

MANUAL DEL SISTEMA DE NANO- BIORREMEDIACIÓN

Para el tratamiento de aguas residuales de
curtiembres de la cuenca alta del río Bogotá



UNIVERSIDAD
CENTRAL

Vigilada Mineducación



Gobernación de Cundinamarca

Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. EL PROCESO DE CURTIDO DE PIELES.....	3
2.1. Etapa 1. Ribera	4
2.2. Etapa 2. Curtido	5
2.3. Etapa 3. Acabado en húmedo	5
2.4. Etapa 4. Acabado en seco	5
3. AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE CURTIDO.....	5
4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES..	7
4.1. Sistemas de tratamientos de aguas residuales.....	7
4.2. Sistemas de tratamientos aplicados a la industria de las curtiembres.	8
4.3. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales.....	9
5. SISTEMA DE NANO-BIOREMEDIACIÓN A ESCALA PILOTO	10
5.1. Procesos de oxidación avanzada	11
5.2. La reacción Fenton	12
5.3. Hierro cerovalente a escala nanométrica	14
5.4. Biorremediación – Humedales artificiales	15
5.5. Tipos de humedales artificiales.....	16
5.6. Humedal subsuperficial de flujo vertical.....	19
6. GLOSARIO	21
7. REFERENCIAS.....	22

1. INTRODUCCIÓN

Los manuales son herramientas creadas para presentar de manera clara, organizada y sistemática información sobre un tema específico, vinculada a un proceso (Minciencias, 2021). En el marco del proyecto de investigación **"Investigación y desarrollo de un sistema de nano-biorremediación para el tratamiento de aguas residuales de las curtiembres en la cuenca alta del río Bogotá del departamento de Cundinamarca"**, financiado por Minciencias y ejecutado por la Universidad Central, se ha desarrollado un manual sobre el sistema de nano-biorremediación para el tratamiento de las aguas residuales de curtiembres implementado en campo.

El manual que se presenta a continuación tiene como objetivo proporcionar información detallada sobre el proceso de curtido de pieles, las aguas residuales que se generan en este proceso y los sistemas de tratamiento de aguas residuales disponibles. Además, se presenta un sistema de nano-biorremediación a escala piloto que se ha desarrollado para tratar las aguas residuales del proceso de curtido. Este sistema incluye una planta de nanoremediación y un humedal subsuperficial de flujo vertical para la biorremediación. Finalmente, se incluye un glosario para ayudar a los lectores a comprender los términos técnicos utilizados en el manual.

2. EL PROCESO DE CURTIDO DE PIELES

La historia del curtido de pieles se remonta a la prehistoria, cuando los primeros seres humanos empezaron a utilizar pieles de animales como resguardo contra los elementos y para conservar el calor (Campo, 2017). Con el tiempo, se han perfeccionado diversas técnicas y métodos destinados a conservar y curtir las pieles, transformándolas en cuero microbiológicamente estable mediante la reticulación y secado de proteínas (Mpofu et al., 2021). El curtido es una actividad fundamental en la industria de la moda y la fabricación de productos, tales como maletas, muebles y accesorios (Campos, 2017).

El proceso de curtido de pieles es similar en la mayoría de las empresas dedicadas a esta actividad. Sin embargo, las cantidades y tipos de químicos utilizados varían dependiendo del proveedor de los productos químicos, el origen y estado inicial de las pieles, el tipo de cuero que se desea conseguir y el criterio del curtidor. Por lo general, el proceso de curtido inicia con la comercialización de la piel obtenida luego del sacrificio animal. Solo en la ciudad de Bogotá se

sacrifican diariamente entre 900 y 1100 reses (Tellez & Barrera, 2023). La ciudad capital es el principal proveedor de pieles de las curtiembres del municipio de Villapinzón.

Estas curtiembres transforman la pieles en cuatro tres etapas, a saber: La ribera, el curtido y el acabado (Mejía, 2018). Sin embargo, otras fuentes indican que la etapa de acabado se divide a su vez en acabado húmedo y acabado en seco (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018). Cada etapa se desglosa en operaciones unitarias que, paso a paso, transforman la piel en cuero (Figura 1). A continuación, se describe detalladamente cada una de las etapas.

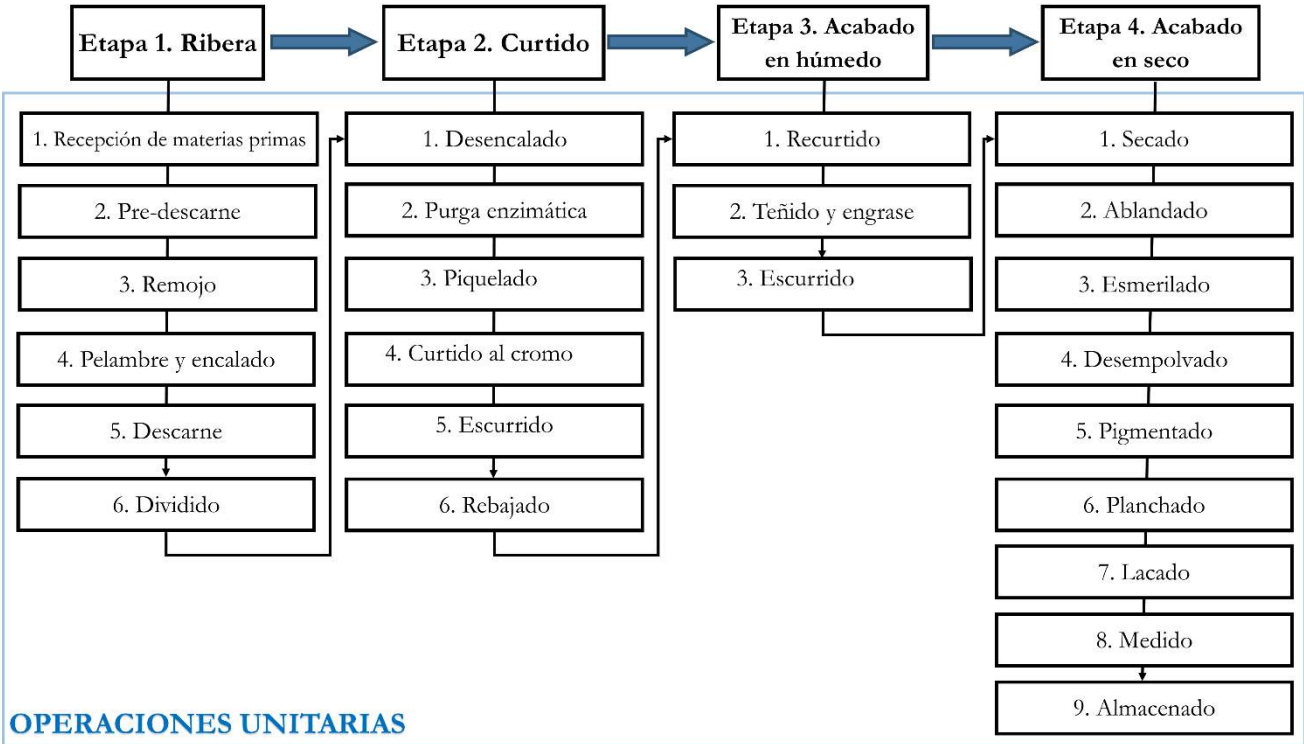


Figura 1. Etapas y operaciones unitarias del proceso de curtido de pieles. Fuente: Adaptado de (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018).

2.1. Etapa 1. Ribera

Durante la ribera, la piel (ya sea salada o fresca) se prepara para el curtido. En este proceso, las pieles son purgadas de los componentes que no son apropiados para el curtido, dejándolas listas para absorber el agente curtiente (Mejía, 2018; Secretaría Distrital de Ambiente, 2018).

2.2. Etapa 2. Curtido

El curtido es el proceso en el que el agente curtiente, como el cromo, se fija entre las fibras de colágeno de la piel, estabilizándolas al actuar como entrecruzamiento de las subunidades de colágeno (Hansen et al., 2021).

2.3. Etapa 3. Acabado en húmedo

En esta etapa se realiza con el objetivo de dar el acabado final al cuero. Se busca obtener cualidades como suavidad, color y textura, ajustándolas según el uso previsto para el cuero (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018). La denominación "acabado en húmedo" se debe a que, durante esta etapa, al igual que en etapas anteriores, el cuero se sumerge en baños químicos.

2.4. Etapa 4. Acabado en seco

El acabado en seco le otorga al cuero su apariencia definitiva, controlando factores como el color y el brillo (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018), a la vez que corrige imperfecciones que se originan durante la vida del animal, como las cicatrices causadas por heridas o picaduras de mosquito. Este procedimiento se lleva a cabo mediante maquinaria especializada que no requiere sumergir el cuero en baños químicos.

3. AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE CURTIDO

La transformación de las pieles crudas en cuero acabado implica someter las pieles a una serie de operaciones físicas, y químicas. Estas operaciones se llevan a cabo en medio acuoso (operaciones húmedas), con excepción del acabado en seco, utilizando tambores rotativos y generan efluentes líquidos. Durante estas operaciones húmedas, también se realizan lavados, lo que implica el consumo de agua y la generación de efluentes líquidos adicionales. El agua descargada después de cada etapa, junto con el agua de los lavados, se consideran aguas residuales y requieren tratamiento antes de ser liberadas al ambiente (Hansen et al., 2021).

Cada operación unitaria húmeda produce aguas residuales con diferentes características fisicoquímicas. En la etapa de ribera, se genera agua contaminada con sulfuros, materia orgánica y un pH mayor de 9,0. En la etapa de curtido, se añade sulfato básico de cromo ($\text{Cr}(\text{OH})\text{SO}_4$) por lo que el agua residual tiene alto contenido de Cr (III) y presencia de Cr (VI) con un pH de 3,5. Finalmente, en la etapa de acabado, las aguas producidas se caracterizan por su alto contenido de fenoles (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018). Dentro de estas etapas las operaciones unitarias que generan mayores volúmenes de aguas residuales son el pelambre que

hace parte de la etapa de ribera y el curtido al cromo, de la etapa de curtido. Además, es posible que algunas empresas combinen todas las aguas residuales del proceso, resultando en un efluente generalmente descrito como un agua residual básica de color marrón oscuro. Este efluente contiene concentraciones elevadas de DQO, DBO, SST, Cr (III) y fenoles, presentando un pH elevado y un fuerte olor (Dixit et al., 2015). En la tabla 1, se presentan las características fisicoquímicas de las aguas residuales de las curtiembres del municipio de Villapinzón.

Parámetro	Unidades	Pelambre		Curtido			Teñido		
<i>pH</i>		12,5	± 3,2	3,4	± 0,3	3,4	± 0,5		
<i>OD</i>	mg L ⁻¹	0,8	± 0,1	4,1	± 1,3	8,8	± 3,4		
<i>Conductividad</i>	μS cm ⁻¹	35750,0	± 125	112400,0	± 10540,0	11790,0	± 61,0		
<i>Temperatura</i>	°C	18,2	± 0,1	14,9	± 2,1	21,8	± 4,5		
<i>ORP</i>	mV	-423,6	± 25,0	170,1	± 40,8	205,5	± 22,4		
<i>DQO</i>		15760,0	± 1320,1	7731,0	± 842,0	6285,0	± 14,0		
<i>DBO</i>		4250,0	± 1230,0		ND	2236,0	± 6,4		
<i>ST</i>		151350,0	± 8342,0	106690,0	± 10483,4	5037,0	± 33,0		
<i>COT</i>	mg L ⁻¹	1275,0	± 53	1181,0	± 84,0	1200,0	± 26,0		
<i>Sulfuros</i>		3969,0	± 122,0		ND		ND		
<i>Cromo total</i>			ND	4182,7	± 344,0	90,0	± 6,4		
<i>Cromo VI</i>			ND	49,6	± 4,5	28,8	± 0		
<i>Cloruros</i>		17534,0	± 6211,0	7731	± 842		NM		

Tabla 1. Características fisicoquímicas de las aguas residuales de las operaciones unitarias principales del proceso de curtido. ND: No detectado. NM : No medido

Por otro lado, el volumen de aguas residuales también varía en función de la operación unitaria. Por ejemplo, la proporción del volumen de aguas residuales generado en el proceso de pelambre en comparación con el curtido al cromo es de 20:1. En otras palabras, por cada metro cúbico de aguas residuales de curtido se generan 20 metros cúbicos de aguas residuales de pelambre. La cantidad de agua consumida también fluctúa significativamente según el nivel y tipo de tecnología de procesamiento utilizado en cada etapa (C. Zhao & Chen, 2019). Se estima que en total se genera entre 30 a 35 m³ de agua residual por tonelada de piel procesada (Islam et al., 2014). El agua residual de curtiembres puede causar impactos negativos en los organismos vivos y el ambiente, ya que estas pueden contener compuestos químicos potencialmente tóxicos (Chausali et al., 2021). Cuando estas aguas entran en contacto con cuerpos de agua reducen la actividad fotosintética y la oxigenación al evitar la penetración de la luz solar debido a su coloración marrón oscura, lo cual es perjudicial para la vida acuática (Jallouli et al., 2020). Además, la disminución del oxígeno disuelto favorece la aparición de condiciones anaerobias que generan un olor putrefacto (Grams Metz et al., 2015). Las aguas residuales de curtiembre

pueden causar eutrofización de cuerpos de agua superficial y salinización de ríos y aguas subterráneas. También se ha informado que cuando estas aguas riego inhiben los procesos de nitrificación (Saxena et al., 2017). Por lo tanto, es importante aplicar sistemas de tratamiento que mejoran las características del agua antes de ser liberadas al ambiente.

4. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE CURTIEMBRES

El agua natural rara vez es completamente pura; al llover, las partículas orgánicas e inorgánicas del aire se disuelven en ella. Cuando el agua entra en contacto con la superficie de la tierra arrastra diferentes materiales durante su flujo sobre el suelo. Además, al infiltrarse en el suelo, el agua disuelve sales y se carga de sólidos. En consecuencia, adquiere una variedad de impurezas en su estado natural. Sin embargo, cuando el agua es usada para propósitos domésticos e industriales se le añaden contaminantes. Los contaminantes son sustancias capaces de causar daño a la salud humana y el ambiente. Por consiguiente, desde la década de los años 60, la contaminación se ha vuelto un término de uso común e incluso ha generado cierta preocupación colectiva. No obstante, la humanidad cuenta con la capacidad técnica para corregir la contaminación. El tema principal de este capítulo del manual se centra en los sistemas de tratamiento desarrollados para el tratamiento de aguas residuales, particularmente aquellos que han sido implementado para la industria de las curtiembres.

4.1. Sistemas de tratamientos de aguas residuales

Un sistema de tratamiento de aguas residuales se define como una combinación de procesos y tecnologías diseñadas para eliminar los contaminantes presentes en las aguas residuales. El objetivo de estos sistemas es que los efluentes cumplan con los estándares de calidad ambiental y puedan ser reutilizados o liberados al ambiente (Sperling, 2007). Las aguas residuales industriales pueden contener diversos tipos y concentraciones de contaminantes, tales como metales pesados, materiales orgánicos e inorgánicos, toxinas, fármacos, microplásticos, materiales radioactivos, e incluso, si las aguas son vertidas a alta temperatura, se considera como contaminación térmica. Por lo tanto, es conveniente que los sistemas de tratamientos sean diseñados y ajustados dependiendo de los contaminantes presentes en las aguas residuales de cada industria.

4.2. Sistemas de tratamientos aplicados a la industria de las curtiembres.

En el caso de las aguas residuales de curtiembres, se generan diversos tipos de efluentes. Por lo tanto, las empresas pueden abordar el tratamiento procesando inicialmente los efluentes de manera individual o mezclándolas y tratándolas en conjunto. En el tratamiento individual, se tratan las aguas residuales de los procesos de pelambre, curtido al cromo y teñido de manera independiente, y finalmente, las aguas tratadas de cada operación unitaria se integran y se someten a tratamientos adicionales hasta alcanzar las características fisicoquímicas que cumplan con la legislación (C. Zhao & Chen, 2019).

Los sistemas de tratamientos de aguas residuales generalmente son procesos en etapas: tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. El tratamiento primario, el cual es la primera etapa del sistema, tiene como objetivo eliminar los sólidos en suspensión y sedimentables, empleando principalmente medios mecánicos como rejillas y cribados (Guyer, 2011). En el tratamiento de aguas residuales de curtiembres el tratamiento primario se usa para eliminar los sólidos suspendidos y reducir la carga orgánica. Las tecnologías de tratamiento primario empleadas en las curtiembres son: flotación por aire, neutralización, coagulación, la adsorción, micro electrólisis, fotocatalisis y electrodiálisis (J. Zhao et al., 2022).

El tratamiento secundario comprende procesos biológicos tanto aerobios como anaerobios. Las tecnologías aplicados a las aguas residuales de curtiembres son las zanjas de oxidación, lodos activados en reactores por lotes, oxidación por contacto, humedales artificiales, reactores de lecho móvil y microalgas. El tratamiento terciario es un tratamiento avanzado y profundo que permite completar la remoción de contaminantes que no logra el tratamiento secundario, estos tratamientos generalmente incluyen oxidación avanzada y separación con membranas (Saxena et al., 2017).

En la cuenca del río Bogotá, los sistemas de tratamiento de aguas residuales se dividen en cuatro etapas: Pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. El tratamiento preliminar son operaciones físicas destinadas a retirar sólidos y el material grueso en suspensión. El tratamiento primario comprende procesos fisicoquímicos para remover la mayoría de los contaminantes como la materia orgánica (representada como DBO y DQO), sulfuros y cromo, utilizando principalmente técnicas de floculación, coagulación y sedimentación. El tratamiento secundario, basado en procesos fisicoquímicos avanzados, se centra en la eliminación de la materia orgánica residual, siendo el tratamiento con lodos activados

una opción comúnmente empleada. Finalmente, el tratamiento terciario, involucra procesos químicos y/o biológicos, utilizados para reducir contaminantes químicos, patógenos y parásitos. Se emplean tecnologías como nitrificación y desnitrificación, sedimentación y manejo de lodos (Secretaría Distrital de Ambiente, 2018).

En el municipio de Villapinzón los sistemas de tratamientos de aguas residuales varían dependiendo del nivel tecnológico y de formalización de cada curtiembre. De acuerdo con Moreno (2015), se pueden clasificar a los curtidores en cuatro tipos: el tipo uno posee plantas de tratamiento de alto nivel tecnológico, el tipo dos tiene plantas de tratamiento mal diseñadas, el tipo tres no invierte en el tratamiento de aguas, y el tipo cuatro opera al margen de cualquier control. Es importante tener en cuenta este contexto social para poder implementar estrategias efectivas de tratamiento de aguas residuales.

4.3. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Las tecnologías de tratamiento pueden clasificarse como métodos físicos, químicos y biológicos (J. Zhao et al., 2022). . Otra forma de clasificación, de acuerdo con las tendencias actuales, incluye métodos fisicoquímicos, biológicos y enfoques emergentes de tratamiento. Estos métodos pueden aplicarse de manera individual o combinada. a figura 2 presenta las tecnologías comúnmente utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en la industria de las curtiembres.

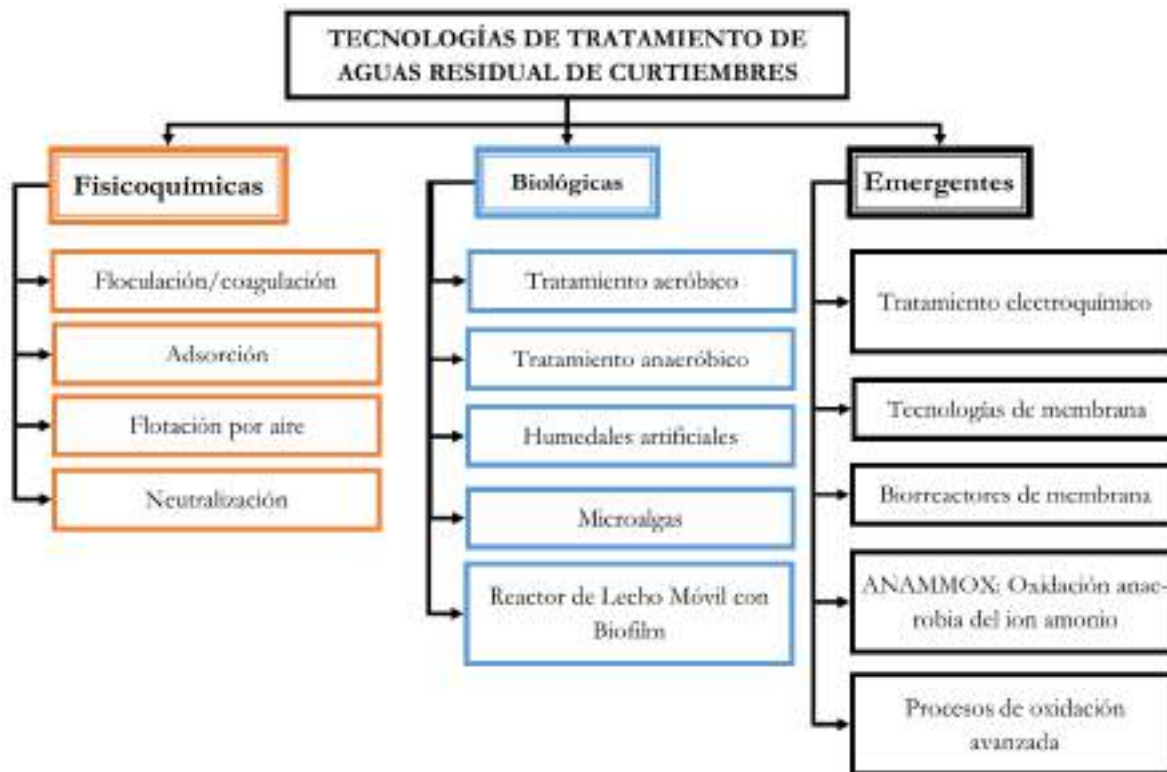


Figura 2. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales de curtiembres. Fuente: Elaboración propia

5. SISTEMA DE NANO-BIOREMEDIACIÓN A ESCALA PILOTO

El sistema de nanobioremediación diseñado integra dos tecnologías de tratamiento, combinando una primera etapa centrada en la nanotecnología con otra basada en procesos biológicos (Figura 3). Esta primera etapa hace parte de las tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales de curtiembres, conocidas como procesos de oxidación avanzada (POA). Estos procesos han capturado la atención por lograr en gran medida el tratamiento de contaminantes complejos a través de mecanismo químico que genera el radical hidroxilo ($\text{OH}\bullet$), altamente reactivo y capaz de degradar la materia orgánica, mejorando su biodegradabilidad (Korpe & Rao, 2021), en esta investigación se desarrolló un planta piloto la cual es capaz de ejecutar un proceso de oxidación avanzada utilizando un nanomaterial de hierro cerovalente (**ver anexo 1, Manual elementos mecánicos planta**).

Por otro lado, la etapa biológica empleada es una tecnología conocida como humedales subsuperficiales de flujo vertical. Esta tecnología es un constructo compuesto por un sustrato

confinado el cual sirve como soporte para la vegetación y al que se hace pasar el agua durante un tiempo específico que permite la aparición de mecanismos biológicos, físicos y químicos que remueven los contaminantes del agua residual (CPCB, 2019). Este capítulo compila la información necesaria para comprender ambas tecnologías y como se acoplan para conformar el sistema de nanobiorremediación.

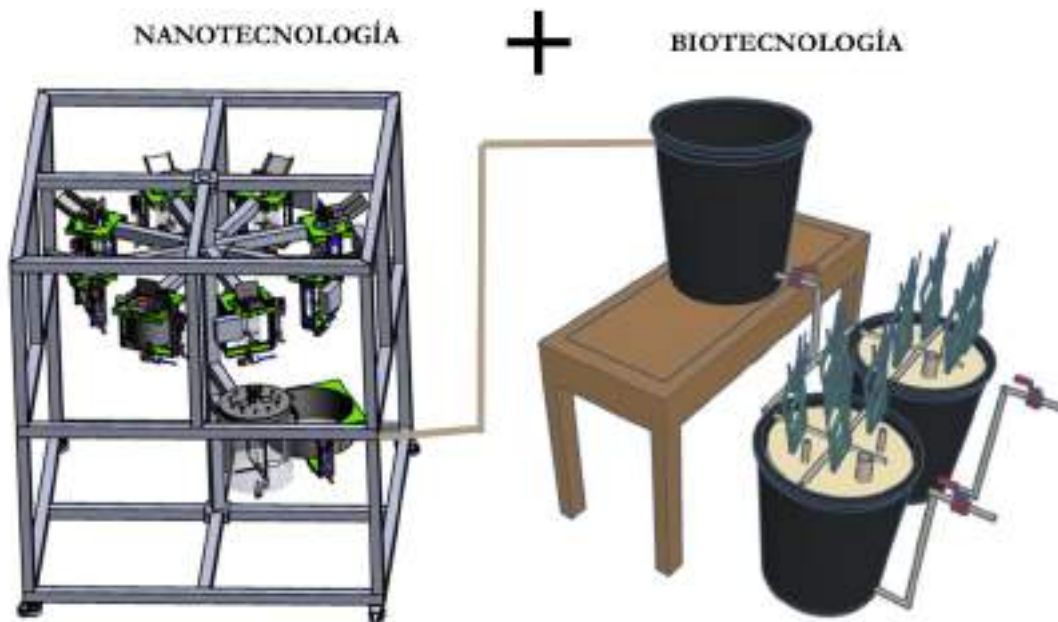


Figura 3. Diseño isométrico de la planta de nano-biorremediación. Adaptado de: “manual de elementos mecánicos planta nanoremediación”.

5.1. Procesos de oxidación avanzada

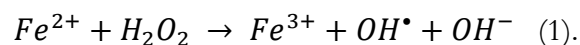
Los procesos de oxidación avanzada (POA) fueron propuestos por primera vez en la década de 1980 para el tratamiento de agua potable, pero posteriormente se usaron para el tratamiento de diferentes clases aguas residuales. Esto se debe a que los fuertes oxidantes producidos en los POA pueden degradar eficazmente contaminantes orgánicos recalcitrantes y eliminar algunos contaminantes inorgánicos en las aguas residuales (Deng & Zhao, 2015). Los POA comprenden un grupo de procesos químicos, físicos, fotoquímicos y electroquímicos capaces de producir potentes oxidantes, en su mayoría radicales hidroxilos, cuyo símbolo químico es $\text{OH}\cdot$ (Titchou et al., 2021). Sin embargo, el concepto de oxidación avanzada se ha expandido para incluir procesos que utilizan radicales sulfato ($\text{SO}_4\cdot^-$) como oxidante. En la tabla 2 se presentan algunos de los procesos de oxidación, siendo el proceso Fenton uno de los más utilizados debido a su versatilidad.

Tipo de POA	Oxidante	Otros mecanismos que ocurren
O ₃	OH•	Oxidación directa con O ₃
O ₃ /H ₂ O ₂	OH•	Oxidación directa con O ₃
O ₃ /UV	OH•	Fotólisis UV
UV/TiO ₂	OH•	Fotólisis UV
UV/H ₂ O ₂	OH•	Fotólisis UV Oxidación con H ₂ O ₂
Fenton	OH•	Coagulación con hierro Adsorción inducida por lodo de hierro
Foto-Fenton	OH•	Coagulación con hierro Adsorción inducida por lodo de hierro
Irradiación ultrasónica	OH•	La cavitación acústica genera temperaturas transitorias elevadas (≥5000 K) y presiones (≥1000 atm), y produce H• y HO ₂ •.
Calor/Persulfato	SO ₄ •-	Oxidación con persulfato
UV/Persulfato	SO ₄ •-	Oxidación con persulfato Fotólisis UV
Fe ²⁺ /Persulfato	SO ₄ •-	Oxidación con persulfato Coagulación con hierro Adsorción inducida por lodo de hierro
OH/Persulfato	SO ₄ •-/ OH•	Oxidación con persulfato

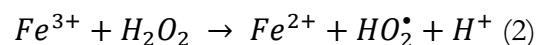
Tabla 2. Principales mecanismos para la eliminación de compuestos orgánicos durante el tratamiento de aguas residuales mediante diferentes POA. Tomado de: (Deng & Zhao, 2015).

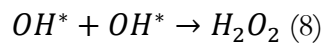
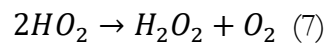
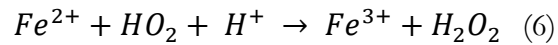
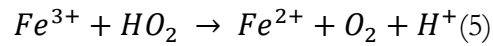
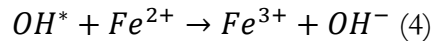
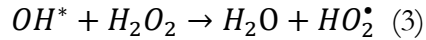
5.2. La reacción Fenton

El proceso Fenton es uno de los más destacados entre los POA es llamado así en honor a quien lo descubrió, H. J. H. Fenton, el cual publicó la degradación de ácido tartárico en presencia de hierro, en el año 1894 (Fenton, 1894), este proceso consiste en la oxidación de sales de hierro en presencia de peróxido de hidrogeno (H₂O₂) lo que produce la degradación de la materia orgánica a productos intermedios como alcoholes, ácidos carboxílicos o aldehídos y finalmente a dióxido de carbono y agua (Ziembowicz & Kida, 2022). La ecuación general que representa la reacción Fenton se describe en la ecuación 1.

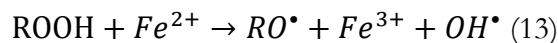
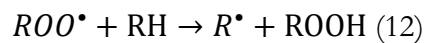
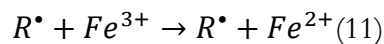
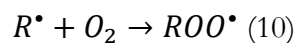
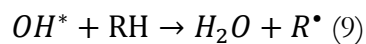


Sin embargo, la reacción completa es más compleja y consiste en una serie de reacciones descritas a continuación:





La oxidación de los compuestos orgánicos en el proceso Fenton consiste en la reacción de los radicales libres con las moléculas contaminantes. El radical hidroxilo (OH^\bullet) elimina el átomo de hidrogeno de la molécula orgánica creando un radical orgánico (R^\bullet), este radical reacciona con el oxígeno del medio para formar el radical peróxido orgánico (ROO^\bullet) y también reacciona con el Fe^{3+} reduciéndolo a Fe^{2+} . El radical ROO^\bullet reacciona con las moléculas orgánicas para formar otro radical orgánico (R^\bullet). Estas transformaciones químicas dan como resultado la disminución gradual del peso molecular de la materia orgánica. Además, la reacción Fenton tiene la ventaja de inducir el proceso de floculación y precipitación de contaminantes, ya que durante la reacción se forman iones de Fe^{3+} que precipitan en forma de un coloide de hidróxido de hierro (Ziembowicz & Kida, 2022), lo anteriormente descrito se resume en las siguiente reacciones:



Sin embargo, algunos investigadores creen que el agente oxidante es el ion ferrilo (FeO^{2+}) de acuerdo con la reacción propuesta por Bray y Gorin en 1932. A pesar de la controversia, se han publicado un sinnúmero de trabajos sobre su aplicación para la degradación de contaminantes orgánicos describiendo una gran cantidad de reacciones independientes, las cuales pueden ser

generalizadas en tres etapas: iniciación, propagación y terminación (Vorontsov, 2019). Por otro lado, se ha reportado que el proceso Fenton también se ve afectado por condiciones operativas como la concentración y proporción de Fe^{2+} y H_2O_2 (reactivo Fenton), el pH, el tiempo de agitación, la temperatura, la concentración de contaminantes y el tipo de agua residual, no obstante, los parámetros que son considerados como los más importantes son el reactivo Fenton y el pH, así, la producción de radicales hidroxilo para la degradación de contaminantes mediante la reacción Fenton es efectiva a un pH en el rango de 2,5 a 3,5 (Bello et al., 2019).

Este mecanismo clásico descrito anteriormente donde los iones de hierro se encuentran en solución es conocido como Fenton homogéneo. En los últimos años ha aumentado el interés en desarrollar sistemas Fenton que utilicen catalizadores heterogéneos, en la reacción heterogénea los catalizadores sólidos a base de hierro se utilizan como sitios activos para generar el ion ferroso lo que reduce la producción de lodos de hierro férrico y la limitación del pH, además, es posible que el Fe^{2+} se lixivie permitiendo la reacción homogénea en combinación con la reacción heterogénea lo que contribuye a la eliminación de contaminantes (Litter & Slodowicz, 2017).

La oxidación heterogénea implica dos procesos complejos en el tratamiento de contaminantes orgánicos, el primero es la oxidación por parte de los radicales hidroxilo y la segunda son procesos físicos que ocurren en la superficie del catalizador. En otras palabras, las especies de hierro en la superficie y el hierro lixiviado reaccionan con el H_2O_2 produciendo los $\text{OH}\cdot$, además, los contaminantes orgánicos y el $\text{OH}\cdot$ pueden ser adsorbidos en la superficie del catalizador mediante quimisorción (Yin et al., 2021). Existen diferentes catalizadores heterogéneos utilizados en la reacción Fenton los cuales pueden dividirse en origen natural (minerales y arcillas), artificiales o creados a partir de la modificación de materias primas, residuos industriales y hierro cerovalente (Ziembowicz & Kida, 2022).

5.3. Hierro cerovalente a escala nanométrica

El hierro cerovalente a escala nanométrica es un tipo de hierro que se distribuye en partículas extraordinariamente pequeñas en el orden de los nanómetros (nZVI). La escala nanométrica se refiere a dimensiones increíblemente diminutas por lo que no es posible ver una nZVI individual a simple vista, son 20 mil veces más pequeñas que una célula humana. Gracias a su tamaño las nZVI tienen propiedades especiales que las hacen útiles para aplicaciones como la remediación ambiental. Por ejemplo, son superparamagnéticas, lo que permite que las nZVI reaccionen a un

campo magnético sin ser imanes permanentes, por lo que al retirar el campo no se aglomeran; esto permite recuperarlas para su eventual reutilización (Huber, 2005).

Al ser tan pequeñas las nZVI tienen una alta área superficial y reactividad química, así como propiedades de adsorción más fuertes y más movilidad que las partículas de hierro de mayor tamaño para el tratamiento de contaminantes orgánicos como inorgánicos (Ken & Sinha, 2020). Las nZVI se han aplicado en la remediación de diversos contaminantes (Li et al., 2023). Cuando los contaminantes entran en contacto con las nZVI experimentan diversos procesos, como reducción, oxidación y adsorción (Krithika Shree et al., 2023). Además, las nZVI pueden ser usadas como catalizador en la reacción Fenton, dando lugar al Fenton heterogéneo.

El uso de las nZVI tiene beneficios potenciales en comparación con otros catalizadores sólidos. Puede ser usado en entornos acuáticos y terrestres. Tienen capacidad de regeneración y reutilización y son compatibles con otras tecnologías de tratamiento (Ken & Sinha, 2020). Además, en la actualidad se pueden conseguir en el mercado, por lo que pueden ser incluidas en la cadena de valor.

5.4. Biorremediación – Humedales artificiales

La biorremediación es una técnica que utiliza organismos vivos, como plantas o microorganismos, o sus partes para reducir o eliminar los contaminantes presentes en el ambiente (Saxena & Bharagava, 2020). En el contexto del tratamiento de aguas, hace referencia a las tecnologías de tratamiento biológico. De estas tecnologías se destacan los humedales artificiales al ser una alternativa económica y eficaz en comparación con las tecnologías convencionales debido a su fácil construcción y operación. Además, pueden ser instalados en áreas de difícil acceso ya que simulan las condiciones y procesos presentes en entornos húmedos naturales (H. Wu et al., 2015).

Para la construcción de un humedal artificial, se selecciona un sustrato sólido, como tierra o gravilla, que se coloca y compacta sobre una barrera impermeable. En este sustrato, se plantan macrófitas, que son plantas capaces de prosperar en entornos acuáticos. El agua residual se dirige a través del sustrato durante un período definido, conocido como tiempo de retención hidráulica (CPCB, 2019). Existen diversos tipos de humedales artificiales, categorizados según su hidrología, ya sea de flujo superficial o subsuperficial, y según la dirección del flujo, que puede ser vertical u horizontal (Parde et al., 2021).

Los criterios fundamentales para el diseño y la operación de un humedal son esenciales para alcanzar las condiciones naturales necesarias para la biorremediación. Estos criterios abarcan la selección del lugar, la elección del sustrato, el tipo de agua residual, la selección de la vegetación, la carga hidráulica, el tiempo de retención hidráulica, la profundidad y las dimensiones del humedal (H. Wu et al., 2015).

5.5. Tipos de humedales artificiales

La diversidad de los humedales artificiales se refleja en distintos criterios de diseño que influyen en sus características finales. Por ejemplo, al contar con espacio suficiente, resulta beneficioso optar por un diseño de flujo horizontal. En contraste, cuando el espacio es limitado, la elección de un flujo vertical se vuelve más conveniente, ya que demanda una menor superficie para el tratamiento de contaminantes orgánicos (Dissanayaka, 2022). Sin embargo, tienen una mayor propensión a obstruirse si ingresan sólidos suspendidos, por lo que es necesario acoplarlos a etapas previas que se encarguen de remover dichos sólidos. Otra consideración importante es la hidrología de la zona donde se va a instalar, ya que condiciones como la evapotranspiración y la precipitación influyen en el balance hídrico del humedal al ser una estructura a cielo abierto. En Colombia, existe una red de estaciones meteorológica gestionada por el IDEAM las cuales generan información de acceso abierto (CAR, 2006). Además, dependiendo del tipo de humedal también tiene diferentes requerimientos de mantenimiento y energía. En la figura 4 se presentan diferentes tipos de humedales y su requerimiento de energía (S. Wu et al., 2015).

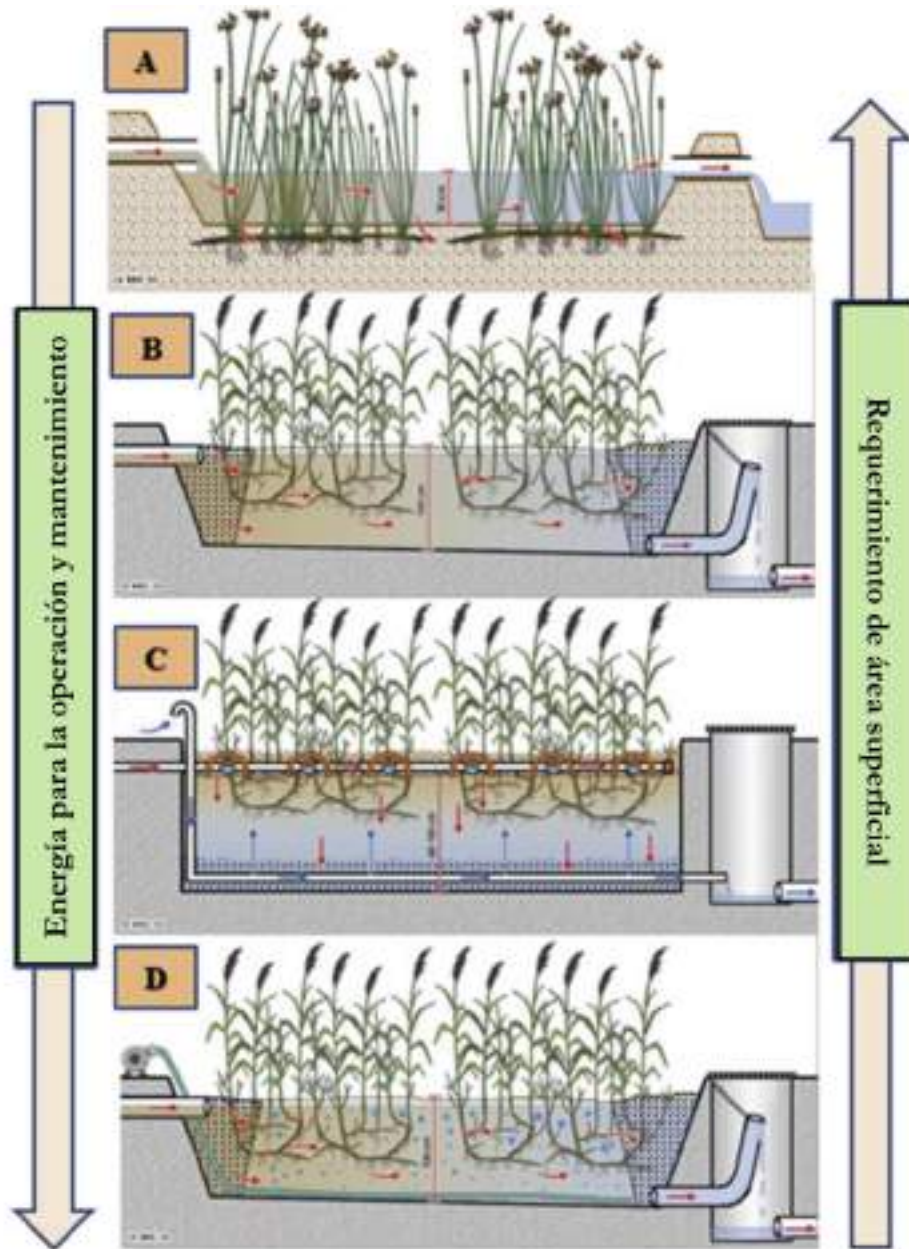


Figura 4. Relación entre la energía y las necesidades de operación y mantenimiento. Así como de la superficie de tierra requerida para diferentes tipos de humedales artificiales. A: Humedales de flujo superficial, B: Humedales de flujo subsuperficial, C: Humedales de flujo vertical y D: Humedales de flujo vertical aireados. Modificado de: (Wu et al., 2015).

Además, se debe seleccionar el sustrato del humedal, El sustrato del humedal es el soporte de la vegetación y el lugar donde ocurren las transformaciones biológicas y químicas de los contaminantes y debe permitir el movimiento del agua a través de él, este puede estar compuesto por suelo, grava, arena y/o materiales orgánicos (Wu et al., 2015). Si el medio granular o sustrato

se constituye de varias capas se deben ubicar las más delgadas en la parte superior aumentando el diámetro con la profundidad (Comisión Nacional del Agua, 2015).

Por otro lado, la elección del sustrato se realiza en función del nivel de contaminación y del tipo de contaminantes presentes en el agua. En el caso de las aguas residuales del proceso de curtiembres, que poseen una alta concentración de DQO, se han empleado diversos tipos de sustratos para su remoción. Abedi & Mojiri (2019) utilizaron sustratos como biochar, zeolita y grava, observando excelentes resultados en la eliminación de DQO. Además, se pueden emplear sustratos de diferentes diámetros dispuestos en capas. Por ejemplo, Xu & Cui (2019) propusieron el uso de un sustrato compuesto principalmente por arena de río con un diámetro de 1 mm a 2 mm y solo dos capas de gravilla con un diámetro de 20 mm. Asimismo, se ha observado la capacidad de remoción de DQO en humedales que utilizan únicamente grava con un diámetro de 2 mm (Zeng et al., 2020).

Otra consideración de diseño importante es la vegetación que se usa, en los humedales artificiales se utilizan macrófitas, o también conocidas como plantas palustres, ya que son capaces de vivir en terrenos inundados; a pesar de que alrededor del mundo se han usado más de 150 especies de macrófitas solo un número limitado funciona de forma óptima (Younas et al., 2022). Estas plantas pueden ser de tipo emergente, hoja flotante y flotación libre; Para el humedal subsuperficial se utilizan de tipo emergente. Algunas de los géneros utilizados son *Phragmites* spp. (Poaceae), *Typha* spp. (Typhaceae), *Scirpus* spp. (Cyperaceae), *Iris* spp. (Iridaceae), *Juncus* spp. (Juncaceae) y *Eleocharis* spp. (Spikerush) (Wu et al., 2015).

En el mundo la planta usada con mayor frecuencia en los humedales del flujo sub superficial horizontal es *Phragmites Australis* (Vymazal, 2011). Además, también ha sido utilizado en humedales de flujo vertical para la remoción de DQO con excelentes resultados (Abedi & Mojiri, 2019). Este mismo género de macrófitas ya se ha utilizado anteriormente en un humedal construido en una curtiembre del sector de Villapinzón, específicamente la especie *Phragmites Communis* (Herrera & Rodriguez, 2011), por lo que es una excelente opción para implementar esta tecnología de tratamiento en el sector.

5.6. Humedal subsuperficial de flujo vertical

En un humedal de flujo vertical las aguas contaminadas se bombean de manera intermitente en la superficie y atraviesa el substrato de forma vertical por acción de la gravedad, finalmente es recolectado por un sistema de drenaje de fondo. Los intervalos de bombeo de corta duración son de entre 4 a 12 dosis al día permitiendo largos periodos de reposo del agua en el humedal, gracias a esta carga intermitente se logran las condiciones aeróbicas para facilitar la acción microbiana, para esto mismo, es recomendable usar tuberías cribadas con salidas al exterior. En la superficie del humedal las tuberías de distribución deben estar niveladas y cubiertas de grava para evitar la acumulación de aguas superficiales. Además, estas tuberías deben diseñarse para garantizar que las aguas contaminadas ingresen de forma uniforme al humedal, para ello se debe considerar el diámetro de la tubería, la distribución, la longitud, el diámetro de los agujeros y la distancia entre los agujeros (CPCB, 2019).

Los tubos de drenaje también deben estar cubiertos por grava para permitir un mejor drenaje y es importante dejar una pequeña pendiente (0,5%) hacia la salida para favorecer el drenaje. La profundidad del lecho filtrante debe ser de al menos 50 cm, con capas superior e inferior en grava de aproximadamente 10 cm y una borda libre de 15 cm para la acumulación de agua, el área superficial del humedal se calcula de acuerdo con la ecuación propuesta por Kikuth en 1977 (Mucha et al., 2018) y que es implementada por (EPA, 1993):

$$A_h = Q_d(\ln C_{in} - \ln C_{out})/KTdn$$

Donde: A_h es el área superficial del humedal (m^2), Q_d es el caudal medio ($L s^{-1}$), C_{in} es la DBO_5 del afluente ($mg L^{-1}$), C_{out} es la DBO_5 del efluente ($mg L^{-1}$), KT es la constante cinética de primer orden (d^{-1}), d es la profundidad de lecho (m) y n la porosidad (fracción) (Comisión Nacional del Agua, 2015). Para calcular la constante cinética de primer orden corregida por la temperatura se utiliza la ecuación de Arrhenius de la siguiente forma:

$$KT = K_{v,20}\theta^{T-20}$$

Donde: T es la temperatura promedio del agua ($^{\circ}C$) y θ es el coeficiente de Arrhenius, sin embargo, según Reed et al (1995) el valor de este coeficiente para un flujo subsuperficial es 1,104 d^{-1} . De acuerdo con lo anterior, un punto de partida importante es realizar las pruebas de DBO_5 correspondientes para poder dimensionar el humedal a escala piloto.

Para el cálculo del tiempo de retención hidráulica existen reglas empíricas que indican que el óptimo de operación está entre dos a siete días, e incluso máximo hasta cuatro días (Comisión Nacional del Agua, 2015). Ahora bien, se requiere de un periodo de adaptación en el cual el humedal debe ser cargados únicamente con agua potable y luego se va agregando gradualmente mezclas de agua residual y agua potable hasta alcanzar un 100% de agua residual, se recomienda que el periodo de adaptación sea de alrededor de 15 días (Bedoya Pérez et al., 2014). Una vez finalizada esta etapa de adaptación se descarga completamente el humedal y se vuelve a cargar nuevamente con agua residual, una vez en operación se toman medidas de DQO cada 24 horas durante tres días para diferentes tiempos de retención hidráulica, hasta que se obtenga un máximo de remoción de DQO en el menor tiempo posible. Para el cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH) se utiliza la siguiente ecuación (Alasino et al., 2015).

$$TRH = \frac{(LWh)\epsilon}{v}$$

Donde: L, W y h son el largo, el ancho y la profundidad respectivamente (en cm); ϵ es la porosidad del lecho (fracción) y v es el caudal volumétrico del efluente ($\text{cm}^3 \text{L}^{-1}$). Considerando las características de diseño establecidas en este capítulo en la figura 5 se presenta el diseño del humedal artificial de flujo vertical piloto implementado.

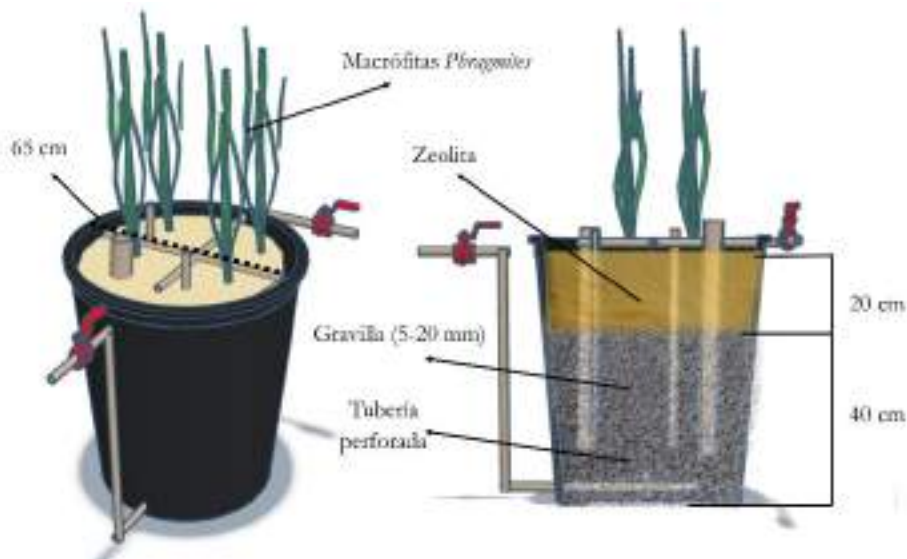


Figura 5. Configuración del humedal subsuperficial de flujo vertical a escala piloto.

6. GLOSARIO

Escala nanométrica: La escala nanométrica se refiere a tamaños extremadamente pequeños que se miden en nanómetros (nm). Un nanómetro es una unidad de longitud equivalente a una mil millonésima parte de un metro. En este tamaño existen estructuras, partículas o materiales que tienen dimensiones 80,000 veces más pequeño que el grosor de un cabello humano.

Nanociencia: La nanociencia se centra en el estudio de los fenómenos y propiedades de los materiales a nivel nanométrico, es decir, en la escala de nanómetros (millonésimas de milímetro). Esta disciplina investiga cómo los materiales y sistemas cambian sus propiedades físicas, químicas y biológicas a esta escala. Los científicos en el campo de la nanociencia buscan entender los principios fundamentales que gobiernan el comportamiento de la materia a nivel nanométrico. La nanociencia abarca campos como la física, la química, la biología y la ciencia de los materiales (Quintili, 2012).

Nanotecnología: La nanotecnología se refiere a la aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la nanociencia para diseñar, fabricar y utilizar estructuras, dispositivos y sistemas a nivel nanométrico con propósitos específicos. La nanotecnología implica manipular y controlar la materia en la escala nanométrica para crear nuevos materiales, productos y tecnologías que aprovechan las propiedades únicas que surgen a esta escala. Puede abarcar diversas áreas, como la medicina, la electrónica, la energía, la fabricación de materiales avanzados y aplicaciones ambientales (Quintili, 2012).

pH: Potencial de hidrogeno. Es un valor numérico adimensional que representa el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrogeno a una temperatura específica. Indica la acidez o alcalinidad del agua, varía entre 0 y 14, donde 0 es el mas acido, 7 es neutro y 14 el más básico.

DQO: Demanda química de oxígeno. Es una medida de la cantidad de oxigeno requerido para oxidar los compuestos químicos presentes en el agua, tanto orgánicos como inorgánicos. Se expresa como miligramos de oxigeno por litro de agua (mg O/L).

ST: Solidos totales: Es la medida de la cantidad de solidos presentes en el agua, contempla la cantidad de solidos disueltos, mas los solidos suspendidos y los solidos sedimentables.

DBO: Demanda biológica de oxígeno. Es una medida de la cantidad de oxigeno consumido por procesos biológicos para la degradación de la materia orgánica en el agua. La DBO₅ es la medida de la DBO durante cinco días.

Nanopartículas: Son ensamblajes de átomos discretos a escala nanométrica (10^{-9} m). La cantidad de átomos en las partículas es muy pequeña y una fracción grande de ellos se encuentra en o cerca de su superficie, lo que altera de manera significativa la estructura atómica, electrónica y magnética de la partícula, así como sus propiedades físicas y químicas, y su reactividad en relación al material a granel (Kotsuchibashi et al., 2016).

Nanoremediación: Es una técnica que utiliza nanomateriales (como el hierro cerovalente a escala nanométrica) para remediar o prevenir la contaminación ambiental (Ganie et al., 2021).

Biotecnología: Es un campo multidisciplinario que utiliza organismos vivos, células y sistemas biológicos, así como sus derivados, para desarrollar o crear productos y aplicaciones tecnológicas.

7. REFERENCIAS

- Abedi, T., & Mojiri, A. (2019). Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. *Environmental Technology and Innovation*, 16, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>
- Alasino, N., Nadal, F., Primo, L., Bollo, P., & Larrosa, N. (2015). *Comportamiento cinético e hidráulico de un humedal construido a escala real. VI*, 93–104.
- Bedoya Pérez, J. C., Ardila Arias, A. N., & Reyes Calle, J. (2014). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 30(3), 275–283.
- Bello, M. M., Abdul Raman, A. A., & Asghar, A. (2019). A review on approaches for addressing the limitations of Fenton oxidation for recalcitrant wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 126, 119–140. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.03.028>
- Campos Fabregat, J. C. (2017a). *La conservación de la piel*. Química internacional. https://www.quimicainternacional.com/pdf/biblioteca/enciclopedia/Capitulo_02_Conservacion_de_la_piel.pdf
- Campos Fabregat, J. C. (2017b). La piel a lo largo de la historia. In *Química internacional para el curtido*.

- CAR. (2006). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca alta del río Bogotá.*
- Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. (2021). Nanobiochar and biochar based nanocomposites: Advances and applications. *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100191>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.*
- CPCB. (2019). *Manual on Constructed Wetland as an Alternative Technology for Sewage Management in India* (p. 207).
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167–176. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0015-z>
- Dissanayaka, S. H. (2022). *Use of Constructed Wetland Systems for Greywater Treatment : A Review.* June.
- Dixit, S., Yadav, A., Dwivedi, P. D., & Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: A review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 87, Issue C, pp. 39–49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.017>
- Ganie, A. S., Bano, S., Khan, N., Sultana, S., Rehman, Z., Rahman, M. M., Sabir, S., Coulon, F., & Khan, M. Z. (2021). Nanoremediation technologies for sustainable remediation of contaminated environments: Recent advances and challenges. In *Chemosphere* (Vol. 275). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130065>
- Grams Metz, L., Riehl, A., Mitteregger Júnior, H., & Medtler Seewald, M. (2015). *Method Development for Determination of Odors as an Indicator of Environment Condition in Tanneries Surroundings.*
- Guyer, J. P. (2011). *Introduction to Primary Wastewater Treatment Credit: 2 PDH.*
- Hansen, É., de Aquim, P. M., & Gutterres, M. (2021). Environmental assessment of water, chemicals and effluents in leather post-tanning process: A review. In *Environmental Impact Assessment Review* (Vol. 89). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106597>

- Herrera, S., & Rodriguez, L. (2011). Evaluación de la eficiencia de un humedal artificial con Phragmites para el tratamiento de aguas residuales de la empresa colombo italiana de curtidos LTDA. *Universidad Industrial de Santander*.
- Huber, D. L. (2005). Synthesis, properties, and applications of iron nanoparticles. *Small*, 1(5), 482–501. <https://doi.org/10.1002/sml.200500006>
- Islam, B. I., Musa, A. E., Ibrahim, E. H., Sharafa, S. A. A., & Elfaki, B. M. (2014). Evaluation and Characterization of Tannery Wastewater. In *JOURNAL OF FOREST PRODUCTS & INDUSTRIES* (Vol. 3, Issue 3).
- Jallouli, S., Wali, A., Buonerba, A., Zarra, T., Belgiorno, V., Naddeo, V., & Ksibi, M. (2020). Efficient and sustainable treatment of tannery wastewater by a sequential electrocoagulation-UV photolytic process. *Journal of Water Process Engineering*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101642>
- Ken, D. S., & Sinha, A. (2020). Recent developments in surface modification of nano zero-valent iron (nZVI): Remediation, toxicity and environmental impacts. In *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* (Vol. 14). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100344>
- Korpe, S., & Rao, P. V. (2021). Application of advanced oxidation processes and cavitation techniques for treatment of tannery wastewater - A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), 105234. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105234>
- Kotsuchibashi, Y., Nakagawa, Y., & Ebara, M. (2016). Nanoparticles. *Biomaterials Nanoarchitectonics*, 5(June), 7–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37127-8.00002-9>
- Krithika Shree, S., Namasivayam, S. K. R., & Pandian, A. (2023). Sustainable developmental measures for the treatment of pharmaceutical industry effluent using nano zero valent iron technology (nZVI) – A review. *Journal of Water Process Engineering*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104390>
- Li, S., Li, L., & Zhang, W. (2023). Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI) for Heavy Metal Wastewater Treatment: A Perspective. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.08.012>

- Litter, M. I., & Slodowicz, M. (2017). An overview on heterogeneous Fenton and photoFenton reactions using zerovalent iron materials. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 20(1). <https://doi.org/10.1515/jaots-2016-0164>
- Mejía, D. (2018). *Sostenibilidad Empresarial de las curtiembres de Villapinzón y su relación con la Gestión del Recurso Hídrico* [Universidad Nacional]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68841/Trabajo%20Final%20de%20Maestría%20Diego%20Fernando%20Mejía%20Vera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Moreno, L. B. (2015). *De la informalidad a los grados de cumplimiento normativo en las curtiembres de Villapinzón y Chocontá. Análisis de la interacción entre actores gubernamentales y unidades productivas.*
- Mpofu, A. B., Oyekola, O. O., & Welz, P. J. (2021). Anaerobic treatment of tannery wastewater in the context of a circular bioeconomy for developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126490. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126490>
- Mucha, Z., Wójcik, W., Józwiakowski, K., & Gajewska, M. (2018). Long-term operation of Kickuth-type constructed wetland applied to municipal wastewater treatment in temperate climate. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 39(9), 1133–1143. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1323014>
- Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., & Kumar, R. (2021). A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 21(xxxx), 101261. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101261>
- Quintili, M. (2012). Nanociencia y Nanotecnología... un mundo pequeño. *Cuadernos Del Centro de Estudios de Diseño y Comunicación*, 42, 125–155. <https://doi.org/10.18682/cdc.v42i42.1430>
- Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1995). *Natural systems for waste management and treatment* (Second edi).
- Saxena, G., & Bharagava, R. (2020). Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety. In *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7>
- Saxena, G., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2017). Environmental pollution, toxicity profile and treatment approaches for tannery wastewater and its chemical pollutants. In *Reviews of*

Environmental Contamination and Toxicology (Vol. 240). Springer New York LLC.
https://doi.org/10.1007/398_2015_5009

Secretaría Distrital de Ambiente. (2018). *Guía de producción más limpia para el sector curtiembres de Bogotá Enfoque en vertimientos y residuos*. https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/11/GuiaProduccionMasLimpiaSectorCurtiembresBogota.pdf

Sperling, M. von. (2007). *Wastewater characteristics, treatment and disposal*. IWA Publishing.

Tellez, K., & Barrera, A. (2023). *Del matadero al plato, así está el debate de la carne en Bogotá*.

Titchou, F. E., Zazou, H., Afanga, H., El Gaayda, J., Ait Akbour, R., Nidheesh, P. V., & Hamdani, M. (2021). Removal of organic pollutants from wastewater by advanced oxidation processes and its combination with membrane processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 169(September), 108631.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108631>

Vorontsov, A. V. (2019). Advancing Fenton and photo-Fenton water treatment through the catalyst design. *Journal of Hazardous Materials*, 103–112.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.033>

Vymazal, J. (2011). *Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow : a review*. 133–156.
<https://doi.org/10.1007/s10750-011-0738-9>

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J., & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.068>

Wu, S., Wallace, S., Brix, H., Kusch, P., Kirui, W. K., Masi, F., & Dong, R. (2015). Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. In *Environmental Pollution* (Vol. 201, pp. 107–120). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.03.006>

- Xu, Q., & Cui, L. (2019). Removal of COD from synthetic wastewater in vertical flow constructed wetland. *Water Environment Research*, 91(12), 1661–1668. <https://doi.org/10.1002/wer.1168>
- Yin, Y., Lv, R., Zhang, W., Lu, J., Ren, Y., Li, X., Lv, L., Hua, M., & Pan, B. (2021). Exploring mechanisms of different active species formation in heterogeneous Fenton systems by regulating iron chemical environment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 295(May), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2021.120282>
- Younas, F., Niazi, N. K., Bibi, I., Afzal, M., Hussain, K., Shahid, M., Aslam, Z., Bashir, S., Hussain, M. M., & Bundschuh, J. (2022). Constructed wetlands as a sustainable technology for wastewater treatment with emphasis on chromium-rich tannery wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 422. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126926>
- Zeng, L., Tao, R., Tam, N. F. yee, Huang, W., Zhang, L., Man, Y., Xu, X., Dai, Y., & Yang, Y. (2020). Differences in bacterial N, P, and COD removal in pilot-scale constructed wetlands with varying flow types. *Bioresource Technology*, 318(September), 124061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124061>
- Zhao, C., & Chen, W. (2019). A review for tannery wastewater treatment: some thoughts under stricter discharge requirements. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 26102–26111. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05699-6>
- Zhao, J., Wu, Q., Tang, Y., Zhou, J., & Guo, H. (2022). Tannery wastewater treatment: conventional and promising processes, an updated 20-year review. *Journal of Leather Science and Engineering*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s42825-022-00082-7>
- Ziembowicz, S., & Kida, M. (2022). Limitations and future directions of application of the Fenton-like process in micropollutants degradation in water and wastewater treatment: A critical review. *Chemosphere*, 296(January). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134041>

ANEXO 1. MANUAL DE ELEMENTOS MECANICOS DE LA PLANTA PILOTO

Componentes mecánicos, materiales y principios
de funcionamiento



UNIVERSIDAD
CENTRAL

Vigilada Mineducación



Gobernación de Cundinamarca

2024



COLOMBIA
POTENCIA DE LA
VIDA



Ciencias

Manual elementos mecánicos planta- proyecto Regalías 441

Introducción:

Este documento ofrece una revisión detallada de los componentes mecánicos presentes en la planta, abordando sus materiales, principios de funcionamiento y proporcionando información relevante sobre la capacidad, desplazamiento y procedimientos de mantenimiento del equipo. A lo largo de estas páginas, exploraremos en profundidad la estructura y el rendimiento de estos elementos, contribuyendo así a una comprensión exhaustiva de la maquinaria que impulsa el funcionamiento eficiente de la instalación.

La geometría general de la planta se puede describir a partir de la siguiente imagen:

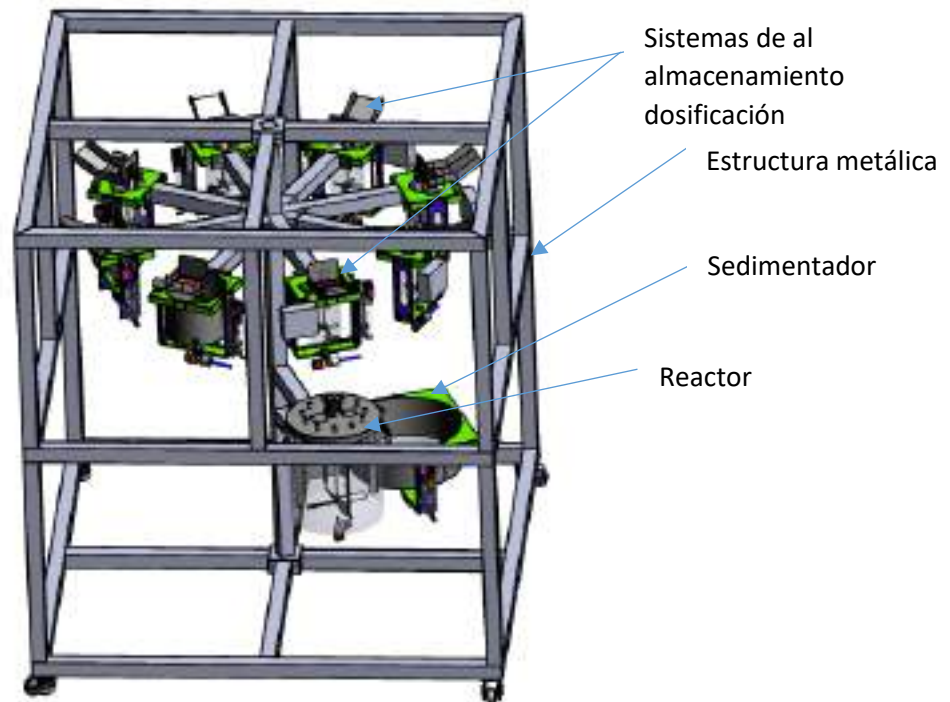


Imagen 1. Ensamble general del sistema mecánico.

El equipo cuenta con 8 ensambles de almacenamiento y dosificación, algunos con proceso automático y otros manuales, a su vez cuenta con un reactor, el cual recibe fluidos de todos los ensambles ubicados en la parte superior, una de las salidas del reactor se conecta con el sedimentador, el cual a su vez puede realizar retroalimentación de fluido al reactor. Cada uno de los sub ensambles citados se conectan con tornillos a la estructura principal formando un solo conjunto (imagen 1).

A continuación, se describe los componentes típicos de un ensamble de almacenamiento y dosificación, posterior se muestran las partes, funcionamiento y posibles verificaciones de mantenimiento.

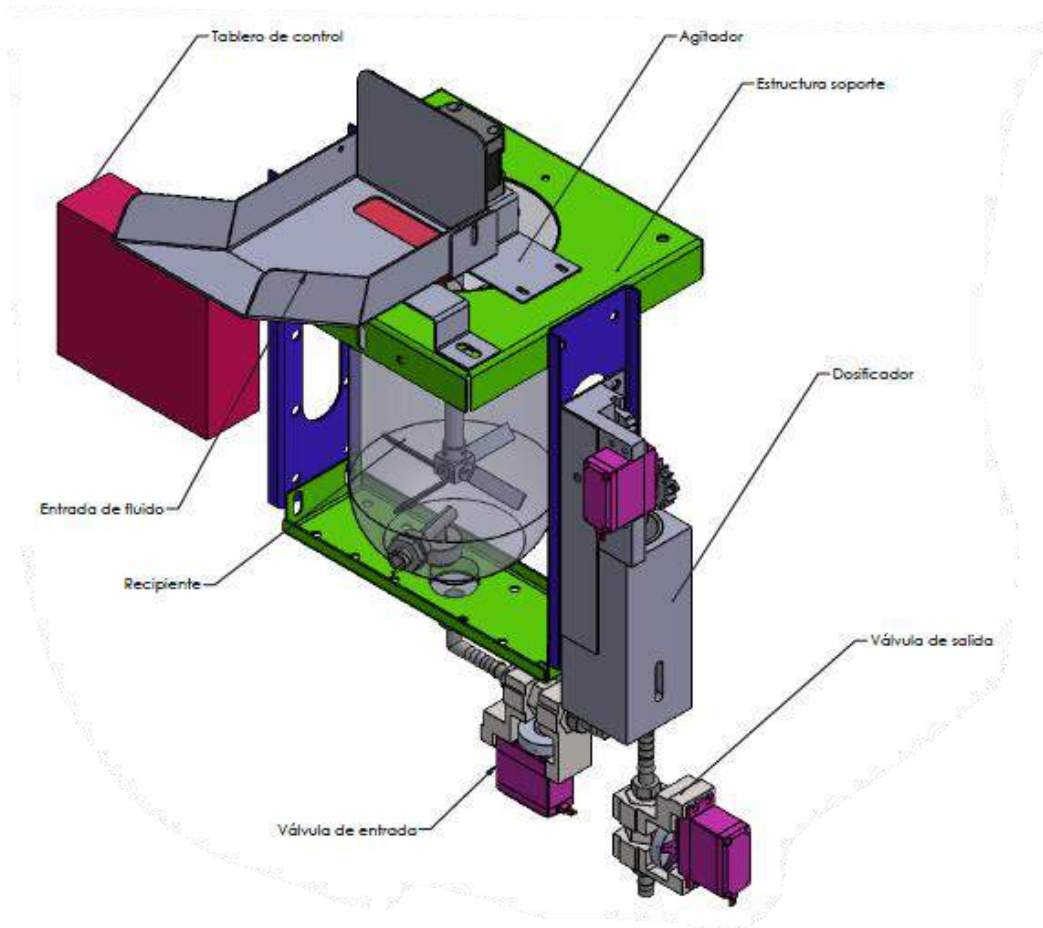


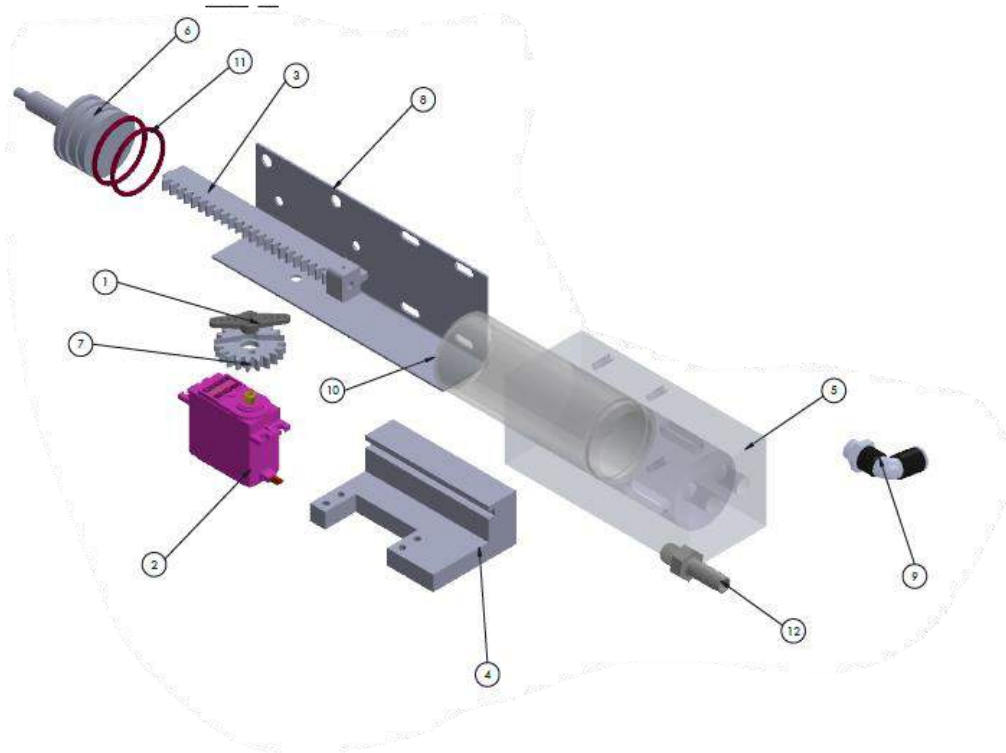
Imagen 1.1 Sub ensamble sistema de almacenamiento y dosificación.

En la imagen 1.1 se observa las partes principales que constituyen el sistema de almacenamiento, en el ensamble se pueden observar algunas modificaciones relacionadas con la cantidad de válvulas de entrada y salida o la utilización de dosificador según sea el fluido almacenado; sin embargo, se ensambla de sobre una estructura modular a la cual se le agrega un recipiente, un sistema de entrada de fluido, un tablero de control (ver detalle en apartado control eléctrico), un dosificador con sus respectivas válvulas de acople. A continuación, se describe por separado cada componente:

Dosificador:

Los sistemas de dosificación están compuestos por elementos de restricción de paso de fluido, y de acumulación del mismo, accionados por un servomotor que transforma el movimiento circular a rectilíneo a través de un sistema piñón cremallera, los cuales al realizar el movimiento llena una

recámara y por medio de unas válvulas re direcciona el fluido. El funcionamiento general del sistema consiste en mover un vástago (ítem 7) el cual permite la entrada del agua (Ítem 6), el recorrido final del vástago está limitado por la geometría de la cremallera (Item 3) y la rotación máxima programa en el servomotor (ítem 2). Las partes del ensamble se muestran en la imagen 2:



N ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	MATERIAL /REF
1	SOPORTE DE FIJACIÓN EJE SERVO	ABS
2	SERVOMOTOR MG996R	MG996 270 GRADOS
3	CREMALLERA M1.5	ABS
4	SOPORTE SERVOMOTOR	NYLON 6.6
5	CAMISA CILINDRO	NYLON 6.6
6	CODO NYLON 90 DRADOS 1_8	NYLON 6.6
7	VASTAGO CILINDRO	ACERO INOX 304
8	PIÑÓN 1,5 M X 20 DIENTES	ABS
9	L SOPORTE	INOX 304
10	CILINDRO ACRILICO	ACRILICO
11	ORING EPDM	EPDM 28 mm x 2,5 mm
12	ACOPLE RECTO 1_8	NYLON 6.6

Imagen 2. Mecanismo de dosificación.

El ensamble de los componentes se realiza por medio de tornillos de sujeción entre la lámina soporte L, el soporte motor y la camisa del cilindro. Estos agujeros están ubicados de tal manera que se

garantice la alineación entre piezas y el desplazamiento del vástago. La identificación de las zonas de conexión, ingreso y salida de fluido se muestra en la imagen 3.

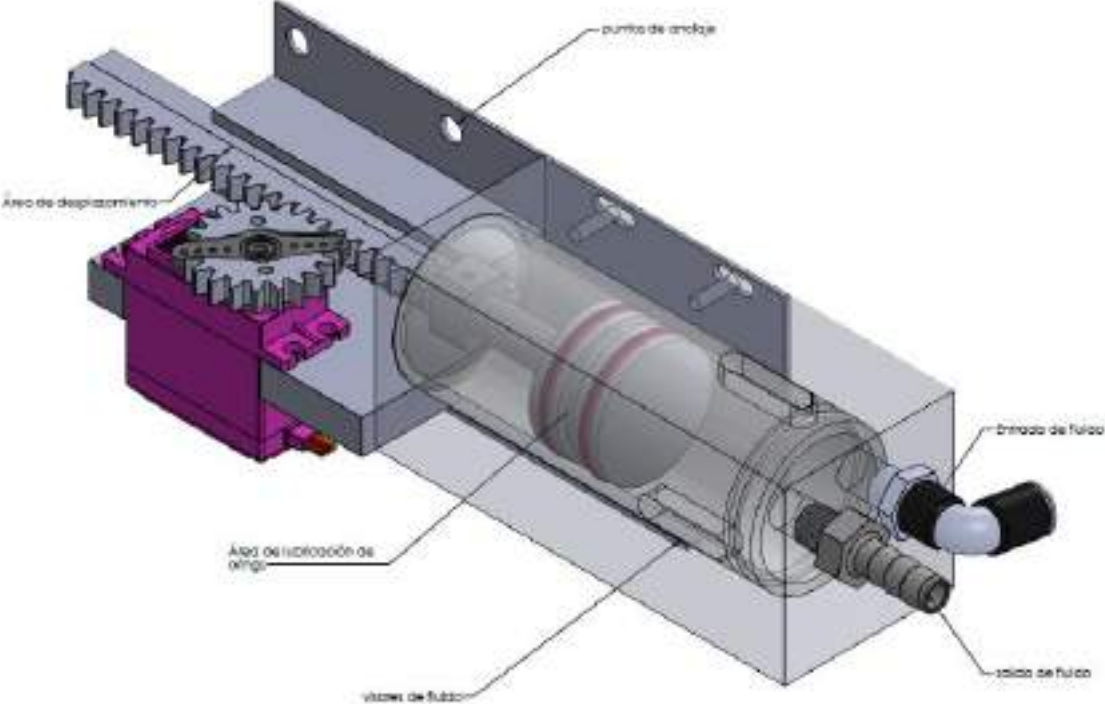


Imagen 3. Zonas de verificación del ensamble.

El ensamble fue diseñado para permitir que el usuario pueda validar que esté ingresando fluido, en la parte inferior cuenta con dos visores ubicados cada 90 grados, en ellos podrán determinar si está ingresando fluido y si está tiene o no burbujas que puedan modificar la medición. A su vez, el visor se podrá establecer si el ensamble del vástago y los orings tienen lubricación, esta verificación solo requiere que el usuario valide con los movimientos que realiza el vástago si existe presencia de grasa en medio de los dos orings, como se muestra a continuación:

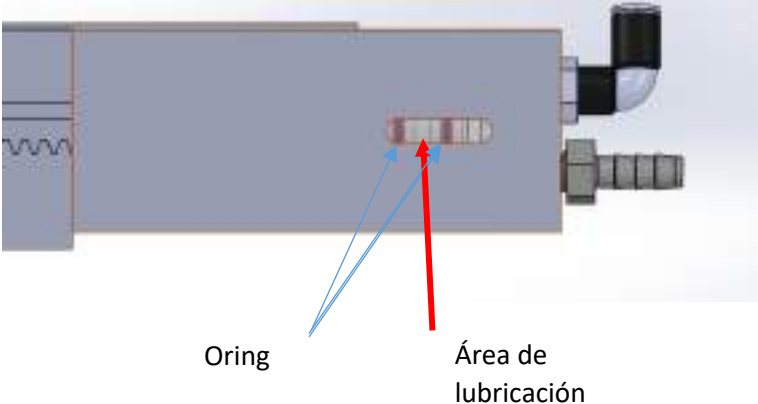


Imagen 4. Zona de inspección lubricación.

Todos los sistemas de dosificación cuentan con dichos visores, el área dispuesta para la lubricación cuenta con 1 gramo de lubricante de referencia *grasa skf lghp 2*. De ser necesario agregar nuevo lubricante o se observa presencia de contaminantes en dicha zona, solo se requiere remover los dos tornillos que unen la camisa cilindro (ítem 5 imagen 2) y el soporte L (ítem 8 imagen 2), posterior halar en dirección del vástago.

Nota. Recuerden que cualquier cambio se debe hacer retirando el fluido eléctrico de toda la planta.

Válvulas de entrada y salida

Cada uno de los ensambles servo controlados de dosificación está unido a dos servoválvulas de bola que limitan el paso a la entrada y salida como se muestra en la imagen 5:

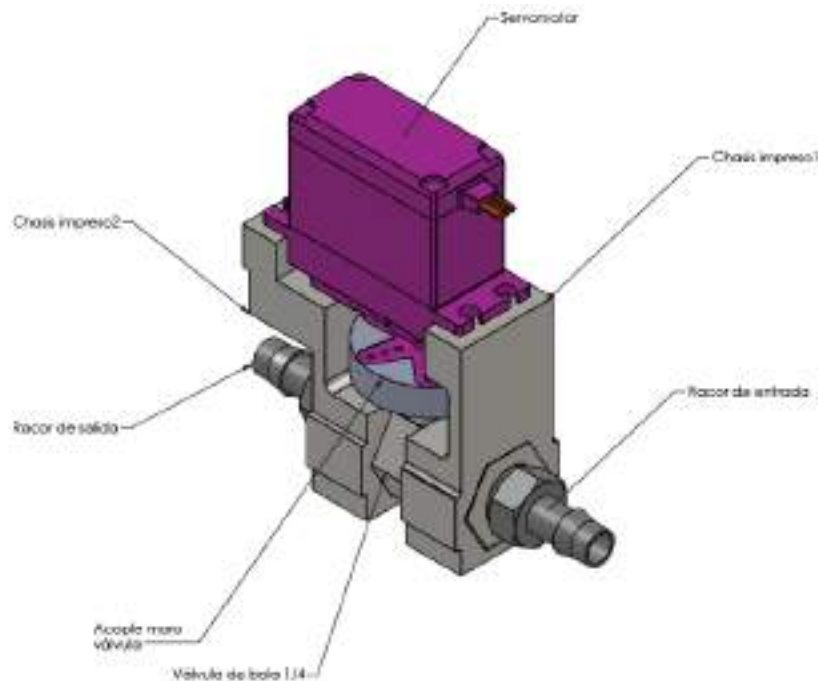


Imagen 5. Válvulas de apertura y cierre.

La válvula motorizada está diseñada con una válvula de bola con entradas hembra de ¼ NPT, en las cuales se acoplan racores plásticos para manguera de 8mm, el motor que acciona la válvula está sujeto con un chasis en material ABS y sujetado en la parte superior con dos tornillos m3 x 10mm de longitud.

Agitadores:

Algunos ensambles de dosificación requieren de un sistema que mantenga una homogenización del fluido, para tal propósito, se agrega un motor con un eje principal en acero inoxidable y dos soportes para aspas que pueden regular la altura y el ángulo de inclinación de las mismas, como se muestra a continuación:

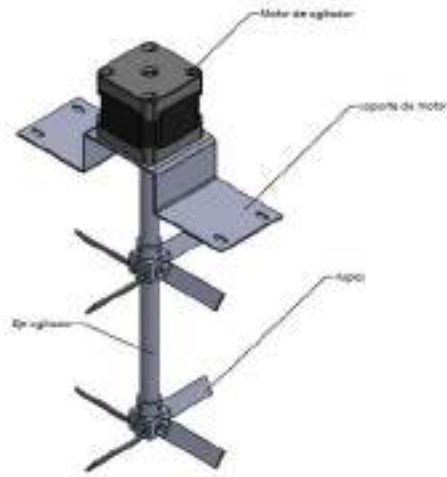


Imagen 6 Agitador genérico

Estructura de soporte.

Todos los ensambles de dosificación están montados sobre estructuras modulares, fabricadas en láminas dobladas de acero inoxidable que se aseguran con tornillos para formar una cubierta del recipiente y un soporte para la entrada del fluido, como se muestra en la imagen 7:

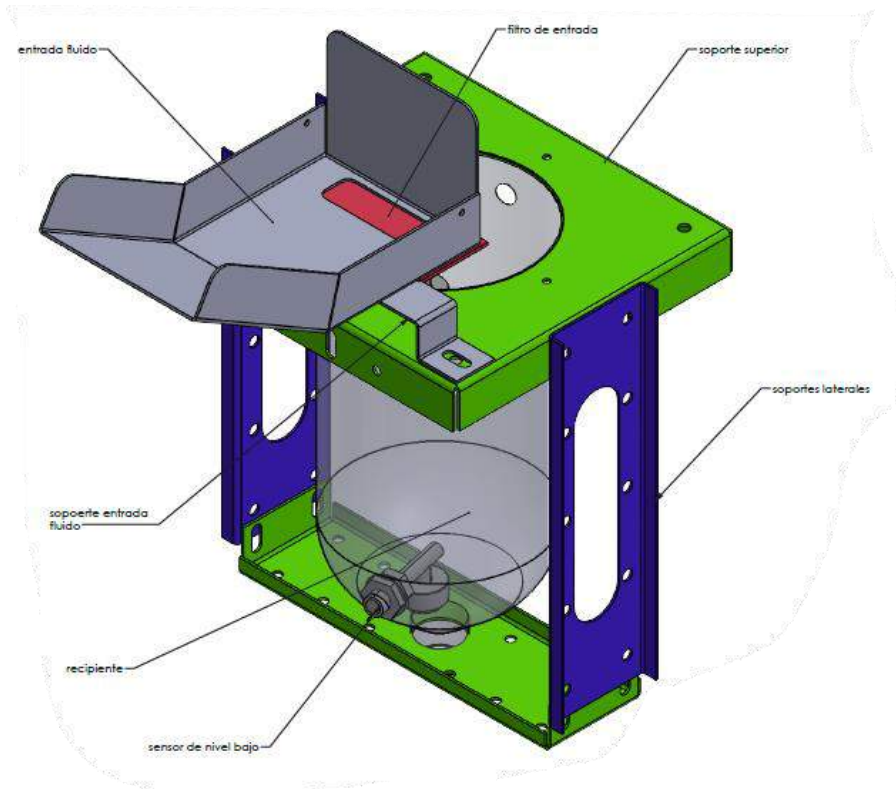


Imagen 7 ensamble soporte botella.

La estructura tiene varias funciones dentro de la planta, entre ellas soportar la entrada del fluido, en la cual el operador puede dejar deslizar el fluido y lo obligará a pasar por un filtro que está en la parte inferior. Este elemento es reemplazable según el porcentaje de partículas y viscosidad del mismo. Luego de esto se almacena en un recipiente de PET, que tiene sensores que validan el nivel mínimo y máximo del mismo y que son condiciones de retroalimentación al control del sistema.

La estructura puede ser modificada en altura, puesto que cuenta con agujeros y sistemas de correderas dispuestas para sujetar recipientes de diferentes condiciones de volumen. Con recipientes que cuentan con diámetros mayores o menores es reemplazado el soporte superior.

Reactor:

El recipiente construido en acero inoxidable 304, tiene como función principal la homogenización de los fluidos que ingresan en la parte superior provenientes de los sistemas de dosificación, para esta función cuenta con un agitador interno y unas placas deflectoras. El proceso permite hacer una recirculación del fluido, tomándolo desde la parte inferior e impulsándolo con una bomba de tipo centrifuga, como se muestra a continuación:

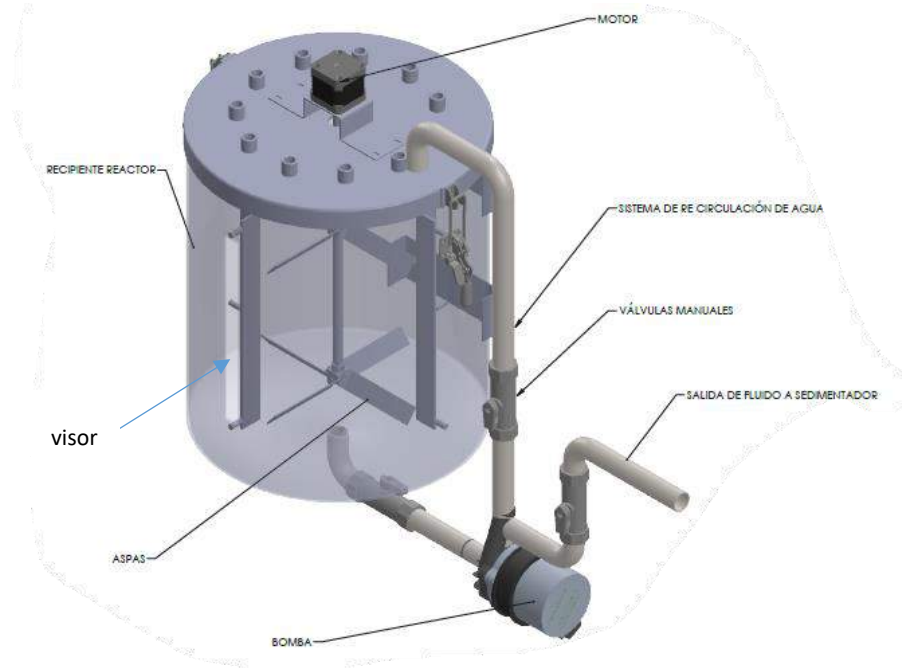


Imagen 8. Sistema general del reactor.

El sistema de reactor cuenta con un visor en la parte frontal, que permite observar el volumen interno del mismo, de ser necesario validar internamente el sistema, se puede remover los seguros laterales tipo clamp y levantar la tapa por completo.

Nota: previo a este proceso se debe desconectar el fluido eléctrico de toda la plata, adicional a esto deben mantener alineadas la tapa y el cuerpo del reactor para evitar daños de las aspás internas por colisiones con los deflectores internos.

La geometría interna del equipo y las relaciones entre componentes se pueden observar en la imagen 9

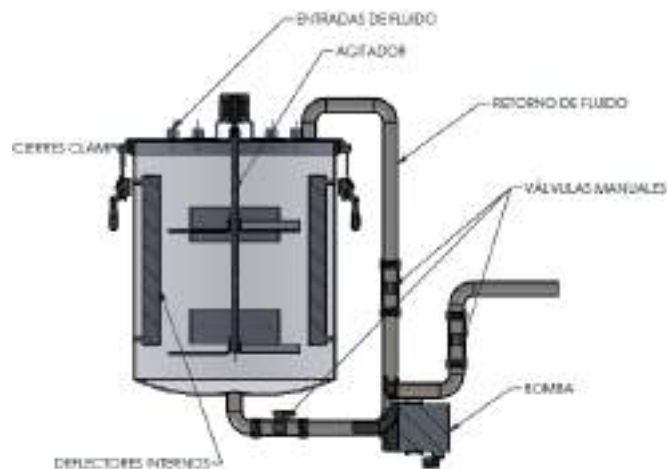


Imagen 9. Partes del reactor

ANEXO 2.MANUAL DEL SISTEMA ELECTRICO Y ELECTRONICO

Funcionamiento, mantenimiento y características principales



UNIVERSIDAD
CENTRAL

Vigilada Mineducación



Gobernación de Cundinamarca

2024



COLOMBIA
POTENCIA DE LA
VIDA



Ciencias

CONTENIDO

- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. OBJETIVO DEL MANUAL**
- 3. RECOMENDACIÓN INICIAL**
- 4. SISTEMA ELÉCTRICO**
 - a. ESQUEMA ELÉCTRICO**
 - b. CAJA DE PASO**
 - c. ALIMENTACIÓN**
 - d. FUENTE, MOTOR Y DRIVER**
 - e. MOTOBOMBA**
 - f. CABLEADO**
- 5. SISTEMA ELECTRÓNICO**
 - a. PCB 3D.**
 - b. DIAGRAMA DE BLOQUES**
 - c. ALIMENTACIÓN / REGULADORES / CONVERTIDORES DC – DC**
 - d. SEÑALES DE CONTROL Y LECTURAS / SENSORES**
 - e. SENSORES**
 - f. MOTORES DC Y SERVO MOTOR**
 - g. TEMPORIZADOR MOTOBOMBA**
 - h. VISUALIZACIÓN**
- 6. EJECUCIÓN DE LA PLANTA**
 - a. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO**
 - b. DESCRIPCIÓN**

1. BIENVENIDO AL MANUAL DE ESPECIFICACIONES, OPERACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA.

Queremos expresar nuestro agradecimiento por elegir la planta para realizar el procedimiento de tratado de agua. Este manual ha sido diseñado para proporcionarle información detallada y clara sobre el funcionamiento, mantenimiento y características principales que debe tener en cuenta.

2. OBJETIVO DEL MANUAL

Este documento tiene como finalidad: Exponer, clarificar y adentrar como opera la planta desde una perspectiva sencilla y práctica, enfocada a partir de su electrificación hasta la operación de la misma. En términos de lo anterior, se emplea una segmentación en tres (3) ejes de aplicación que corresponden al ámbito de lo eléctrico, electrónico y como operarla pues abarca el control de todo el sistema por parte del usuario.

En ese énfasis, se otorga la mayor cantidad de conceptos que faciliten la comprensión de muchos aspectos que se puedan presentar al momento de su operación en campo, posibles fallas, consejos de validación y diagnóstico.

3. RECOMENDACIÓN INICIAL

Para garantizar el desarrollo correcto de las actividades en la planta por parte del operativo o grupo de estos, se recomienda leer atentamente este documento antes de iniciar alguna actividad, con el fin de prevenir cualquier percance, dado que el fallo que se genere es posible que no pueda ser reparado de forma inmediata.

Se remarca que el contenido de esta información aquí presente, no constituye nada del ensamble o desarrollo mecánico del mismo, por lo tanto, consultar el documento que tiene dicha finalidad.

Las fallas son un aspecto que pueden surgir, en ese contexto, el manual realiza muchas sugerencias, pero es muy difícil abarcarlas todas, por lo tanto, ande con discreción. Si no se puede gestionar de forma autónoma (responsabilidad y riesgos propios) contacte al personal correspondiente, el manual no es la verdad absoluta.

4. SISTEMA ELECTRICO

a) DIAGRAMA ELECTRICO

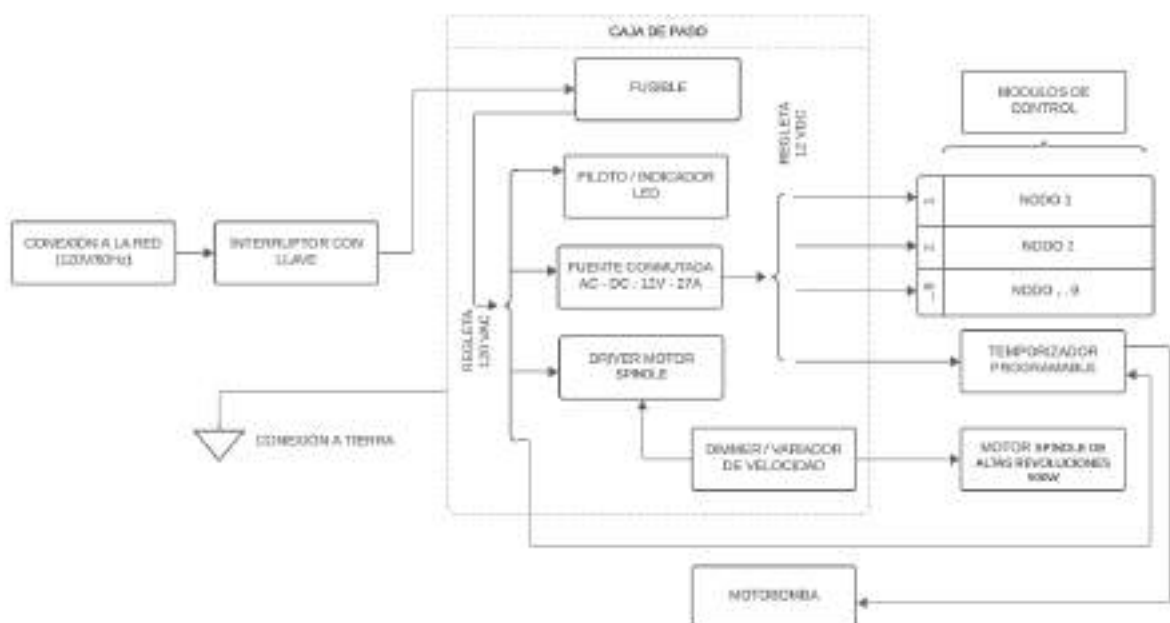


Ilustración 1. Diagrama de bloques del sistema eléctrico.

b) CAJA DE PASO

También conocida como caja de derivación, contiene todos los componentes y conexiones para el funcionamiento de la planta:

- Fusible a una corriente límite, en caso de algún percance (accesible por el costado de la caja).
- Regletas de conexión (120Vac) y 12Vdc.
- Fuente conmutada AC – DC (SMPS) (12V/27A)
- Driver para el Motor SPINDLE: <https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/spindle-o-husillo-12000-rpm-110vdc-er11-500w-soporte-reacondicionado-detail.html>.

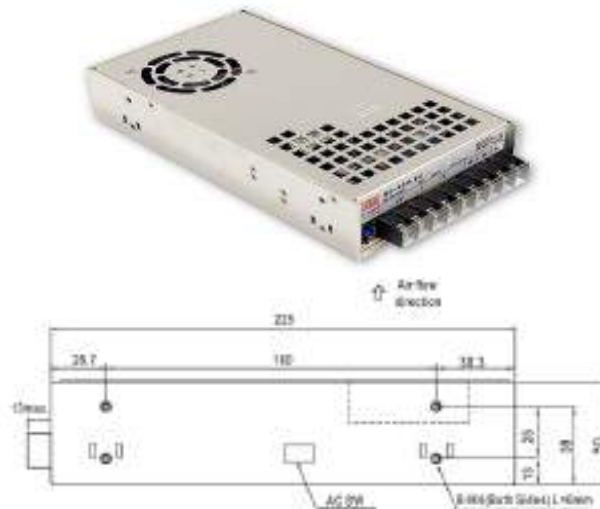


Ilustración 2. Fuente conmutada A) Visualización completa, B) Toma lateral, tomada de Mean Well.

- Conexión de tierra a toda la estructura.
- Cableado a cada nodo de la planta.
- Regulador de Velocidad del Motor.
- Indicador de alimentación.

Todo el cableado que pasa por la caja, se deriva en corazas (tipo de tubería plástica flexible) de 5/8" de diámetro a cada nodo.

Se sugiere:

- Desconectar la planta cada vez que se acceda a la caja, dado que es el núcleo que energiza el sistema y un uso indebido puede estar en contra de la funcionalidad.
- Cada conexión anexada al modelo preliminar debe ser corroborada previamente a su puesta en marcha, recuerde que hay un fusible que limita el consumo. Adicionalmente, realice una gestión de cables acorde al volumen disponible dado al poco espacio presente.
- Por ninguna circunstancia, exponer el contenido de la caja de paso a líquidos/gases que produzcan una reacción química (fuego, arco fotovoltáico, etc.) que afecte la integridad del sistema y el operario. De ser posible recubrir este con algún tipo de plástico.
- Validar que la fuente SMPS y el driver del motor SPINDLE entregue los voltajes dentro del rango de trabajo.

c) ALIMENTACIÓN

La planta debe ser alimentada con una fase y neutro de una diferencia de potencial de 120Vac, se recomienda que el punto de conexión implementado tenga su terminal de tierra/earth correspondiente, tal como se muestra en la ilustración #3-B.



Ilustración 3. A) Medición sobre un tomacorriente, tomada de Endesa. B) Tomacorriente con conexión a tierra, tomada de Edelco.

Nota: En caso de que desee conectar a un punto de 220 Vac se debe realizar los siguientes cambios, consideraciones e inconvenientes:

- Cambiar el fusible.
- Abrir la caja de paso.
- Cambiar la fuente AC – DC (SMPS) y Driver del Motor de altas revoluciones a 220Vac. En la fuente está por uno de los costados, mire la ilustración de la fuente conmutada.
- La bomba en el tanque del reactor fallaría. Está diseñada a 120 Vac/60Hz, por lo que se debe cambiar.

Antes de conectar la planta se sugiere:

- Red estable.
- Inspeccionar si hay presencia de algo anormal (ejemplo: cable suelto).
- El interruptor del motor de altas revoluciones () esté apagado y/o su DIMMER se encuentre en su valor mínimo (se logra girándolo a la izquierda por completo).
- La motobomba se encuentre en su estado OFF por defecto o de lo contrario que tenga líquido el reactor.
- **Validar las recomendaciones también previas presentadas en la parte electrónica.**

Después de validar:

Nota: Hasta este punto, se recomienda que aún no inicie la planta, hasta terminar de leer todo el documento.

Si todo lo anterior está correcto se puede iniciar la planta, para testear (pero no se recomienda aún). Para ello, debe ingresar la llave en el interruptor y girarlo a la derecha (sentido de las manecillas del reloj), ese momento el piloto (indicador led) se iluminará y todos los módulos de control iniciaran.

Si hay alguna falla:

Desconectar y revisar atentamente hasta encontrar la posible falla, de ser así, validar en que sección se produjo y observa si encuentra algún consejo para reparar, tener presente que siempre es bueno que las modificaciones las haga una persona calificada.

Nota: En caso de pérdida de la llave, puede destapar su empaque y realizar un corto (unir la fase), tenga presente que en caso de emergencia ya no puede usar este mecanismo para apagar la planta de forma inmediata, debe recurrir a desconectar, si es que el fusible no operó en primera instancia.

d) FUENTE, MOTOR Y DRIVER

Considere:

- Ya se mencionó, pero si no se está empleando el motor SPINDLE mantener este apagado a revoluciones mínimas.

- Limpiar adecuadamente el motor, entre más riguroso mejor, dado que este en particular se encuentra en el depósito de las nanopartículas y su precio en el mercado es considerable.
- En caso de que el motor no se mueva, reinicie la planta. Pues el driver se protege y no permite arrancar debidamente la agitación.
- **No modificar el dimmer que se encuentra en la fuente SMPS dado que varía la tensión y puede comprometer toda la parte electrónica.**

e) MOTOBOMBA

Considere:

- No mantener la motobomba durante tiempos muy prolongados para alargar la vida útil del componente.
- Hacer circular agua cuando se deje de operar, para que las nanopartículas o cualquier otro sólido o líquido la afecte.
- Los ciclos de trabajo se pueden ajustar con el driver/temporizador mencionado más adelante.

f) CABLEADO

Nodos: Los cables empleados para cada nodo son de calibre 18". Que permite un paso de corriente máxima de 6 A. Cada nodo se alimenta con 12V y ninguno supera 1 A en funcionamiento completo.

En ese consumo está integrado:

- La pantalla gráfica.
- El motor de agitación DC (No todos los nodos tienen).
- Tres servos motores (empleados para la dosificación e inyección, funciona uno a la vez generalmente).
- Electroválvula.


$$CxN = Corriente (Sobredimensionada) \times \#Nodos = 7A$$

Todos los nodos en conjunto no suman más del 26% de la SMPS. Eso sería el caso más crítico, que son todos funcionando al tiempo, que es casi improbable que suceda.

Motor SPINDLE: Al igual que los nodos, se implementó el mismo calibre de cable. El motor consume 500W (Pmax) a un voltaje de 110VDC, por lo tanto, la corriente máxima es de 4.5A.

Motobomba: La potencia es de 50W (Pmax), eso se traduce a próximamente 0.5A de corriente real, por lo que, el calibre del cable es el mismo.

Tabla 1. Características de cable tomado de CENTELSA.



Tipo	1. Conductor		2. Espesor Aislamiento	Resistencia DC a 20°C	Diámetro Exterior	Peso Total Aproximado	Capacidad de Corriente (A)
	Calibre	Diámetro					
	AWG	mm					
TYP	18	1.21	0.78	26.4	3.21	15	6
TYP	16	1.54	0.78	13.5	3.14	20	6
TWK	14	1.98	0.78	6.4	3.18	20	10
TWK	12	2.49	0.78	3.3	4.06	42	20
TWK	10	3.10	0.78	1.9	4.73	62	26
TWK	8	3.92	1.14	1.1	6.36	101	40
TWK	6	5.00	1.62	1.3	8.88	166	66

Alimentación de la planta: Toda la energía de la planta ingresa por un cable encauchetado calibre 14, se seleccionó en función del consumo de las funcionalidades: Dosificación, agitación (baja y alta velocidad), recirculación/desagüe (motobomba), entre otras.

Sin considerar pérdidas, el cálculo es:

$$P_{INP} = P_{OUT}$$

$$V_{INP}I_{INP} = V_{OUT}I_{OUT}$$

$$V_{INP}I_{INP} = 12V \cdot 7A + 50W + 500W ; V_{in} = 120V (RMS)$$

$$I_{INP} = \frac{12V \cdot 7A + 50W + 500W}{120V} = 5.3 A$$

Por lo que, el calibre empleado es suficiente, de acuerdo con la información de la tabla 2.

Nota: Recordar que el cálculo no considera otros aspectos, pues salen del alcance de este documento, por lo que debe ser tomado simplemente como una referencia.

Tabla 2. Características de cable encauchetado, tomado de CENTELSA.

1. Conductor		Número de Conductores	Diámetro del Núcleo	Diámetro Exterior	Peso Total Aproximado	Resistencia DC a 20°C	Capacidad de Corriente (A)	
Calibre	Diámetro						(')	(")
AWG	mm	No	mm	mm	kg/km	Ohm/Km		
18	1,17	2	2,34	6,66	62	21,42	10	7
		3	2,52	7,06	74			
		4	2,82	7,71	90			
16	1,40	2	2,80	7,25	79	13,46	13	10
		3	3,19	7,72	96			
		4	3,57	8,45	117			
14	1,89	2	3,78	8,10	106	8,44	25	20
		3	4,07	8,80	130			
		4	4,58	9,45	160			
12	2,38	2	4,76	9,08	142	6,31	30	24
		3	5,13	9,95	179			
		4	5,75	11,41	241			
10	2,99	2	5,98	10,30	197	3,34	40	32
		3	6,44	11,75	271			
		4	7,22	12,88	336			
8	3,75	2	7,50	14,90	372	2,10	55	44
		3	8,08	15,81	482			
		4	9,05	18,35	612			
6	4,75	2	9,50	18,44	576	1,32	75	60
		3	10,24	18,55	717			
		4	11,47	21,39	888			

Caja de paso: Gran parte del cableado interno de la planta se realizó con cable calibre 18", 16" o 14", dado a lo explicado anteriormente, no es necesario un conductor que soporte mayor flujo de corriente, pues las dimensiones y requerimientos de la planta no lo demandan.

Nota Importante: En caso de realizar algún cambio en el cableado del sistema, tener presente lo discutido, en cuanto a flujo de corriente que soportan los conductores.

5. SISTEMA ELECTRONICO

a) PCB.

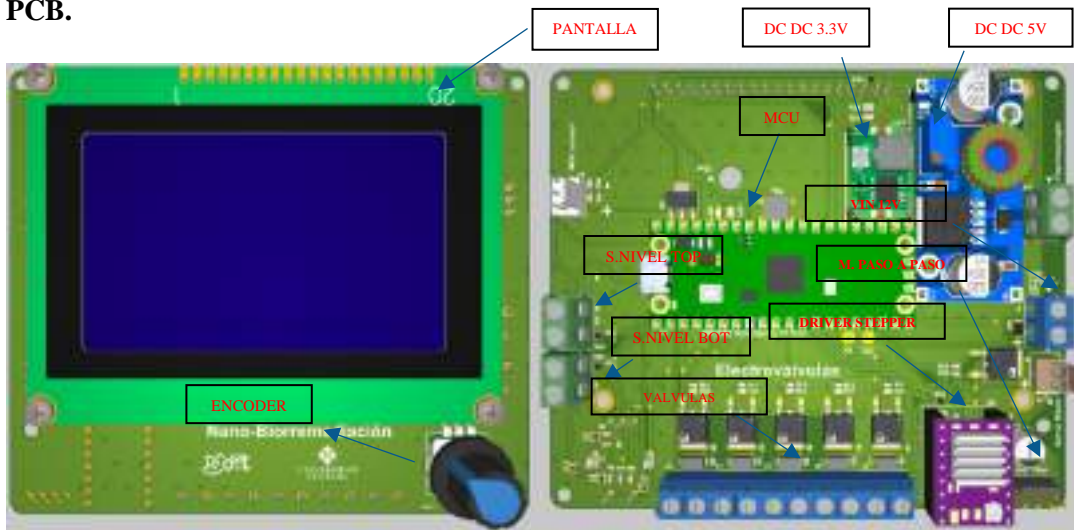


Ilustración 4. Visualización de la PCB del módulo de control. A) Frontal, B) Trasera.

La mayor parte de los componentes de esta etapa, se encuentra en una PCB de 2 capas, entre ellos vemos: Reguladores, conectores, transistores, el microcontrolador (MCU), una pantalla, un encoder rotativo (empleado para desplazarse por los menús), etc.

b) DIAGRAMA DE BLOQUES

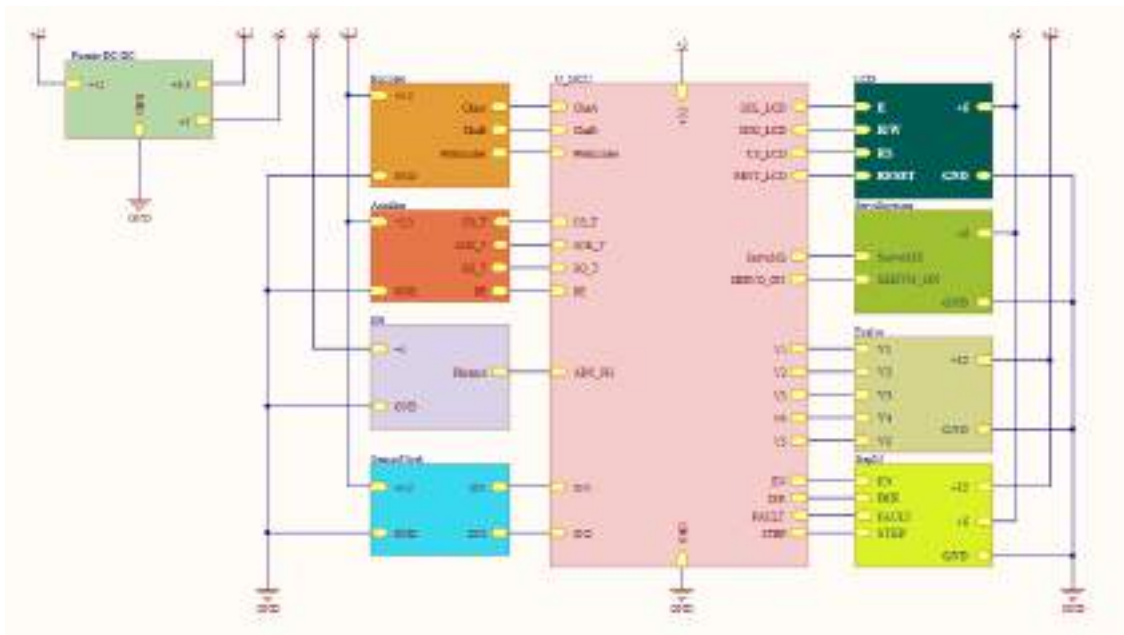


Ilustración 5. Diagrama de bloques del hardware del módulo de control.

En aspectos generales, la construcción del apartado electrónico está constituido por un sistema de 10 etapas o segmentos que realizan propósitos distintos para caracterizar de mejor forma la funcionalidad y tareas del prototipo.

- Fuente DC-DC: Genera una salida de 5V y 3.3V por un par de convertidores DC – DC.
- Encoder: Otorga las señales a medida que el usuario gira la perilla.
- Auxiliar: Emplea un módulo para realizar la lectura de temperatura por una termocupla tipo K.
- PH: Recibe los cambios de pH (leídos con un sensor), y realiza unos ajustes para enviarlo al MCU.
- Sensor Nivel: Realiza cambios lógicos, a medida del nivel de líquido en el tanque del nodo.
- U_MCU: Contiene el microcontrolador y todo lo indispensable para la generación y recepción de lecturas.
- LCD: Contiene principalmente es la pantalla gráfica y otros componentes adicionales.

- ServoInyector: Cuando el MCU genera una señal de control específica, emplea una apertura para iniciar el servo que se encarga de inyectar el líquido del nodo al reactor.
- Evalvule: Recepciona la señal del MCU y la amplifica para abrir la válvula encargada de limpiar el tanque.
- Stepper: Es conformado por un módulo enfocado a manipular los agitadores, su funcionamiento proviene de un conjunto de señales digitales.

Nota: Todas las tareas que se mencionan en la ejecución de la planta y lo mencionado anteriormente, se establecieron mediante un código en lenguaje C.

c) ALIMENTACIÓN / REGULADORES / CONVERTIDORES DC – DC

Validaciones previas a la alimentación:

- **Importante:** La mayoría de los conectores son iguales (según la ilustración 4) por lo tanto, valide siempre en primera instancia que el orden no se haya alterado.
- Verificar que los motores tengan sus cables conductores debidamente en sus terminales.
- Que no falte ningún actuador (motores, servos y encoder) o sensor (sensor de pH y temperatura). (Recuerde que no todos llevan motor, ni sensor de pH o termocupla) o componente visible (encoder o pantalla) y ni que estos mismos se encuentren desajustados.
- No haya presencia de un inyector o parte de mecánica de la planta que involucre un problema.

Validaciones post a la alimentación:

- **Importante:** Deben encender todas las pantallas del módulo e iniciar el ciclo de prueba, de las válvulas de inyección. De no ser así, valide todas las conexiones de los módulos.
- Ingresar a cada submenú del módulo manipulando el conector para ejecutar cada una de ellas (Mezclador, Inyector, Medición de pH y Limpiar Tanque).
 - Mezclador: Debe girar el motor del tanque (no aplica para todos).
 - Inyector: Inyectar un volumen para validar el movimiento del émbolo y las válvulas, si no se mueve pruebe mirar si está atascado.
 - Medición de pH: Utilizar una muestra (buffer) para mirar si el sensor de pH está calibrado, este se puede ajustar desde del módulo que tiene conectado el sensor.
 - Limpiar Tanque: Seleccionar la opción y abrir el paso del agua (**con poca presión**) para validar que ingresa agua al tanque.

Revisar conexiones en detalle para encontrar algún defecto que pueda ocasionar un problema si llega a suceder.

Si la pantalla no enciende puede considerarse lo siguiente:

El funcionamiento de la parte electrónica, contando también a los sensores y actuadores. Son gestionados por los reguladores conmutados de 5V y 3.3V con una corriente máxima de 3.5A y 3A respectivamente.

De presentarse algún fallo sobre estos, intentar lo siguiente:

- Validar si no nada anormal en el circuito impreso.
- Medir la tensión presente en la salida, según muestra la ilustración.
- Extraerlo del circuito impreso y realizar el paso anterior.
- Si es válido el 1ro y/o 3ro se debe contactar personal calificado.
- Si no es válido cambiar el módulo y realizar una nueva verificación.

Nota importante: En caso de integrar/cambiar cualquier componente (sensor, actuador, u otro) que necesite de los niveles de tensión de los reguladores, no exceder los límites de diseño de

los mismos, si se realiza sobre el circuito impreso hay un límite de dos (2) amperios. Es complicado gestionar todos los escenarios, por ende, se considera prudente validar antes de realizar cualquier cambio, ya sea en esta etapa o cualquiera de las otras nueve.

d) SEÑALES DE CONTROL Y LECTURAS / SENSORES

El MCU tiene que realizar rutinas de trabajo, cada una de ellas involucra leer un dato de un sensor y controlar algún actuador. Para ello, el microcontrolador emplea pines analógicos y digitales. Configurados de cierta manera específica o característica particular.

- Pin Análogo: Esto significa que puede medir y procesar señales variables dentro de un rango específico. Los pines analógicos son esenciales cuando se trabajan con sensores o dispositivos que proporcionan señales analógicas, como potenciómetros que se leen mediante su conversor análogo a digital (ADC). No solamente es una entrada también puede generar una señal de salida por medio de su (DAC) conversor digital a análogo.

Este tipo de pin, es empleado para leer el valor del sensor de pH, generar un PWM (Modulación por ancho de pulso) para los servo motores y leer las termocuplas tipo K.

- Pin Digital: Tiene como finalidad generar y leer estados discretos: alto (1) o bajo (0). Los pines digitales tienen demasiadas aplicaciones y son fundamentales con los componentes que funcionan en base a lógica binaria

Este tipo de pin es empleado para leer el estado del nivel del tanque (vacío o lleno), activar, activar la electroválvula, enviar los datos a la pantalla, leer estado del encoder y activar el módulo para los agitadores.

e) MOTORES DC Y SERVO MOTOR

La agitación de los líquidos se emplea de dos formas: por motores paso a paso o motorreductores, el hardware del circuito impreso permite las dos implementaciones. Sin considerar al que se implementa para las nanopartículas, hay 3 motores adicionales.

Los motorreductores son a 12V y 1A y los paso a paso son funciona con una cuadrada +12V, -12V y la corriente de funcionamiento lo limita el driver del mismo. Los servo motores en esta aplicación operan con una alimentación de 5V y una corriente no superior a los 300mA.

Considere que:

- La implementación con motor paso a paso implementa el driver Stepper, no modificar el limitante de corriente (observe la ilustración) de no ser necesario. (Puede ocasionar su daño).
- En el uso de motorreductor dejar en su defecto el toroide, para no inducir ruido al circuito impreso.
- Limpiar adecuadamente los motores regularmente para que los líquidos no lo deterioren.
- Si estos motores no se mueven, validar la tensión en los terminales de ellos y si los fusibles que tienen implementados no se abrieron.
- Si los fusibles se dañaron reemplazarlos por un valor igual o no muy superior al que viene por defecto.
- Los servomotores realizan un ciclo de movimiento recién enciende la planta, si este proceso no se realiza revisar las conexiones inferiores.

f) TEMPORIZADOR MOTOBOMBA

Para el funcionamiento de la motobomba, cuando sea requería en los procesos de desagüe del reactor, se emplea un temporizador programable (ilustración #6).

Se recomienda implementar la configuración dada por defecto, que es la operación durante 2min cada 15min y un lazo continuo de un número “x” de repeticiones. Esto es cuando se mantiene a la planta operando en cada momento, de lo contrario no es necesario. Si no simplemente activarlo hasta que se descargue por completo el reactor.



Ilustración 6. Temporizador programable.

g) VISUALIZACIÓN



Ilustración 7. Visualización del módulo de control. A) Menú Principal, B) Submenú 2 - Inyector.

6. EJECUCIÓN DE LA PLANTA

Antes de llegar a este punto, se espera que el operario o grupo destinado al manejo de la planta, allá leído detenidamente este manual y tenga presente todas las sugerencias que se han descrito a lo largo de este documento, pues se realizó con el fin de minimizar los inconvenientes que se puedan presentar al momento de la puesta en marcha. De ser afirmativa, la premisa anterior proceda lo siguiente.

b) Descripción

De acuerdo con lo anterior, el primer paso es alimentar la planta, posterior a ello se debe consultar todas y cada una de las validaciones o recomendaciones que se enunciaron en la parte preliminar de alimentación (eléctrica y electrónica). De ser valido, proceder a energizar todo el sistema por medio de la llave, si todo va correcto (validaciones post alimentación) con cada nodo operando de acuerdo con lo comentado en el eje descriptivo. Se puede emplear cada una de las tareas programadas que están disponibles en la pantalla.

- Mezclador o Agitador: Se enciende el motor del nodo predeterminado para mezclar la sustancia acorde al proceso, esto también involucra al nodo que trabaja las nanopartículas.
- Inyector: Opera las válvulas construidas a base de servomotores para succionar el volumen del tanque para inyectarla posteriormente al reactor.
- Medición de pH: Muestra la medida del pH, donde se tenga el sensor.
- Limpieza de tanque: Llena el tanque de agua, para posteriormente desocuparlo con la subrutina de Inyector.

Es posible realizar dos tareas de forma simultánea, éstas corresponden a accionar el mezclador/agitador y cualquiera de las otras tareas. Aunque principalmente es con la inyección que se utiliza.

La inyección es una tarea que toma determinado tiempo por el volumen a inyectar, con el fin de seguir el progreso de este, en la pantalla podrá observar el estado actual y el restante. La tarea que lleva más tiempo es la homogenización o realización del proceso fenton durante la mezcla del reactor ya que puede tardar varias horas, por lo que se recomienda mantener un registro de la temperatura del motor correspondiente. En un escenario controlado la motobomba no realizada trabajo continuo por lagos periodos de tiempo.

Siempre que se finalice cada prueba, llenar cada tanque de los nodos con agua e inyectarlos al reactor, realizar una mezcla durante unos minutos, posteriormente hacerlo circular al sedimentador, mediante la motobomba. Con el fin de realizar un ciclo completo de limpieza, por último, no olvidar apagar la planta si no se encuentra operativa, para lo generar un consumo que a pesar de no ser elevado se hace innecesario.

No olvidar anotar los resultados obtenidos con cada prueba.