–410. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(97\)10001-0](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(97)10001-0)
- Clescerl, L. S., Greenberg, A. E. y Eaton, A. D. (1999). STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (11th ed.). *American Journal of Public Health and the Nations Health*, 20(6), 940. <https://doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a>
- Cui, J., Zheng, L. y Deng, Y. (2018). Emergency water treatment with ferrate(vi) in response to natural disasters. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 4(3), 359–368. <https://doi.org/10.1039/C7EW00467B>
- Daigger Scientific. (2019). Heraeus Labofuge 200 Centrifuge. Recuperado de <https://www.daigger.com/heraeus-labofuge-200-centrifuge-i-iec75003631>
- De Koninck, M., Brousse, T. y Bélanger, D. (2003). The electrochemical generation of ferrate at pressed iron powder electrodes: effect of various operating parameters. *Electrochimica Acta*, 48(10), 1425–1433. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00020-3)
- DeLuca, S. J., Chao, A. C. y Smallwood, C. (1983). Ames Test of Ferrate Treated Water. *Journal of Environmental Engineering*, 109(5), 1159–1167. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1983\)109:5\(1159\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:5(1159))
- Denvir, A. y Pletcher, D. (1996a). Electrochemical generation of ferrate Part 2: Influence of anode composition. *Journal of Applied Electrochemistry*, 26(8), 823–827. <https://doi.org/10.1007/BF00683744>
- Denvir, A. y Pletcher, D. (1996b). Electrochemical generation of ferrate Part I: Dissolution of an iron wool bed anode. *Journal of Applied Electrochemistry*, 26(8), 815–822. <https://doi.org/10.1007/BF00683743>
- Dewey-Mattia, D., Manikonda, K., Hall, A. J., Wise, M. E. y Crowe, S. J. (2018). Surveillance for Foodborne Disease Outbreaks - United States, 2009-2015. *Morbidity and mortality weekly report. Surveillance summaries (Washington, D.C. : 2002)*, 67(10), 1–11. <https://doi.org/10.15585/mmwr.ss6710a1>
- Ding, Z., Yang, C. y Wu, Q. (2004). The electrochemical generation of ferrate at porous magnetite electrode. *Electrochimica Acta*, 49(19), 3155–3159. Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468604002099>
- Direct Industry. (2019). Cabina de flujo laminar vertical. Recuperado de

- <https://www.directindustry.es/prod/telstar-technologies-sl/product-57359-972201.html>
- Doyle, M. P. (1990). Pathogenic *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolitica*, and *Vibrio parahaemolyticus*. *The Lancet*, 336(8723), 1111–1115. [https://doi.org/10.1016/0140-6736\(90\)92582-3](https://doi.org/10.1016/0140-6736(90)92582-3)
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., Franson, M. A. H., American Public Health Association., American Water Works Association. y Water Environment Federation. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Recuperado de https://books.google.com.pe/books/about/Standard_Methods_for_the_Examination_of.html?id=pv5PAQAIAAJ&redir_esc=y
- Fagan, J. y Waite, T. D. (1983). Biofouling Control with Ferrate(VI). *Environmental Science and Technology*, 17(2), 123–125. <https://doi.org/10.1021/es00108a012>
- Final Test S.A. (2019). B&K Precision 1667 Fuente de poder de DC conmutada. Recuperado de <https://www.finaltest.com.mx/B-K-Precision-1667-p/1667.htm>
- Garai, P., Gnanadhas, D. P. y Chakravorty, D. (2012). Salmonella enterica serovars Typhimurium and Typhi as model organisms: revealing paradigm of host-pathogen interactions. *Virulence*, 3(4), 377–388. <https://doi.org/10.4161/viru.21087>
- Goff, H., Kidwell, S., Lauher, J. y Murmann, R. K. (1973). Kinetic and thermodynamic studies on a labile trans-dinitrocobalt(III) complex. *Inorganic Chemistry*, 12(11), 2631–2640. <https://doi.org/10.1021/ic50129a028>
- Golovko, D. A., Sharma, V. K., Suprunovich, V. I., Pavlova, O. V., Golovko, I. D., Bouzek, K. y Zboril, R. (2011). A simple potentiometric titration method to determine concentration of ferrate(VI) in strong alkaline solutions. *Analytical Letters*, 44(7), 1333–1340. <https://doi.org/10.1080/00032719.2010.511748>
- Grainger. (2019a). Motor HP Bench Drill Press. Recuperado de <https://www.grainger.com/product/DAYTON-1-Motor-HP-Bench-Drill-Press-53UG97>
- Grainger. (2019b). Multímetro Digital. Recuperado de <https://www.grainger.com.mx/Todas-las-Categorías-de-productos/Instrumentos-de-Prueba/Pruebas-de-Energía-Eléctrica/Multímetros-Digitales/Multimet-Dig.Completo,1000V,CAT-IV-600V/p/1TFV1>
- Hach. (2019). HQ14D Medidor de conductividad digital. Recuperado de <https://es.hach.com/hq14d-medidor-de-conductividad->

digital/product?id=26096933365

- Hassoun, J., Croce, F., Hong, I. y Scrosati, B. (2011). Lithium-iron battery: Fe₂O₃ anode versus LiFePO₄ cathode. *Electrochemistry Communications*, 13(3), 228–231. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2010.12.020>
- He, W., Wang, J., Yang, C. y Zhang, J. (2006). The rapid electrochemical preparation of dissolved ferrate(VI): Effects of various operating parameters. *Electrochimica Acta*, 51(10), 1967–1973. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.03.077>
- Hernández Moreno, D., Blázquez, M., Andreu Sánchez, O., Bermejo Nogales, A. y Fernández Cruz, M. L. (2019). Acute hazard of biocides for the aquatic environmental compartment from a life-cycle perspective. *Science of the Total Environment*, 658, 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.186>
- Hoppe, M. L., Schlemper, E. O. y Murmann, R. K. (1982). Structure of dipotassium ferrate(VI). *Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 38(8), 2237–2239. <https://doi.org/10.1107/s0567740882008395>
- Iberdidac. (2012). ORPI: Centro de Mecanizado CNC de EMCO a precio especial por renovación de stock. Recuperado de <http://www.iberdidac.org/news/orpi/orpi30102012.html>
- INEI. (2012). *Inequidades de género en la actividad agropecuaria*. 29–30. Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1185/
- Innovar Tecnologia Biomedica SAS. (2019). Descontinuado Autoclave All American 25X. Recuperado de <https://www.innovar.com.co/blog/blog-1/post/descontinuado-autoclave-all-american-25x-1>
- Insta Graphic Systems. (2019). Insta 201 Heat Press Machine. Recuperado de <https://www.instagram.com/insta201>
- Islam, M., Morgan, J., Doyle, M. P., Phatak, S. C., Millner, P. y Jiang, X. (2004). Persistence of *Salmonella enterica* Serovar Typhimurium on Lettuce and Parsley and in Soils on Which They Were Grown in Fields Treated with Contaminated Manure Composts or Irrigation Water. *Foodborne Pathogens and Disease*, 1(1), 27–35. <https://doi.org/10.1089/153531404772914437>
- Jiang, J.-Q., Durai, H. B. P., Petri, M., Grummt, T. y Winzenbacher, R. (2016). Drinking water treatment by ferrate(VI) and toxicity assessment of the treated water. *Desalination and Water Treatment*, 57(54), 26369–26375.

- <https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1203825>
- Jiang, J.-Q. y Lloyd, B. (2002). Progress in the development and use of ferrate(VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment. *Water Research*, 36(6), 1397–1408. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00358-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00358-X)
- Jiang, J.-Q., Stanford, C. y Alsheyab, M. (2009). The online generation and application of ferrate(VI) for sewage treatment—A pilot scale trial. *Separation and Purification Technology*, 68(2), 227–231. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.05.007>
- Jiang, J.-Q., Wang, S. y Panagouloupoulos, A. (2007). The role of potassium ferrate(VI) in the inactivation of *Escherichia coli* and in the reduction of COD for water remediation. *Desalination*, 210(1–3), 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.051>
- Kazama, F. (1995). Viral inactivation by potassium ferrate. *Water Science and Technology*, 31(5–6), 165–168. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00259-P](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00259-P)
- Kiselev, Y. . M., Kopelev, N. S., Zavyalova, N. A., Perfiliev, Y. D. y Kazin, P. E. (1989). The preparation of alkali metal ferrate (VI). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 1250–1253.
- Lapicque, F. y Valentin, G. (2002). Direct electrochemical preparation of solid potassium ferrate. *Electrochemistry Communications*, 4(10), 764–766. [https://doi.org/10.1016/S1388-2481\(02\)00438-1](https://doi.org/10.1016/S1388-2481(02)00438-1)
- Lescuras-Darrou, V., Lapicque, F. y Valentin, G. (2002). Electrochemical ferrate generation for waste water treatment using cast irons with high silicon contents. *Journal of Applied Electrochemistry*, 32(1), 57–63. Recuperado de <http://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1014269523898>
- Li, C., Li, X. Z. y Graham, N. (2005). A study of the preparation and reactivity of potassium ferrate. *Chemosphere*, 61(4), 537–543. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.027>
- Licht, S., Naschitz, V., Halperin, L., Halperin, N., Lin, L., Chen, J., ... Liu, B. (2001). *Analysis of ferrate (VI) compounds and super-iron Fe (VI) battery cathodes : FTIR , ICP , titrimetric , XRD , UV / VIS , and electrochemical characterization.* 101, 167–176.
- Licht, S. y Yu, X. (2005). Electrochemical Alkaline Fe(VI) Water Purification and Remediation. *Environmental Science & Technology*, 39(20), 8071–8076. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1021/es051084k>
- Licht, S. y Yu, X. (2008). Recent advances in Fe(VI) charge storage and super-iron

- batteries. *ACS Symposium Series*, 985(Vi), 197–256. <https://doi.org/10.1021/bk-2008-0985.ch014>
- Lovibond. (2019). TB 210 IR. Recuperado de <https://www.lovibond.com/es/PW/Análisis-de-agua/Productos/Instrumentos-de-laboratorio-y-portátiles/Medidores-de-turbidez/TB-210-IR>
- Luo, Z., Strouse, M., Jiang, J. Q. y Sharma, V. K. (2011). Methodologies for the analytical determination of ferrate(VI): A Review. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 46(5), 453–460. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.551723>
- Máková, Z., Bouzek, K., Híveš, J., Sharma, V. K., Terry, R. J. y Baum, J. C. (2009). Research progress in the electrochemical synthesis of ferrate(VI). *Electrochimica Acta*, 54(10), 2673–2683. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.11.034>
- Máková, Z., Bouzek, K. y Sharma, V. K. (2008). The role of the electrode and electrolyte composition in the anode dissolution kinetics: Comparison of the Ferrate(VI) synthesis in the solutions of NaOH and KOH of various ratio. En *ACS Symposium Series* (Vol. 985, pp. 52–67). <https://doi.org/10.1021/bk-2008-0985.ch002>
- Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M. y Stahl, D. A. (2018). *Brock Biology of Microorganisms* (15a ed.). Pearson Education Limited.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M. y Parker, J. (2003). *Brock biology of microorganisms*. Recuperado de <https://www.studyblue.com/notes/b/brock-biology-of-microorganisms-10th-edition/954/0>
- Maghraoui, A. El, Zerouale, A. y Ijjaali, M. (2015). Process for the Synthesis of Ferrate (VI) Alkali Metal Dry. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 05(01), 10–15. <https://doi.org/10.4236/ampc.2015.51002>
- Marlow, D. (2009). Riego y oxígeno. Recuperado de <https://www.hortalizas.com/miscelaneos/riego-y-oxigeno/>
- Ministerio de Agricultura y Riego. (2018). Portal del Ministerio de Agricultura y Riego. Recuperado de <http://minagri.gob.pe/portal/>
- Montajes Electromecánicos e Ingeniería SA. (2016). Bombas rotativas de dos etapas selladas con aceite Trivac. Recuperado de <https://www.meisa.com/leybold/bombas-de-vacio-de-paletas-aceite/bombas-paletas-trivac.html>
- Muñoz, S., Vilca, M., Ramos, D. y Lucas, J. (2013). Frecuencia de enterobacterias en verduras frescas de consumo crudo expandidas en cuatro mercados de Lima, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 24(3), 300–306.

- Murmann, R. K. y Robinson, P. R. (1974). Experiments utilizing FeO_4^{2-} for purifying water. *Water Research*, 8(8), 543–547. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(74\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0043-1354(74)90062-1)
- Nikolić-Bujanović, L., Čekerevac, M., Vojinović-Miloradov, M., Jokić, A. y Simičić, M. (2012). A comparative study of iron-containing anodes and their influence on electrochemical synthesis of ferrate(VI). *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(6), 1931–1936. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.05.007>
- Ninane, L., Kanari, N., Criado, C., Jeannot, C., Evrard, O. y Neveux, N. (2008). New processes for alkali ferrate synthesis. *ACS Symposium Series*, 985(Vi), 102–111. <https://doi.org/10.1021/bk-2008-0985.ch006>
- Noorhasan, N. N., Sharma, V. K. y Baum, J. C. (2008). *A Fluorescence Technique to Determine Low Concentrations of Ferrate (VI) for Laboratory Investigations*. (Vi), 145–155.
- Nowik, I., Herber, R. H., Koltypin, M., Aurbach, D. y Licht, S. (2005). Mössbauer spectroscopic studies of the disintegration of hexavalent iron compounds (BaFeO_4 and K_2FeO_4). *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 66(7), 1307–1313. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2005.03.008>
- OMS. (2018). Salmonella (no tifoidea). Recuperado de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-\(non-typhoidal\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/salmonella-(non-typhoidal))
- Pettit, T. (2016). *Methods of water treatment for the elimination of plant pathogens [Fact Sheet]*. Recuperado de <http://horticulture.ahdb.org.uk/oomyces>
- Profilab24. (2019). Ingenieurbüro CAT M. Zipperer M 6 Standard Hotplate Stirrer. Recuperado de <https://profilab24.com/en/laboratory/magnetic-stirrers-overhead-stirrers/ingenieurbuero-cat-m-zipperer-m-6-standard-hotplate-stirrer>
- Quino-Favero, J., Eyzaguirre, R., Mogrovejo, P., Prieto, P. y Flores del Pino, L. (2018). Electrochemical synthesis of ferrate(VI): optimization of parameters and evaluation of their impact in production cost. *Desalination and Water Treatment*, 113, 179–186. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22262>
- Rivera, M., Rodríguez, C. y López, J. (2009). Contaminación fecal en hortalizas que se expenden en mercados de la ciudad de Cajamarca, Peru. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, 26(1), 45–48.
- Sáez, C., Rodrigo, M. A. y Cañizares, P. (2008). Electrosynthesis of ferrates with diamond anodes. *AIChE Journal*, 54(6), 1600–1607. <https://doi.org/10.1002/aic.11492>

- Salazar, B. (2013). El riego en el Perú: falta mucho por hacer. *La revista agraria*, 150, 10–11.
- Sánchez-Carretero, A., Rodrigo, M. A., Cañizares, P. y Sáez, C. (2010). Electrochemical synthesis of ferrate in presence of ultrasound using boron doped diamond anodes. *Electrochemistry Communications*, 12(5), 644–646. <https://doi.org/10.1016/J.ELECOM.2010.02.020>
- Sánchez-Carretero, A., Sáez, C., Cañizares, P., Cotillas, S. y Rodrigo, M. A. (2011). Improvements in the electrochemical production of ferrates with conductive diamond anodes using goethite as raw material and ultrasound. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. <https://doi.org/10.1021/ie101438e>
- Schreyer, J. M., Thompson, G. . y Ockerman, L. T. (1950a). Oxidation of Chromium (III) with Potassium Ferrate (VI). *Analytical Chemistry*, 22(11), 1426–1427.
- Schreyer, J. M., Thompson, G. W. y Ockerman, L. T. (1950b). Ferrate Oxidimetry: Oxidation of Arsenite with Potassium Ferrate(VI). *Analytical Chemistry*, 22(5), 691–692. <https://doi.org/10.1021/ac60041a022>
- SENAMHI. (2003). *Atlas solar energía solar del Perú*. Lima.
- Sharma, V. K. (2011). Oxidation of inorganic contaminants by ferrates (VI, V, and IV)–kinetics and mechanisms: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1051–1073. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.026>
- Sharma, V. K. y Division of Environmental Chemistry of the American Chemical Society. (2008). *Ferrates: synthesis, properties, and applications in water and wastewater treatment*. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2005.11.013>
- Sharma, V. K., Graham, N. J. D., Li, X. Z. y Yuan, B. L. (2010). Ferrate(VI) enhanced photocatalytic oxidation of pollutants in aqueous TiO₂ suspensions. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2), 453–461. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0170-0>
- Sharma, V. K., Zboril, R. y Varma, R. S. (2015). Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies. *Accounts of chemical research*, 48(2), 182–191. <https://doi.org/10.1021/ar5004219>
- Smith, B. C. (2011). *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy*.
- Society for General Microbiology. (2009). Basic Practical Microbiology A Manual Society for General Microbiology (SGM). *Basic Pract Cover*. Recuperado de <http://microbiologyonline.org/file/7926d7789d8a2f7b2075109f68c3175e.pdf>
- Solomon, E. B., Yaron, S. y Matthews, K. R. (2002). Transmission of Escherichia coli

- O157:H7 from contaminated manure and irrigation water to lettuce plant tissue and its subsequent internalization. *Applied and environmental microbiology*, 68(1), 397–400. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.1.397-400.2002>
- Soodb, Sahotap y Hunjanm. (2018). Contaminated Irrigation Water: A Source of Human Pathogens on Growing Vegetables. *Int J cell Sci & mol biol.*, 3555624(35), 5–7. <https://doi.org/10.19080/IJCSMB.2018.03.555624>
- Soto, M. (2011). *Boletín Epidemiológico*. Recuperado de http://sisbib.unmsm.edu.pe/BVRevistas/bol_
- Stanford, C., Jiang, J.-Q. y Alsheyab, M. (2009). Electrochemical Production of Ferrate (Iron VI): Application to the Wastewater Treatment on a Laboratory Scale and Comparison with Iron (III) Coagulant. *Water, Air, & Soil Pollution*, 209(1–4), 483–488. Recuperado de <http://link.springer.com/10.1007/s11270-009-0216-4>
- Sun, X., Zhang, Q., Liang, H., Ying, L., Xiangxu, M. y Sharma, V. K. (2016). Ferrate(VI) as a greener oxidant: Electrochemical generation and treatment of phenol. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.020>
- Talaiekhosani, A., Bagheri, M., Talaei, M. R. y Jaafarzadeh, N. (2016). An Overview on Production and Applications of Ferrate(VI). *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 8(3). <https://doi.org/10.17795/jjhs-34904>
- Thermo Fisher Scientific. (2019a). Heratherm Compact Microbiological Incubators. Recuperado de <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/50125590#/50125590>
- Thermo Fisher Scientific. (2019b). Precision Low Temperature BOD Refrigerated Incubator. Recuperado de <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/PR205745R#/PR205745R>
- Tiwari, D. y Lee, S.-M. (2011). Ferrate(VI) in the Treatment of Wastewaters: A New Generation Green Chemical. En F. S. García Einschlag (Ed.), *Waste Water - Treatment and Reutilization* (pp. 241–276). Recuperado de <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/14558.pdf>
- Tsapin, A. I., Goldfeld, M. G., McDonald, G. D., Nealson, K. H., Moskovitz, B., Solheid, P., ... Orlandini, K. A. (2000). Iron(VI): Hypothetical Candidate for the Martian Oxidant. *Icarus*, 147(1), 68–78. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6437>
- Velp Scientifica. (2019). Wizard IR Vortex. Recuperado de https://www.velp.com/es/productos/lines/3/family/44/agitadores_vortex/65/wizard

_ir_vortex

- Venkatadri, A. S., Wagner, W. F. y Bauer, H. H. (1971). Ferrate(VI) Analysis by Cyclic Voltammetry. *Analytical Chemistry*, 43(8), 1115–1119. <https://doi.org/10.1021/ac60303a036>
- Wang, H., Liu, Y., Zeng, F. y Song, S. (2015). Electrochemical Synthesis of Ferrate (VI) by Regular Anodic Replacement. En *Int. J. Electrochem. Sci* (Vol. 10). Recuperado de www.electrochemsci.org
- World Health Organization y Food and Agriculture of the United Nations. (2008). *Microbiological hazards in fresh leafy vegetables and herbs*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i0452e.pdf>
- Zhou, J., Wang, H., Wei, F., Gong, M., Dai, H., Chang, W., ... Wang, J. (2012). An ultrafast nickel–iron battery from strongly coupled inorganic nanoparticle/nanocarbon hybrid materials. *Nature Communications*, 3(1), 917–918. <https://doi.org/10.1038/ncomms1921>

BIBLIOGRAFÍA

- Boxwell, M. (2017). *Solar Electricity Handbook*. Birmingham: Greenstream Publishing Limited.
- Letterman, R. D. (1999). *Water Quality and Treatment*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Mohanty, P., Muneer, T., & Kolhe, M. (2016). *Solar Photovoltaic System Applications: A Guidebook for Off-Grid Electrification*. Delhi: Springer International Publishing.
- Nilsson, J. W., & Riedel, S. (2014). *Electric Circuits*. New Jersey: Pearson.
- Safe Drinking Water Foundation. (2017). *What is Chlorination? [Fact Sheet]*. Recuperado de <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/what-is-chlorination>
- Sharma, V. K. (2008). *Ferrates : synthesis, properties, and applications in water and wastewater treatment*. Washington, D.C.: American Chemical Society.
- Solomon, C., Casey, P., Mackne, C., & Lake, A. (1998). *Ultraviolet Disinfection [Fact Sheet]*. Recuperado de http://www.nesc.wvu.edu/pdf/WW/publications/eti/UV_Dis_tech.pdf



ANEXOS

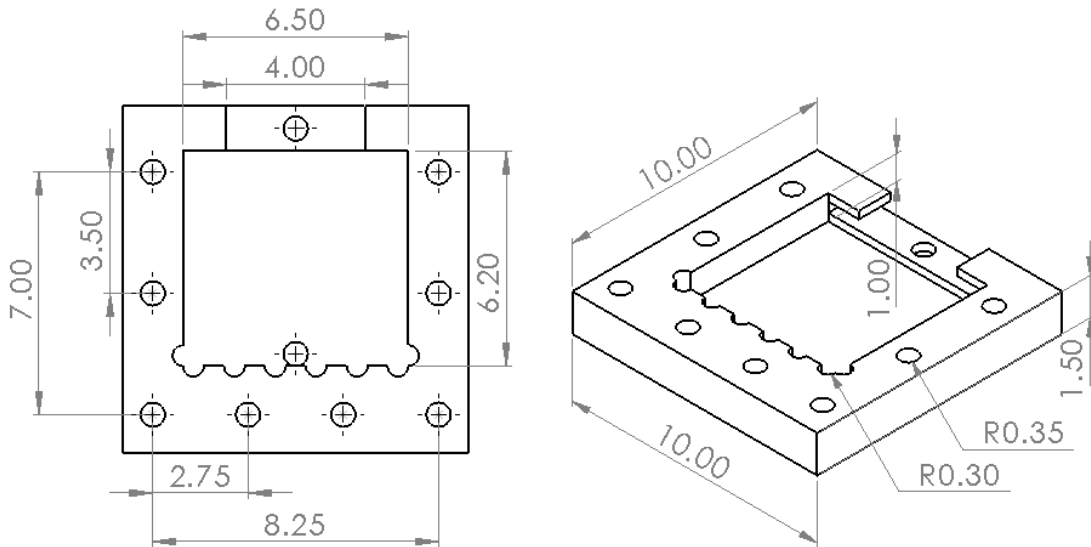
Anexo 1: ECA Categoría 3. Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales	Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales	Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales			Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales			Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS- QUÍMICOS					INORGÁNICOS					Organoclorados				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10	Aluminio	mg/L	5		5	Aldrin	µg/L	0,004		0,7
Bicarbonatos	mg/L	518		**	Arsénico	mg/L	0,1		0,2	Clordano	µg/L	0,006		7
Cianuro Wad	mg/L	0,1		0,1	Bario	mg/L	0,7		**	Dicloro Difetil Tricloroetano (DDT)	µg/L	0,001		30
Cloruros	mg/L	500		**	Berilio	mg/L	0,1		0,1	Dieldrin	µg/L	0,5		0,5
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)	Boro	mg/L	1		5	Endosulfán	µg/L	0,01		0,01
					Cadmio	mg/L	0,01		0,05	Endrin	µg/L	0,004		0,2
					Cobre	mg/L	0,2		0,5	Heptacloro y Heptacloro Epóxido	µg/L	0,01		0,03
					Cobalto	mg/L	0,05		1	Lindano	µg/L	4		4
Conductividad	(µS/cm)	2 500		5 000	Cromo Total	mg/L	0,1		1	Carbamato				
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	15		15	Hierro	mg/L	5		**	Aldicarb	µg/L	1		11
					Litio	mg/L	2,5		2,5	MICROBIOLÓGICOS Y PARASITOLÓGICO				
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40	Magnesio	mg/L	**		250	Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1 000	2 000	1 000
Detergentes (SAAM)	mg/L	0,2		0,5	Manganeso	mg/L	0,2		0,2	Escherichia coli	NMP/100 ml	1 000	**	**
Fenoles	mg/L	0,002		0,01	Mercurio	mg/L	0,001		0,01	Huevos de Helmintos	Huevo/L	1	1	**
Fluoruros	mg/L	1		**	Níquel	mg/L	0,2		1					
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N) + Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	100		100	Plomo	mg/L	0,05		0,05					
					Selenio	mg/L	0,02		0,05					
Nitritos (NO ₂ ⁻ -N)	mg/L	10		10	Zinc	mg/L	2		24					
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 5	ORGÁNICO									
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5		6,5 – 8,4	Bifenilos Policlorados									
					Bifenilos Policlorados (PCB)	µg/L	0,04		0,045					
Sulfatos	mg/L	1 000		1 000	PLAGUICIDAS									
Temperatura	°C	Δ 3		Δ 3	Paratión	µg/L	35		35					

Fuente: MINAM Ministerio del Ambiente

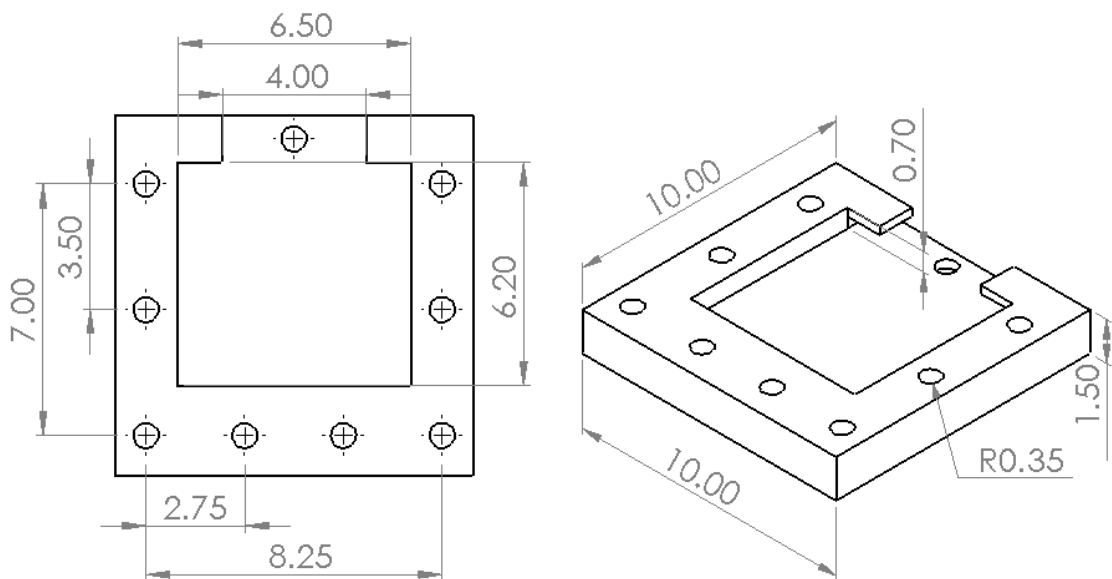
Anexo 2: Planos de los componentes del reactor

- Vistas frontal e isométrica de la cámara anódica



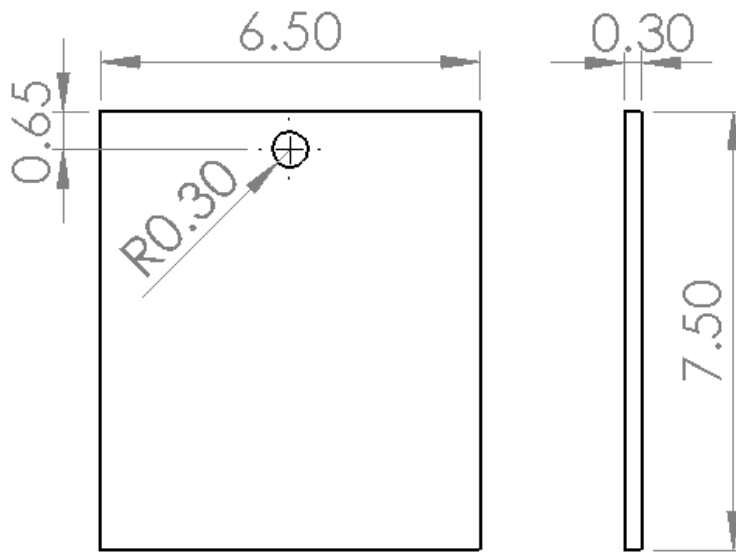
Fuente y elaboración propias.

- Vistas frontal e isométrica de la cámara catódica



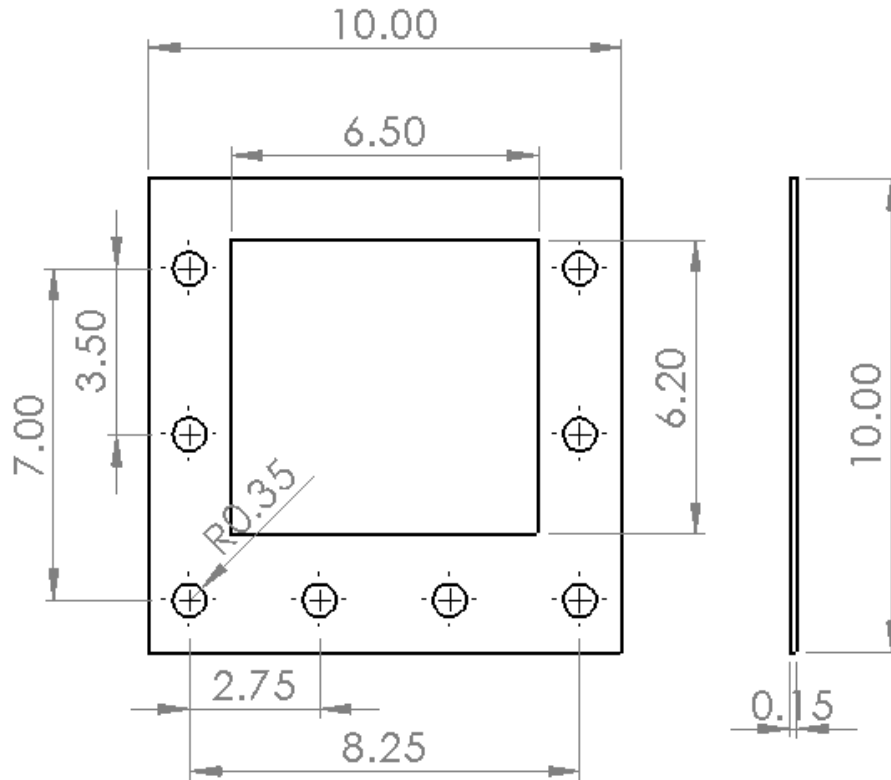
Fuente y elaboración propias.

- **Vistas frontal y lateral del cátodo de acero inoxidable / ánodo de hierro**



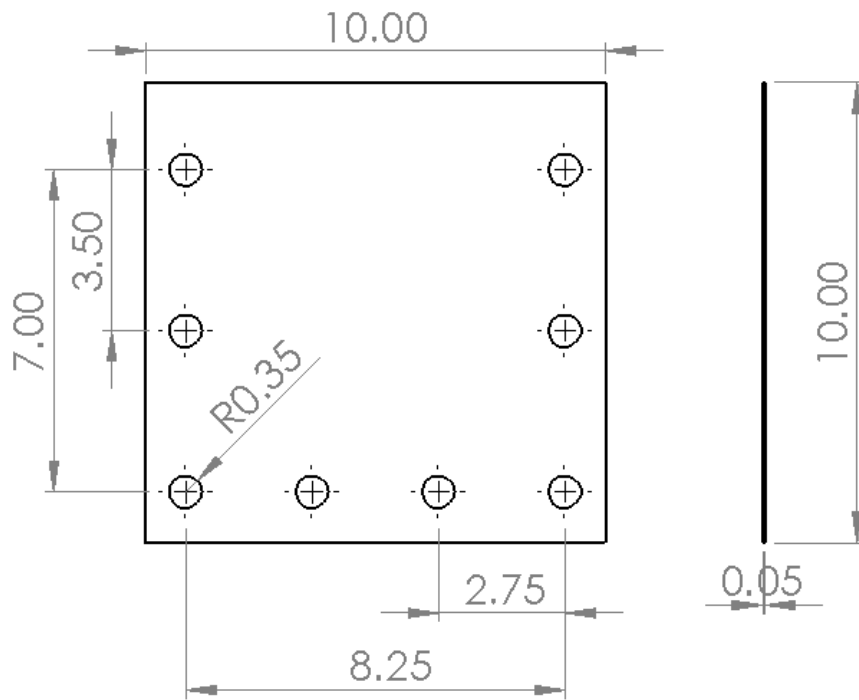
Fuente y elaboración propias.

- **Vistas frontal y lateral de una empaquetadura**



Fuente y elaboración propias.

- **Vistas frontal y lateral de la membrana de intercambio protónico**

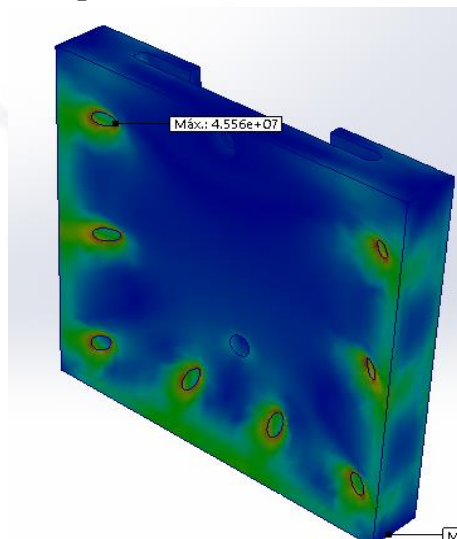


Fuente y elaboración propias.

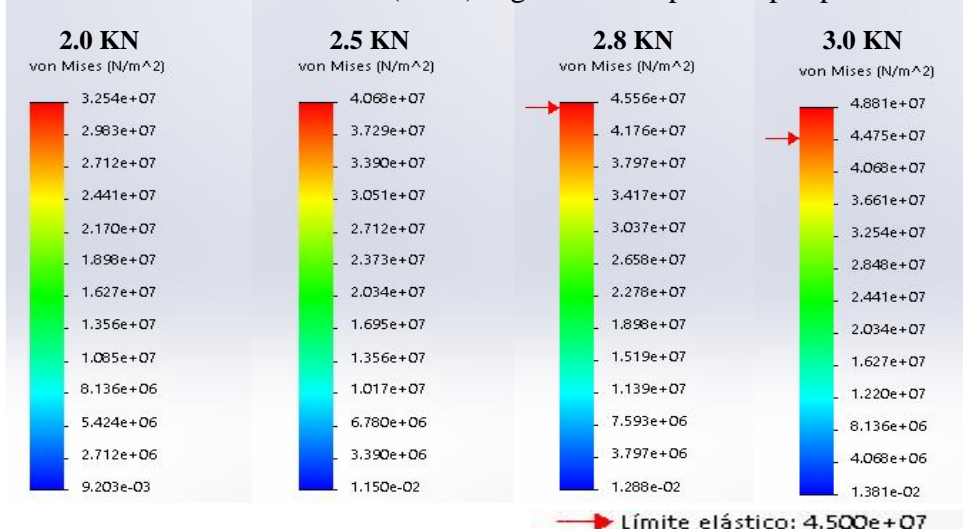
Anexo 3: Resultados de la prueba de esfuerzo sobre el reactor

A continuación, se muestran los gráficos resultantes de la prueba de esfuerzo sobre las paredes exteriores del reactor. La simulación fue llevada a cabo usando el componente de Simulation Express del programa SolidWorks, y los resultados se muestran en términos de desplazamientos con una escala de deformación de 50%. La coloración en las figuras representa la tensión de Von Mises a la que estaría sometida cada sección de la pieza al aplicárseles las fuerzas mencionadas.

- **Resultados de prueba de esfuerzo**



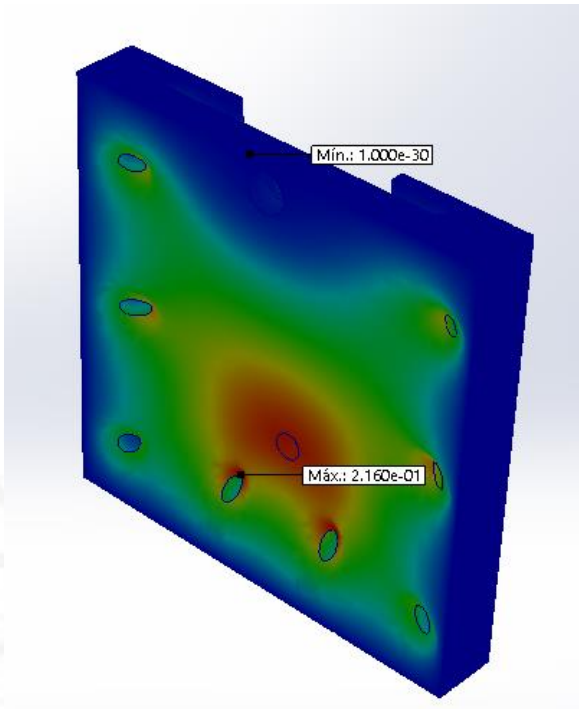
Tensión de Von Mises (Nm^{-2}) según fuerza aplicada por perno



Fuente y elaboración propias.

Asimismo, la mayor deformación se presenta en la sección próxima al agujero para la extracción de la solución de ferrato (VI):

- **Deformación esperada según prueba de esfuerzos**



Fuente y elaboración propias.