

# Diseño, construcción y pruebas de un prototipo de laboratorio para preparar nanopartículas de hierro elemental

<sup>1</sup>Carlos García, <sup>1</sup>Martín Salazar, <sup>2</sup>Luis Cumbal, <sup>1</sup>Carlos Naranjo

<sup>1</sup>Departamento de Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Sangolquí, Ecuador

<sup>2</sup>Centro de Nanociencia y Nanotecnología, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador

E-mail: [artista\\_politico@hotmail.com](mailto:artista_politico@hotmail.com)/[martinblade19@hotmail.com](mailto:martinblade19@hotmail.com)

## RESUMEN:

Las nanopartículas tienen una gran utilidad en la remediación ambiental, siendo su objetivo primordial la remoción de contaminantes producidos por la industria; las nanopartículas de hierro cero valente ofrecen un alto rendimiento y debido a su tamaño, puede llegar a fuentes acuíferas que se encuentren a gran profundidad. El propósito del proyecto es producir nano-partículas a nivel industrial, para lo cual se requiere de un sistema que cumpla con todos los parámetros, aspectos y requisitos en el proceso de preparación de nano-partículas; el sistema consta de tres (3) recipientes a presión (diseñados a presión interna y externa) y cada recipiente posee la instrumentación respectiva para medir los parámetros del proceso y mantenerlo bajo control. Primero se diseña y construye un prototipo del sistema que permitirá medir las variables del proceso y verificar la factibilidad de expandirlo a un nivel industrial. Además, una parte innovadora e investigativa es el estudio de materiales no metálicos para la construcción del sistema. En base a la información obtenida en el prototipo se diseña un sistema industrial con recipientes en acero inoxidable tipo 304, con su respectiva instrumentación y sistema de control. Se logró establecer que es factible la producción de nano-partículas a nivel industrial y que el duralón es un material muy versátil y útil para la construcción del prototipo. Para la construcción a nivel industrial se requiere acero inoxidable ya que es un material muy comercial, y el uso del mismo representaría costos económicos más bajos; además presenta facilidad en el maquinado y varias características necesarias en este proceso: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene y limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. Para la producción de nanopartículas a nivel industrial se debe seguir un procedimiento (el cual ha sido establecido en este proyecto) que asegure la obtención de nano-partículas de hierro cero valente dentro del rango de 2 a 100 nanómetro (preferentemente valores bajo) y que la varianza del tamaño sea baja. La instrumentación y el sistema de control son estrictamente necesarios para mediar las variables del proceso y mantenerlo bajo control, ya que si un parámetro no pudiera ser regulado, la producción de nanopartículas (dentro del tamaño deseado) podría no ser exitosa.

Palabras clave:

1. Diseño de Recipientes a Presión
2. Obtención de Nano-partículas metálicas
3. Remediación Ambiental
4. Hierro Cero-Valente
5. Recipiente de material plástico y metálico

## ABSTRACT

Nanoparticles have great utility in environmental remediation, being its main target the removal of industry pollutant; zerovalent iron nanoparticles have high performance and because their size can reach very deep water sources. The purpose of this project is the nanoparticles production at industrial level; for which it requires a system that meets all the parameters, aspects and requirements of the process of nanoparticles production. The system has three pressure vessels (design with internal and external pressure) and each vessel has the appropriate instrumentation for measuring all the parameters of the process and keep it under control. First, must be designed and built a prototype of the system which allows measuring all the variables of the process and verifying the feasibility of expanding it at industrial level. Besides, the innovation of this project is the investigation of using non-metallic materials in the construction of the system (pressure vessels). Using the information obtained in the prototype, a industrial level system has to be designed with vessels in stainless steel material, all of them with the corresponding instrumentation and control system. It is feasible the nanoparticles production at industrial level and that duralon (nylon – polyamide) is a very versatile and useful material for constructing a prototype; but the industrial level system requires stainless steel due to is a very commercial material, therefore it can be save a big amount of money in the construction; also the stainless steel has many indispensable characteristic for this process: Excellent corrosion resistant, easy cleaning, machinability, excellent weldability, no hardening with heat treatment and it can be used in very low or high temperatures. For the nanoparticles production at industrial level, there is a procedure that must be followed (established in this project) which ensures a zerovalent iron nanoparticle within the range of 2 to 100 nanometers (preferably low values). The instrumentation and the control system are necessary to measure process variables and for keeping it under control, if a parameter cannot be regulated, the nanoparticles production (between the established size range) could not be achieved.

### Key Words:

1. Pressure Vessel Design.
2. Metallic nano-particles production
3. Environmental remediation
4. Zerovalent Iron
5. Vessels in plastic and metallic material

## INTRODUCCIÓN:

Las nanopartículas de hierro cero Valente, son partículas que poseen un diámetro hidrodinámico menor a  $100 \text{ } \mu\text{m}$ . El núcleo consiste principalmente de Hierro cero Valente (hierro con valencia cero) y provee el poder reductor para reaccionar con contaminantes ambientales(Li, 2006); la superficie masiva y las propiedades únicas de las nano-partículas han enfocado mucha investigación hacia la remediación ambiental(Üzüm, 2008). En el Ecuador, las industrias petrolera y minera producen una gran cantidad de daños ambientales (sobre todo en el agua) debido al alto uso de químicos y elementos contaminantes; por consiguiente, las nanopartículas de hierro cero valente tendrían una gran aplicación para contrarrestar los efectos negativos ambientales generados por dichas industrias.

La nano-partícula funciona encapsulando el contaminante metal, es la capa encapsuladora inmoviliza el contaminante hasta por 30 años. (Üzüm, 2008)

La inyección de nano-partículas de Hierro cero Valente en la remediación ambiental ofrece la ventaja de la aplicabilidad en las fuentes de contaminación en acuíferos profundos o en áreas ocupadas por tierras en un tiempo relativamente corto. Sin embargo para que las partículas tengan esta propiedad su tamaño debe estar en el orden del nano es decir por debajo de la escala microscópica, para poder moverse a la zona donde se quiere actuar, por lo que el comportamiento de las nano-partículas en el transporte debe ser controlado. (Üzüm, 2008)

Existen tres técnicas más usadas para la elaboración de las nano-partículas:

- Molido de alta energía de esferas metálicas de Hierro
- Reducción de fase de gas de óxidos de Hierro mediante H<sub>2</sub>.
- Reducción de fase acuosa de sales de hierro mediante Borohidruro de Sodio (NaBH<sub>4</sub>).

La generación de nanopartículas se la ha realizado a un nivel de laboratorio, con lo cual se ha podido comprobar su efectividad, pero el volumen producido no es suficiente para la remediación ambiental esperada. El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de un sistema (modelo a escala) que permita crear nanopartículas a nivel industrial; el principal elemento de éste sistema es el Reactor Químico. Además dicho sistema consta de dos recipientes más que contendrán los químicos complementarios necesarios para la generación de nanopartículas de hierro cero valente.

Un reactor químico es una unidad procesadora diseñada para que en su interior se lleve a cabo una o varias reacciones químicas. Dicha unidad procesadora está constituida por un recipiente cerrado, el cual cuenta con líneas de entrada y salida para sustancias químicas, y está gobernado por un algoritmo de control. El Reactor tiene como funciones principales: (Scott, 2001)

- Asegurar el tipo de contacto o modo de fluir de los reactantes en el interior del tanque, para conseguir una mezcla deseada con los materiales reactantes.
- Proporcionar el tiempo suficiente de contacto entre las sustancias y con el catalizador, para conseguir la extensión deseada de la reacción.
- Permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción.

El modelo a escala del sistema utilizará un reactor intermitente. Este tipo admite todos los reactivos al principio y los procesa según un curso predeterminado de reacción, durante el cual no se alimenta o se extrae algún material. (Perry, 2001)

Con el modelo a escala se podrá obtener información necesaria para el diseño y futura construcción de un prototipo (sistema de generación de nanopartículas a nivel industrial) que permita la creación de un volumen de nanopartículas que satisfaga la remediación ambiental esperada o proyectada. Otro aspecto de gran relevancia en este proyecto, es la utilización de materiales plásticos para el diseño y construcción de los recipientes que contendrán los químicos necesarios para el proceso de creación de nanopartículas; la utilización del plástico será la característica innovadora del proyecto y busca un desarrollo paralelo de otras industrias del Ecuador.

Para éste proyecto se ha elegido las nanopartículas cero valente debido a su gran rendimiento en la remediación ambiental.

## MATERIALES, MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

### MATERIALES:

Los materiales utilizados en la construcción del sistema (modelo a escala) para la generación de nanopartículas fueron duralón y acero inoxidable tipo 304.

DURALÓN:El duralón es un nylon semi-cristalino y generalmente muy duro; posee buena resistencia tanto térmica como química. Es el más versátil, y con mejor performance, termoplástico de ingeniería. El nilón provee buena resistencia a la mayoría de químicos (incluyendo hidrocarburos); sin embargo, debido a que le duralón es un polímero de condensación, puede ser atacado por ácidos fuertes, alcoholes y álcalis. Pueden ser utilizados en ambientes de alta temperatura debido a su relativo alto punto de fusión. (<http://www.duromer.com/products/duralon>)

El duralón es designado para ser usado primordialmente en aplicaciones de moldeo por inyección pero también puede ser usado en moldeo por sopleo y extrusión. El duralón ha sido utilizado como reemplazo de piezas metálicas, en el área automotriz; además de tener una amplia gama de aplicaciones eléctricas (como aisladores y carcasas de switches). Todo esto se debe a las excelentes propiedades a la fatiga que posee el duralón, a la alta resistencia mecánica y de impacto de dicho material. (<http://www.duromer.com/products/duralon/>)

ACERO INOXIDABLE TIPO 304:En metalurgia, el acero inoxidable se define como una aleación de acero con un mínimo del 10 % al 12 % de cromo contenido en masa. Otros metales que puede contener por ejemplo son el molibdeno y el níquel. ([http://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_inoxidable](http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable))

El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales aleantes que contiene, poseen gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno. (Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R. 2002).

El acero inoxidable tipos 304 corresponde a la serie 300, los cuales pertenecen a la clasificación de acero austenítico. Éstos aceros son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, y los más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317.

Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene y limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. (Kalpakjian, Serope; Schmid, Steven R, 2002)

**Tabla 1: Clasificación de acero inoxidable**

Clase	Clasificación AISI	Ejemplos de especificaciones
I Martensíticos	SERIE	410, 420, 431
II Ferríticos	400	409, 430, 434
III Austeníticos	SERIES 200 y 300	304, 304L, 321, 316

(FUENTE: Manual de acero inoxidable, CEINDI)

En éste proyecto el duralón fue utilizado para la construcción de dos recipientes, los cuales fueron diseñados para contener a la soluciones de Borhidruro de Sodio y Sulfato de Hierro; es necesario acotar que el recipiente para la solución de Sulfato de Hierro también será el REACTOR. Mientras que el acero inoxidable tipo 304 (austenítico) fue utilizado para el recipiente que contendrá a la CarboxiMetil Celulosa ya que ésta parte del proceso requiere calor y puede llegar a temperaturas que derritan al duralón.

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE RECIPIENTES DE PLÁSTICO (SEGÚN ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION X, FIBER-REINFORCED PLASTIC PRESSURE VESSEL)

### 1. DISEÑO A PRESIÓN EXTERNA:

Se asume un espesor de pared y se calcula con la siguiente fórmula la Presión Externa Máxima admisible

$$Pas1 = \frac{K * \left(\frac{Er}{Fs}\right) * \left(\frac{Do}{L}\right) * \left(\frac{ts}{Do}\right)^{5/2}}{1 - 0.45 \sqrt{\frac{ts}{Do}}}$$

Donde:

***K*** = ***Factor de Concentración de Esfuerzo***

***Er*** = ***Módulo de Tensión Axial***

*Do*            *Diámetro Interno*

*L* =            *Longitud de Tanque*

*ts* =            *Espesor de Pared de Tanque*

*Fs* = 5        *Factor de Diseño para Presión Externa*

## 2. DISEÑO A PRESIÓN INTERNA:

Mediante la siguiente fórmula se calcula el espesor de pared para esfuerzo longitudinal:

$$t1 = \frac{P * R}{2 * (0.001 * E1 - 0.6 * P)}$$

Donde:

*P* = *Presión Interna*

*R* = *Radio Interno*

*E1* = *Módulo de Tensión Longitudinal*

Mediante la siguiente fórmula se calcula el espesor de pared para esfuerzo circunferencial:

$$t2 = \frac{P * R}{(0.001 * E1 - 0.6 * P)}$$

Donde:

*P* = *Presión Interna*

*R* = *Radio Interno*

*E* = *Módulo de Tensión Circunferencial*

## PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE RECIPIENTES DE METAL (SEGÚN ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, SECTION VII, DIV. 1, RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS)

### 1. DISEÑO A PRESIÓN INTERNA:

Espesor de Paredes Cilíndricas para tanque de relación entre diámetro y espesor mayor o igual a 10

Se utiliza la siguiente fórmula para determinar el espesor mínimo admisible para esfuerzo circunferencial:

$$t_{sc1} = \frac{Pd * Ri}{Ss * E_{jf} - 0.6 * Pd}$$

Presión Admisible:

$$Pa1 = \frac{(Ss * E_{jf} * ts)}{Ri + 0.6 * ts} = 539.38 \text{ psi}$$

Donde:

***Pd*** =Presión de Diseño

***Ri*** = Radio Interno

***Ss*** =Esfuerzo Máximo Admisible

***E<sub>jf</sub>*** =Eficiencia de la junta

Se calcula con la siguiente fórmula el espesor mínimo admisible para esfuerzo longitudinal:

$$t_{sc2} = \frac{Pd * Ri}{2 * Ss * E_{jf} + 0.4 * Pd}$$

PresiónAdmisible:

$$Pa2 = \frac{2(Ss * E_{jf} * ts)}{Ri - 0.4 * ts}$$

## 2. DISEÑO A PRESIÓN EXTERNA:

Espesor de Paredes Cilíndricas para tanque de relación entre diámetro y espesor mayor o igual a 10.

PresiónExternaadmisible:

$$Pas = \frac{4 * Bs}{3 * \left(\frac{Do}{ts}\right)}$$

Donde:

***Do*** =Diámetro Externo del tanque

***As*** =Valor obtenido de tabla

***Bs*** =Valor obtenido a través de tabla

$t_s$  = Espesor de pared del recipiente especificado para el cálculo.

Los valores de  $A_s$  y  $B_s$  son determinados en las tablas correspondientes según la norma ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Part D, Properties Materials.

## PROCEDIMIENTO PARA EL LA SELECCIÓN DEL CALENTADOR (DISEÑO TÉRMICO)

Calor por cambio de temperatura:

$$\dot{Q} = \frac{C_p * \rho * V * (T_2 - T_1)}{t}$$

Donde:

$C_p = 4200 \frac{J}{kg^{\circ}C}$	Calor Específico del Agua
$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$	Densidad del Agua
V	Volumen de Agua a Calentar
T1	Temperatura Inicial de la Solución
T2	Temperatura final de la Solución

## PROCEDIMIENTO PARA EL LA SELECCIÓN DEL MOTOR (AGITADOR) Y DEL DISEÑO DEL EJE.

### Cálculo de RPM requeridas por motor:

Para tener un flujo turbulento se necesita un número de Reynolds mayor a 10000.

Ecuación del Número de Reynolds:

$$N_{RE} = \frac{D_a^2 * N * \rho}{\mu}$$

Donde:

$D_a =$  **Diámetro del impulsor**

$N =$  **Velocidad de Rotación en rev/s**

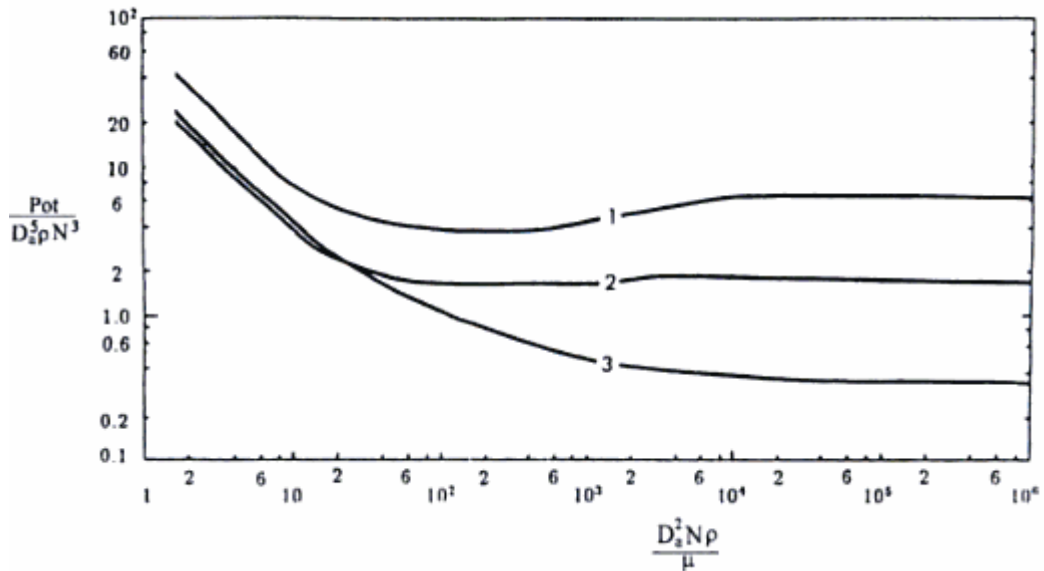
$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$  **Densidad del Agua**

$\mu = 0.001 Pa \cdot s$  **Viscosidad dinámica del agua**

Para un  $Re=10000$  se despeja la velocidad de rotación y se puede establecer las RPM del motor reductor necesarias para generar un flujo turbulento que permita una buena agitación del agua nitrogenada con el químico (polvo)



**Consumo de Potencia por Agitación:**



**Figura 1: Gráfica relación entre el Número de Potencia y el Número de Reynolds**  
Fuente: (Dondé Castro, 2005)

Números de Potencia:

1. Turbina de 6 Aspas verticales
2. Impulsor de 2 paletas planas verticales
3. Propelas marina 3 aspas

De la fórmula del Número de Potencia, se despeja la Potencia y se tiene que:

$$Pot = \frac{D_a^5 * \rho * N^3}{N_{POT}}$$

Donde:

$D_a =$  *Diámetro del impulsor*

$N =$  *Velocidad de Rotación en rev/s*

$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$  *Densidad del Agua*

$$N_{POT} = 2 \text{Viscosidad dinámica del agua}$$

### Cálculo de Torque para mover inercia del eje:

Masa de Eje de Duralón:

$$M_{eje} = V * \rho = \frac{\pi}{4} (\phi_{eje}^2 * L_{eje}) * \rho$$

$$M_{paletas} = 2 * a_{paleta} * \left( \frac{\phi_{paleta}^2 * \pi}{4} \right) * \rho$$

Donde:

$$\phi_{eje} = \text{Diámetro del eje del agitador}$$

$$L_{eje} = \text{Longitud del eje agitador}$$

$$\rho = \text{Densidad del material a ser utilizado}$$

Inercia del eje:

$$I_{eje} = \frac{1}{2} * m_{eje} * r_{giro}^2 + \frac{1}{2} * m_{paletas} * r_{giro}^2 = [Kg * m^2]$$

Se asume que las paletas son discos para que tengan más Inercia y se asume que se llega a la velocidad angular en medio segundo.

El Torque necesario para vencer la Inercia del eje es:

$$\tau = I_{eje} * \alpha$$

Donde:

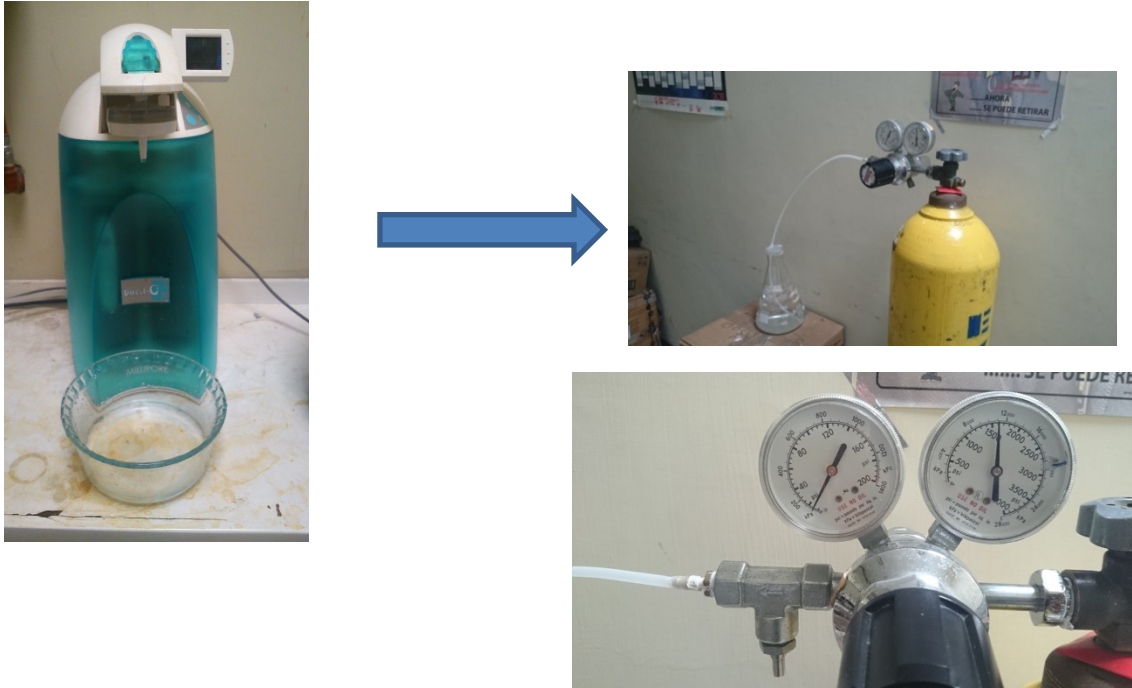
$$\alpha = \text{Velocidad angular}$$

## PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE NANOPARTÍCULAS EN PROTOTIPO

### 1. Nitrogenación del Agua:

En la bureta se debe medir el volumen requerido de agua destilada que se necesitará para formar las tres soluciones en los distintos recipientes (sulfato de hierro, carboximetil celulosa y borhidruro de sodio). En un matraz se deposita todo el volumen, ya medido, de agua destilada y procedemos a la nitrogenación, para lo cual se debe introducir la manguera, que está conectada al tanque de nitrógeno, en el matraz y se abre la válvula reguladora de flujo hasta llegar a una

presión de 10 psi. La boca del matraz (por donde está introducida la manguera) se debe sellar con Parafilm y dejar que el agua se nitrogene (debe burbujear) por 40 minutos.



**Figura 2: Obtención de agua destilada / Nitrogenación del agua**

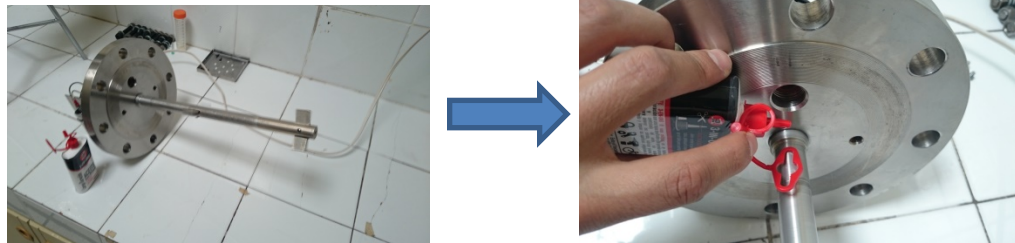
## 2. GENERACIÓN DE CARBOXIMETIL CELULOSA - CMC (SOLUCIÓN)

- a) Se debe montar el recipiente en su base respectiva y luego comprobar que todas las válvulas estén cerradas.



**Figura 3: Recipiente CMC montado en su base correspondiente**

- b) Antes de colocar la brida (tapa) en el recipiente, verificar que el eje del motorreductor esté bien lubricado. Para lubricar el eje se debe encender el motor y mientras el eje gira se coloca el aceite lubricante en el espacio que hay entre el eje y la brida.



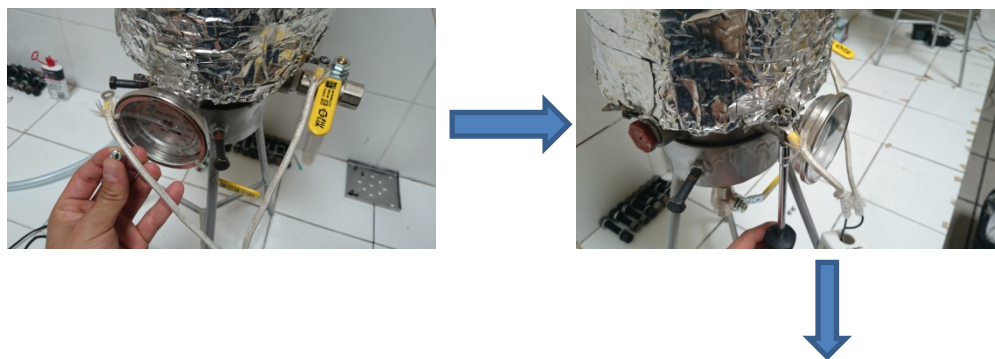
**Figura 4: Lubricación del eje del recipiente CMC**

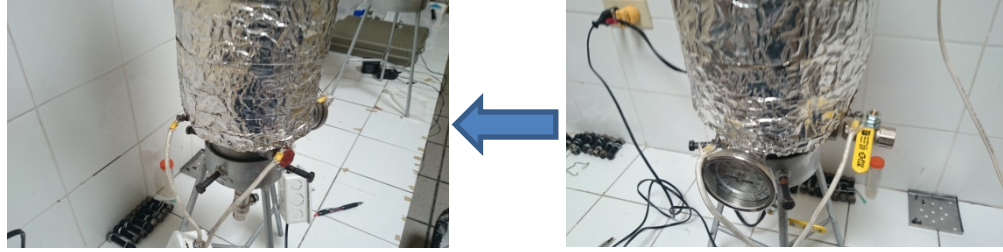
- c) Cerrar la cabeza bridada del recipiente (no olvidar el empaque o gasket) con 4 espárragos y apretarlos con la llave de pico. Y conectar el enchufe del motorreductor al tomacorriente.



**Figura 5: Cerrado de tapa bridada en recipiente CMC**

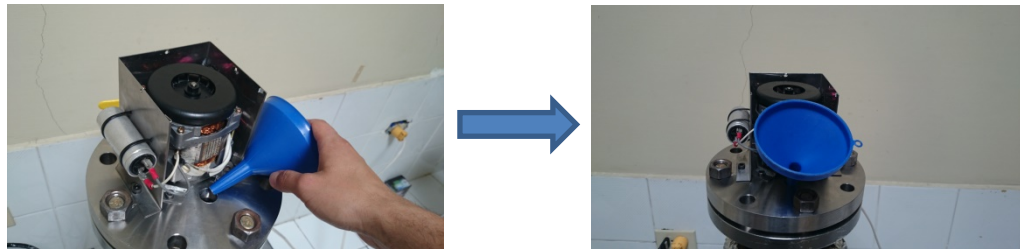
- d) Conectar los terminales de las resistencias eléctricas con los terminales correspondientes (no hay polaridad) de los interruptores; y enchufarlos a los tomacorrientes.





**Figura 6: Conexión de los interruptores de las resistencias eléctricas**

- e) Conectar la manguera de traspaso de solución desde la válvula de salida del recipiente CMC hasta la válvula correspondiente en el Reactor. Solo ajustar el conector roscado fijo o estático en el Reactor.
- f) Una vez sellado el recipiente se procede a abrir el tapón que se encuentra en la brida (tapa) y con la ayuda de un embudo ingresar 1050 ml. de agua nitrogenada; por el mismo orificio, ingresar 15 gr. de Carboximetil Celulosa (en polvo) y completar los 500 litros de agua nitrogenada.



**Figura 7: Ingreso de agua nitrogenada y CMC en polvo (Uso de embudo)**

- g) Cuando ya esté ingresado tanto el agua nitrogenada como la Carboximetil Celulosa (polvo) se enciende el motorreductor y las resistencias eléctricas con los interruptores correspondientes.



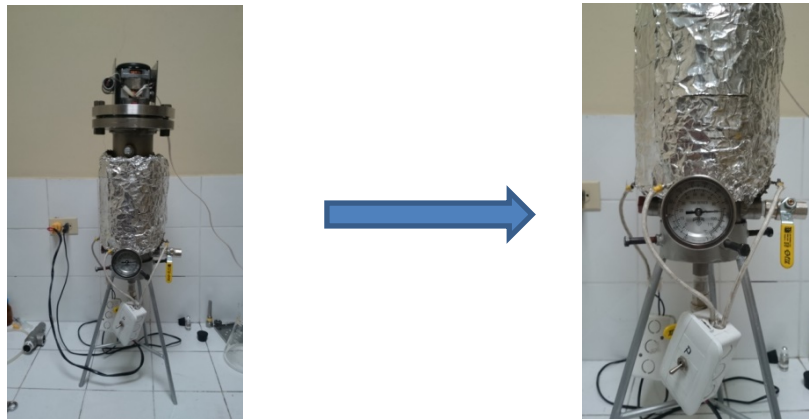
**Figura 8: Recipiente CMC con todos su elementos conectados**

- h) La temperatura comenzará a elevarse; esperar a que la temperatura llegue a los 50°C y apagamos las resistencias eléctricas mediante los interruptores (esto lo realizamos para que, en la parte donde no hay líquido, el calor se distribuya de forma uniforme y no afecte al funcionamiento del motor).



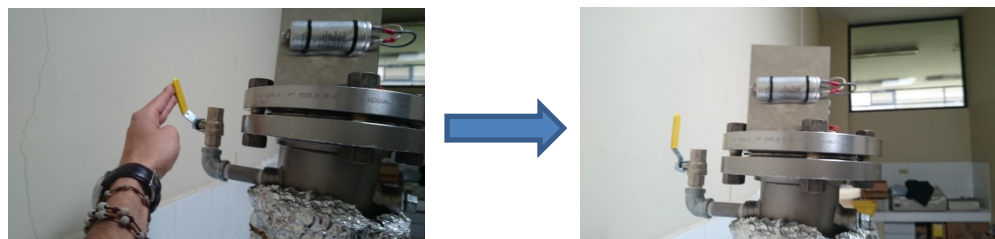
**Figura 9: Termómetro que indica el aumento de temperatura de solución CMC**

- i) La temperatura seguirá subiendo a pesar de que las resistencias estén apagadas; por consiguiente, cuando la temperatura llegue a los 60°C se encienden las resistencias eléctricas nuevamente mediante los interruptores. Esperar a que la temperatura llegue a los 85°C y apagar nuevamente las resistencias eléctricas.
- j) La temperatura llegará hasta los 92°C en aproximadamente 15 minutos mediante este procedimiento. En este punto la CMC ya estará totalmente polimerizada y la temperatura comenzará a disminuir.
- k) Cuando la temperatura baje a 90°C, seguir agitando la solución por 15 minutos.



**Figura 10: Resistencias eléctricas apagadas y recipiente con agitación.**

- l) Si el motor comienza a sonar de forma extraña (como dos metales rozando) se debe apagar el motor y abrir la válvula que se encuentra en la parte superior del recipiente; esperar a que el vapor se vaya, cerrar la válvula y encender nuevamente el motor hasta que se cumpla el tiempo determinado en el literal anterior.



**Figura 11: Apertura de válvula de alivio para liberación de vapor de agua.**

- m) Cuando los 15 minutos han pasado, se debe apagar el motor y esperar a que la solución de CMC se enfríe hasta temperatura ambiente (aproximadamente 2 horas).

**Nota:** Para ingresar el agua nitrogenada y la CMC al recipiente, también se lo puede hacer con la tapa bridada abierta; solo hay que tener cuidado que la CMC no se pegue en las paredes del recipiente puesto que con el calor que quemará la CMC y la solución se echará a perder. Siempre utilizar un embudo para poder controlar de mejor manera el ingreso de CMC.



**Figura 12: CMC totalmente polimerizada**

### 3. GENERACIÓN DE BORHIDRURO DE SODIO – BH4 (SOLUCIÓN)

- a) Colocar el recipiente de BH4 en la base correspondiente. Comprobar que todas las boquillas estén selladas y las válvulas cerradas.



**Figura 13: Recipiente BH4 montado en su base correspondiente**

- b) Antes de colocar la brida (tapa) en el recipiente, verificar que el eje del motorreductor esté bien lubricado. Para lubricar el eje se debe encender el motor y mientras el eje gira se coloca el aceite lubricante en el espacio que hay entre el eje y la brida.



**Figura 14: Lubricación del eje de recipiente BH4**

- c) Cerrar el recipiente con la tapa bridada; utilizar 4 espárragos y apretar las tuercas con la fuerza de la mano. (Ajustar los espárragos en cruz).
- d) Conectar el adaptador al tomacorriente y conectar el motorreductor utilizando dicho adaptador. Se debe utilizar el adaptador debido a que el motorreductor de éste recipiente funciona con corriente continua DC.



**Figura 15: Motorreductor conectado al adaptador respectivo**

- e) Instalar la manguera de traspaso de solución desde la válvula de salida del recipiente BH4 hasta la válvula de aguja (que se encuentra en la tapa bridada) del Reactor. Solo ajustar el conector roscado fijo o estático en el Reactor.
- f) Se debe colocar 1085 ml de agua nitrogenada y luego 1.457 gr. de borhidruro de sodio (polvo); el ingreso de éstos dos elementos se lo realizará a través del orificio de 1" de diámetro que se encuentra en la tapa bridada y sellada con un tapón. Tanto el agua nitrogenada como el BH4 deben ingresar al recipiente con la ayuda de un embudo.





**Figura 16: Ingreso de BH4 en polvo y agua nitrogenada (Uso de embudo)**

- g) Una vez cerrado el orificio de ingreso de agua y BH4 se procede a encender el motorreductor a través de su respectivo switch.

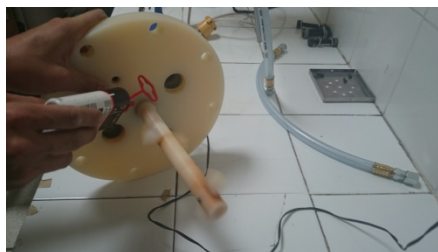


**Figura 17: Encendido del motorreductor**

- h) Dejar agitar la solución por, aproximadamente, 10 minutos.

#### **4. GENERACIÓN DE SULFATO DE HIERRO – FES (SOLUCIÓN)**

- a) La solución de sulfato de hierro se la llevará a cabo en el Reactor. Para la realización de ésta solución hay que tener mucho cuidado debido a su gran capacidad de oxidación; es decir, que se debe impedir que la solución se oxide para que el procedimiento de generación nanopartículas tenga éxito.
- b) Antes de colocar la brida (tapa) en el recipiente, verificar que el eje del motorreductor esté bien lubricado. Para lubricar el eje se debe encender el motor y mientras el eje gira se coloca el aceite lubricante en el espacio que hay entre el eje y la brida.



**Figura 18: Lubricación del eje del Reactor**

- c) Cerrar la tapa bridada del Reactor y ajustarla con 4 espárragos; ajustar las tuercas con la fuerza de la mano. (Ajustar los espárragos en cruz).
- d) Conectar el adaptador al tomacorriente y conectar el motorreductor utilizando dicho adaptador. Se debe utilizar el adaptador debido a que el motorreductor de éste recipiente funciona con corriente continua DC.

- e) Conectar la bomba manguera de la bomba de vacío en la boquilla correspondiente del Reactor (la cual se encuentra en la tapa del mismo).



**Figura 19: Conexión de bomba de vacío al Reactor**

- f) Ajustar los conectores móviles (rotatorios) de las mangueras de traspaso de los recipientes de CMC y BH4.



**Figura 20: Reactor con todos sus elementos instalados**

- g) Abrir la válvula de bola (para ingreso CMC) y la válvula de aguja (para ingreso de BH4) que se encuentran en la tapa bridada del Reactor. Mantener las válvulas de salida de los recipientes CMC y BH4 cerradas.
- h) Se debe encender la bomba de vacío y esperar 5 minutos para que retire todo el aire del Reactor y de las mangueras de traspaso.



### Figura 21: Remoción de aire del Reactor

- i) Por el orificio de 1", que se encuentra en la tapa bridada del Reactor, ingresar 750 ml de agua nitrogenada y rápidamente los 20.85 gr. para evitar la oxidación del químico.



**Figura 22: Ingreso de FES en polvo y agua nitrogenada (Uso embudo)**

- j) Cerramos rápidamente el orificio de 1" con el tapón (ajustar solo con la fuerza de la mano) y se enciende la bomba del vacío y el motorreductor.
- k) Esperar que la mezcla se agite de 5 a 10 minutos.
- l) Cerrar las válvulas de ingreso de CMC y BH4 al Reactor.

## 5. MEZCLA DE LAS TRES SOLUCIONES PARA FORMAR LAS NANOPARTÍCULAS.

- a) Una vez que la solución de CMC está a temperatura ambiente se procede a nitrogenarla, para la cual se ingresa la manguera del tanque de nitrógeno por la boquilla ubicada en la parte superior del cuerpo del recipiente y se sella dicha boquilla con Parafilm.



**Figura 23: Nitrogenación de la solución de CMC**

- b) Esperar a que la solución de CMC se nitroge por 30 minutos a una presión de 10 psi. (Presión medida en el manómetro de la válvula reguladora de flujo del tanque de nitrógeno).
- c) Se abre la válvula de salida del recipiente CMC y la válvula de bola de ingreso de CMC del Reactor. Se debe ingresar toda la solución de CMC. Una vez que toda la solución

CMC haya llegado al Reactor cerramos la válvula de ingreso al Reactor. Se puede traspasar la solución de CMC al reactor, recogiendo la misma en un matraz e ingresarla, con ayuda de un embudo, al Reactor por el orificio de 1" que se encuentra en la tapa bridada.

- d) Abrir la válvula de salida del recipiente BH4 y abrir ligeramente la válvula de aguja de ingreso al Reactor. Es recomendable dar dos vueltas al mecanismo de apertura de la válvula de aguja. Ingresar toda la solución de BH4 al Reactor y cerrar la válvula de aguja de ingreso al Reactor.
- e) Dejar que la mezcla se agite por 10 minutos; luego apagar la bomba de vacío.
- f) Nota: La bomba de vacío y el motorreductor deben estar encendidos y funcionando durante todo el proceso de traspaso de CMC y BH4 al Reactor. Es necesario el vacío para el traspaso de BH4 ya que la columna de líquido del recipiente que lo contiene no es suficiente.

## 6. MEDICIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS.

- a) Una vez que la bomba de vacío y el motorreductor estén apagados (después de los 10 minutos de agitación) se procede a tomar una muestra de la solución final en un recipiente de plástico y el resto se lo deposita en un matraz de la capacidad necesaria.



**Figura 24: Nanopartículas de hierro cero valente**

- b) Con ayuda de una inyección y de una jeringa se recoge un poco de solución del recipiente de plástico y se elimina el aire que ingresa.
- c) Conectamos un filtro de 0.45 micras en la jeringa y sacamos cuatro gotas para depositarlas en un envase de vidrio especial perteneciente a la máquina que mide las nanopartículas.



**Figura 25: Muestra de nanopartículas para medición de tamaño.**

- d) En el envase citado anteriormente se mezclan las cuatro gotas de solución con agua destilada (nitrogenada). Se debe agitar bien el envase para que la mezcla sea uniforme.



**Figura 26: Envase utilizado en la medición de las nanopartículas**

- e) Ingresamos el envase en la máquina que mide nanopartículas y esperamos los resultados.



**Figura 27: Medición de Nanopartículas**

- f) Nota: La máquina se debe encender unos 30 minutos antes para que se caliente. La medición de nanopartículas se la realiza a través de un láser.

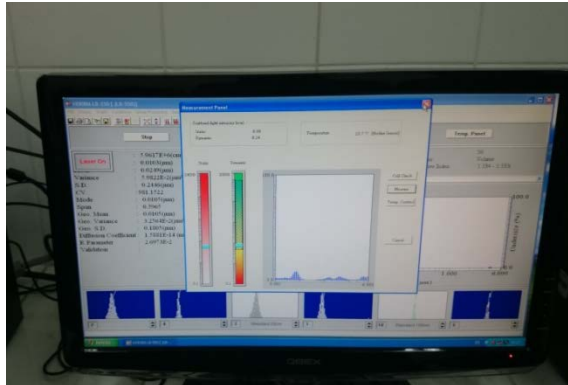


Figura 28: Resultados de medición de nanopartículas (Software)

## FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

### 1. Recipiente Borhidruro:

Material Nylon Poliamida (Duralón)

- a) Materiales: Tocho de Duralón de  $\varnothing 230 \times 285$  mm
- b) Cuerpo:
  - Refrentado de caras
  - Cilindrado entre dos puntos por torno
  - Maquinado en CNC
  - Taladrado para aberturas
  - Machuelado para roscas NPT
- c) Tapa:
  - Refrentado de caras
  - Cilindrado entre dos puntos por torno
  - Corte por Cizalla
  - Taladrado para aberturas
  - Machuelado para roscas NPT



Figura 29: Fotografía Materia prima para reactor y tanque de Borhidruro



**Figura 30: Fotografía recipiente de Borhidruro al finalizar proceso de fabricación**

## **2. Recipiente Carboxi - Metil Celulosa**

Material Acero Inox austenítico 304

a) Materiales:

- Brida Inox deslizable 4" X 150 lbs T304
- Brida Inox ciega 4" X 150 lbs T304
- Tubería Inox 304 SCH40 Ø4"X335mm
- Plancha Inox 304 4mm Ø140mm
- Threatolet Inox roscados ½" por 3000 lbs T304

b) Cuerpo:

- Unión de Brida deslizable con Tubo Inóx con soldadura TIG.
- Taladrado de aberturas en cuerpo
- Soldeo TIG de threatolets con el tanque
- Doblado de plancha inox para dar forma semiesférica
- Unión de plancha doblada con Tubo a través de soldadura TIG.

a) Tapa

- Brida Ciega
- Taladrado y Machuelado para aberturas de tapa.



**Figura 31: Soldadura de recipiente CMC (Final proceso de Fabricación)**

### 3. Reactor Nano – partículas:

Material Nylon Poliamida (Duralón)

- a) Materiales
  - Tocho de Duralón de Ø250X285 mm
- b) Cuerpo:
  - Refrentado y cilindrado entre dos puntos por torno
  - Maquinado en CNC
  - Taladrado para aberturas
  - Machuelado para roscas NPT
- c) Tapa:
  - Cilindrado entre dos puntos por torno
  - Corte por Cizalla
  - Taladrado para aberturas
  - Machuelado para roscas NPT



Figura 32: Fotografía de Reactor al finalizar proceso de fabricación

#### PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO:

##### 1. Tanque Carboxi-Metil Celulosa

###### PRUEBA NEUMÁTICA:

Después de la inspección visual donde se pudo constatar que el recipiente está construido según lo especificado en los planos, se realizó la prueba neumática a una presión interna de 60 psi y se mantuvo ésta presión durante 2 horas para verificar que no existan fugas. La presión de diseño de éste recipientes es de 45.35 psi. y se utilizó la siguiente fórmula para determinar la presión de prueba (según ASME BVPC Section VIII – Div. 1)

$$Ph = 1.3 * (MAWP \text{ ó } Pd) * \frac{S(\text{temp. prueba})}{S(\text{temp. diseño})} = 60 \text{ psi}$$



Donde:

Ph: Presión de Prueba

MAWP: Presión máxima permisible de trabajo

Pd: Presión de diseño

$\frac{S(\text{temp.prueba})}{S(\text{temp.diseño})}$  : Relación entre valores máximos admisibles de esfuerzo

En este caso la relación citada anteriormente será igual a uno (1).



**Figura 33: Fotografía Prueba Neumática Recipiente CMC**



**Figura 34: Fotografía Manómetro de Prueba Recipiente CMC**

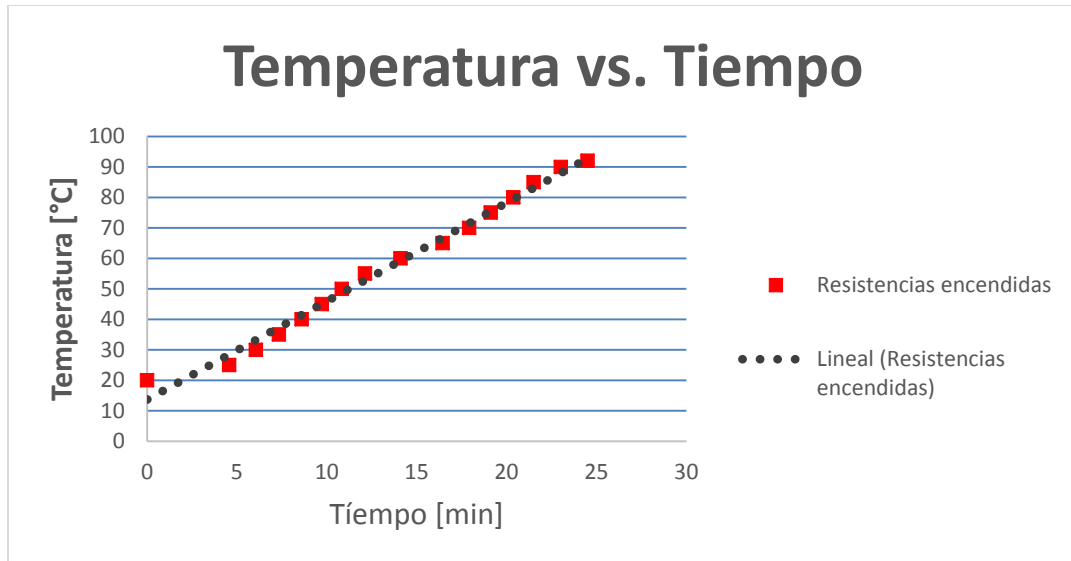
#### PRUEBA DE CALENTAMIENTO DE TANQUE

Se calentó el tanque de Carboxi con las resistencias, hasta una temperatura de 92°C un volumen de 1550 ml de agua con 15 gr. de Carboxi – Metil Celulosa en polvo y se obtuvieron los siguientes resultados.

**Tabla 14: Tabla de Prueba de Calentamiento Tanque Carboxi**

**Tabla Prueba de Calentamiento Tanque Carboxi**

<b>Tiempo</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Resistencia</b>
0 min	20 °C	Encendida
4:34 min	25 °C	Encendida
6:03 min	30 °C	Encendida
7:20 min	35 °C	Encendida
8:36 min	40 °C	Encendida
9:43 Min	45 °C	Encendida
10:50 min	50 °C	Apagada
12:07 min	55 °C	Apagada
14:06 min	60 °C	Encendida
16:26 min	65 °C	Encendida
17:55 min	70 °C	Encendida
19:07 min	75 °C	Encendida
20:22 min	80 °C	Encendida
21:30 min	85 °C	Apagada
23:01 min	90 °C	Apagada
24:30 min	92 °C	Apagada



**Figura 35: Gráfica Temperatura vs. Tiempo calentamiento recipiente CMC**



**Figura 36: Fotografía Prueba de Calentamiento Recipiente CMC**

Este recipiente alcanzó la temperatura de 92°C en 24 minutos y para lograr que se disuelva toda la Carboxi en la solución se mantuvo girando durante 10 minutos a esta temperatura apagada las resistencias.

El tiempo de enfriamiento de la Carboxi es aproximadamente 6 horas.

En el experimento se determinó que este tanque tiene un volumen de agua evaporado de 50 ml, por lo que se debe disolver 15 gr. de polvo de Carboxi-metil Celulosa en 1550 de ml agua, para obtener como producto final (en la mezcla de las tres soluciones) 3 lt. de Nano partículas.

## **2. Tanque Borhidruro**

### PRUEBA NEUMÁTICA:

Después de la inspección visual donde se pudo constatar que el recipiente está construido según lo especificado en los planos, se realizó la prueba neumática a una presión interna de 35 psi y se la mantuvo durante 2 horas para revisar que no existan fugas. Según el ASME BVPC Sección X, la presión de prueba debe ser mínimo 1.1 veces la presión de diseño; así que, teniendo un criterio conservador, se decide tener una presión 1.3 veces la presión de diseño (nos basamos en el cálculo realizado para la el recipiente CMC). Tener en cuenta que la presurización del recipiente no debe exceder una velocidad de 2% de la máxima presión de prueba por minuto.

En este tanque se determinó que existe un volumen muerto de 335 ml, por lo que se debe disolver 1.46 gr. de Borihidruro de Sodio en polvo, en 1085 ml de agua para tener como producto final (en la mezcla de las tres soluciones) 3lt. de Nano-partículas.

## **3. Reactor**

### PRUEBA NEUMÁTICA:

Después de la inspección visual donde se pudo constatar que el recipiente está construido según lo especificado en los planos, se realizó la prueba neumática a una presión interna de 35 psi y se la mantuvo durante 2 horas para revisar que no existan fugas. Según el ASME BVPC Sección X, la presión de prueba debe ser mínimo 1.1 veces la presión de diseño; así que, teniendo un criterio conservador, se decide tener una presión 1.3 veces la presión de diseño (nos basamos en el cálculo realizado para la el recipiente CMC). Tener en cuenta que la presurización del recipiente no debe exceder una velocidad de 2% de la máxima presión de prueba por minuto.

### PRUEBA DE VACÍO:

Se realizó la prueba una prueba de vacío con la bomba que se va a utilizar en el experimento y se llegó a una presión de -2 psi, a la cual llega la bomba, y se mantuvo durante 2 horas.

En este tanque se debe disolver primero 20.85 gr. de Sulfato de Hierro en 750 ml de agua para tener como resultado final (en la mezcla de las tres soluciones) 3lt. de Nano-Partículas.



Figura 37: Fotografía de generación de vacío en Reactor

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### RECIPIENTES MODELO A ESCALA

**TABLA 2: RESUMEN DE CÁLCULO RECIPIENTE BORHIDRURO**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de Pared	15 mm
Presión Externa Admisible	130 psi
Espesor de Pared mínimo por esfuerzo longitudinal	7.4 mm
Espesor de Pared mínimo por esfuerzo circunferencial	14.8 mm

Resumen de Cálculo de diseño de recipiente de Borihidruro Modelo a escala

**TABLA 3: RESUMEN DE CÁLCULO RECIPIENTE CARBOXIMETIL CELULOSA (CMC)**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de pared de tanque	0.12 in
Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial	$9.786 \times 10^{-3}$ in
Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal	$4.87 \times 10^{-3}$ in

Presión Interna Admisible	539.38 psi
Presión Externa Admisible	118.88 psi

### Resumen de Cálculo de diseño de recipiente de CMC Modelo a escala

**TABLA 4: RESUMEN DE CÁLCULO DE REACTOR DE NANO-PARTÍCULAS**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de Pared	15 mm
Presión Externa Admisible	107 psi
Espesor de Pared mínimo por esfuerzo longitudinal	7 mm
Espesor de Pared mínimo por esfuerzo circunferencial	14 mm

### Resumen de Cálculo de diseño de recipiente de Nano-partículas Modelo a escala

En base a los espesores calculados, los recipientes fueron construidos; con esto se asegura la integridad mecánica de los mismos y su total funcionalidad en el proceso de generación de las nano-partículas. Se puede determinar que el recipiente metálico requiere un espesor de pared menor a los recipientes plásticos, esto se debe a que el módulo de elasticidad del metal (acero inoxidable tipo 304) es mucho más alto en comparación con el módulo de elasticidad del duralón. El duralón fue un material versátil y beneficioso en la construcción de los recipientes debido a su facilidad de maquinado; además al ser un material liviano, también facilitó el experimento de generación de nano-partículas en el manejo y traslado de los recipientes.

## RECIPIENTES PROTOTIPO

**Tabla 5: Resumen de Cálculo de diseño a presión externa de recipientes de Carboxi-Metil Celulosa y Borihidruro de acero (Prototipo)**

<b>RESUMEN DE CÁLCULO</b>	
<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de pared de recipiente	0.25 in (6.35mm)
Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial	Sin refuerzo

Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal	Sin refuerzo
PresiónExternaAdmisible	59.3 psi

**Tabla 6: Resumen de Cálculo de diseño a presión externa de Reactor de Nano-partículas de acero (Prototipo)**

**RESUMEN DE CÁLCULO**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de pared de recipiente	0.25 in (6.35mm)
Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial	Sin refuerzo
Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal	Sin refuerzo
PresiónExternaAdmisible	40.62 psi

**Tabla 7: Resumen de Cálculo de diseño a presión interna de recipientes de Carboxi-Metil Celulosa y Borihidruro de acero (Prototipo)**

**RESUMEN DE CÁLCULO**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de pared de recipiente	0.25 in (6.35mm)
Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial	Sin refuerzo
Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal	Sin refuerzo
PresiónInternaAdmisible	335.73 psi

**Tabla 8: Resumen de Cálculo de diseño a presión interna de Reactor de Nano-partículas de acero (Prototipo)**

**RESUMEN DE CÁLCULO**

<u>Descripción</u>	<u>Valores</u>
Espesor de pared de recipiente	0.25 in (6.35mm)
Espesor mínimo por esfuerzo circunferencial	Sin refuerzo

Espesor mínimo por esfuerzo longitudinal	Sin refuerzo
Presión Interna Admisible	251.44 psi

Se determinó que la mejor alternativa de construcción para los tres recipientes es con acero Inoxidable AISI 304, debido a que las presiones admisibles externas en los recipientes de plástico son menores y que los espesores mínimos requeridos son muy grandes en los mismos. Los recipientes de acero inoxidable son de fácil maquinabilidad, por lo que se pueden instalar fácilmente en estos motores, válvulas, mangueras, instrumentación, etc.

El acero inoxidable tipo 304 es el material adecuado para la construcción de los recipientes ya que posee características que cumplen con los requisitos del proceso de generación de nanopartículas:

- Fácil limpieza
- Al ser un acero austenítico, no tiene magnetismo
- Alta resistencia a la corrosión
- Fácil maquinabilidad
- Económico y altamente comercial (se lo encuentra en diferentes presentaciones como planchas, tubería, etc.)

El diseño de los recipientes prototipo tomó como referencia los parámetros y aspectos del modelo a escala, con lo cual se pudo comprobar la factibilidad de llevar el proceso de generación de nanopartículas de hierro cero valente a un nivel industrial.

## **PREPARACIÓN DE NANOPARTÍCULAS**

Con el modelo a escala se estableció un procedimiento con el cual las nano-partículas, de hierro cero valente, obtienen un tamaño dentro del rango de 0 a 100 nanómetros y su varianza es baja. El tamaño de las nanopartículas debe tender a ser el menor dentro del rango definido anteriormente, con ello aseguramos que las nanopartículas llegarán al lugar indicado una vez que sean inyectadas al suelo; produciendo así la remediación ambiental esperada.



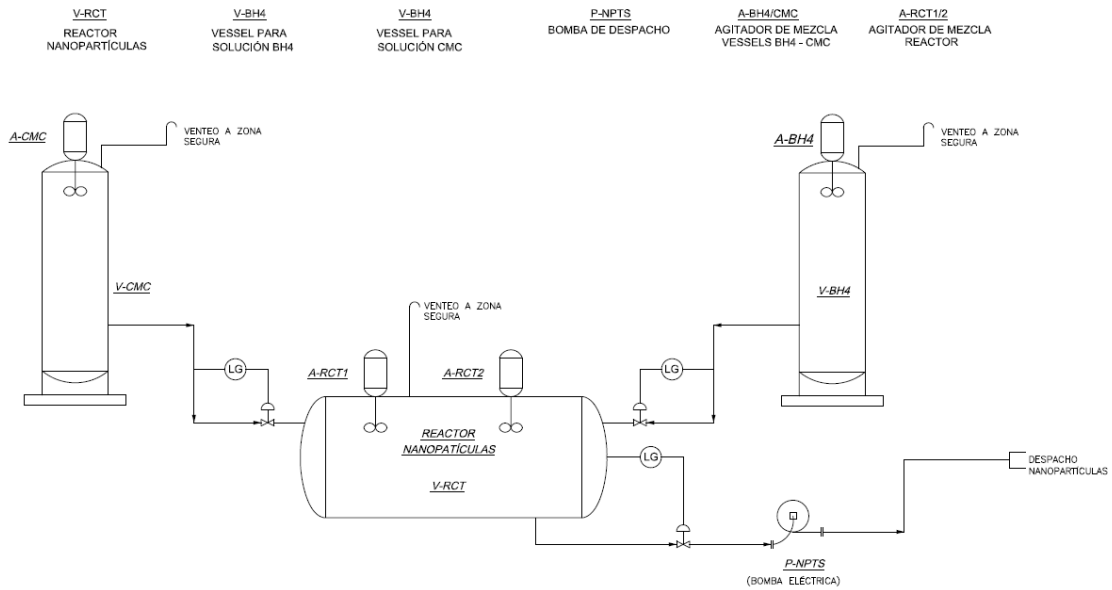
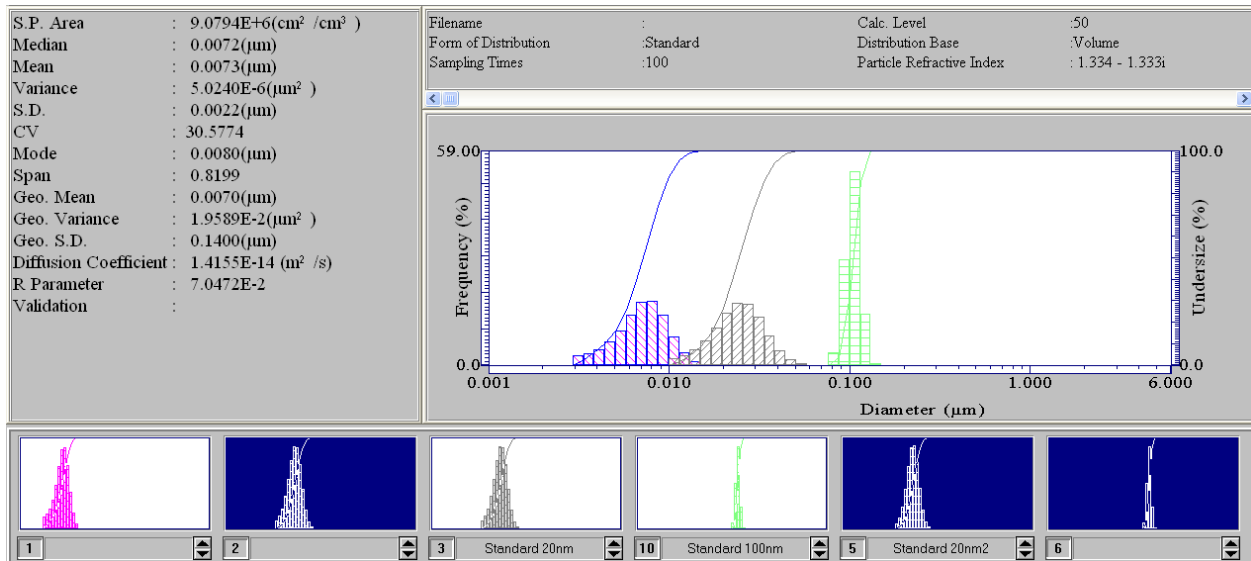
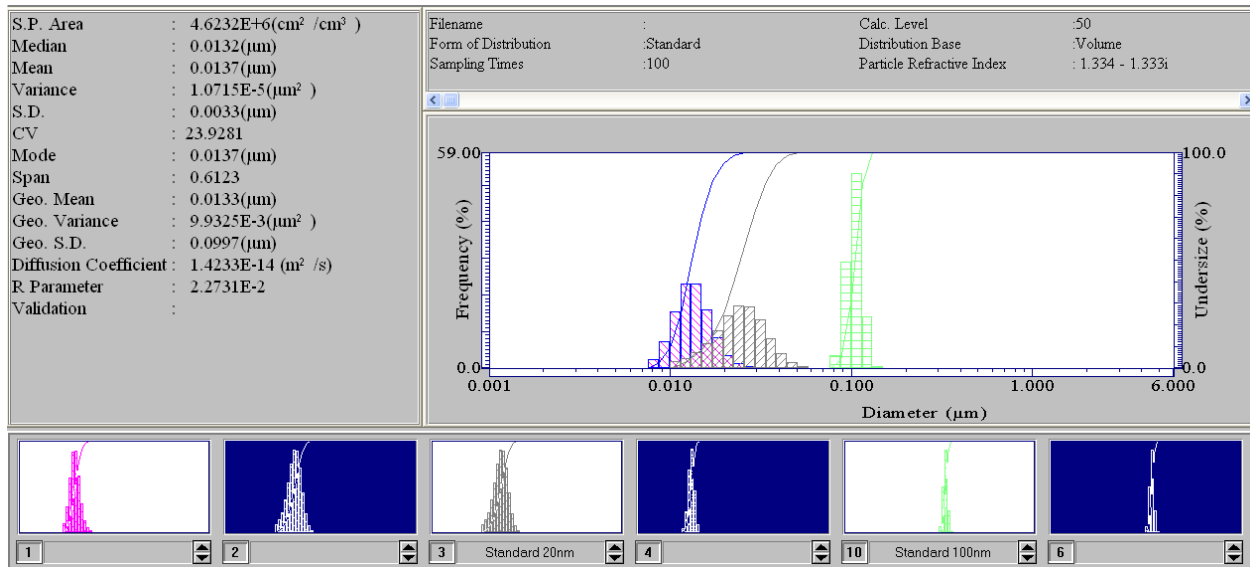


Figura 38: Diagrama de flujo del proceso de generación de nano-partículas.





**Figura 39: Medición de Nano-partículas**

La medición de las nano-partículas comprobó la factibilidad y el éxito en la obtención de un sistema funcional que genere nano-partículas en volumen industrial y con el tamaño deseado.

## INCONVENIENTES EN LA PREPARACIÓN DE LAS NANOPARTÍCULAS CON EL PROTOTIPO

### 1. Influencia de la concentración de CMC

La CMC es el elemento que impide que las nanopartículas se agrupen y me aumenten de tamaño, es decir, es el estabilizante de la reacción química. En el experimento se midió la cantidad exacta de carboximetil celulosa (polvo) que se requería en la mezcla con el agua nitrogenada y se consideró un volumen de solución perdido por evaporación, por lo cual, se aumentó 50 ml. agua nitrogenada (total 1550 ml. de agua nitrogenada).

La cantidad de solución y la concentración de CMC es un factor importante en la obtención exitosa de nanopartículas de tamaños pequeños. Por consiguiente hay que considerar los siguientes parámetros en la producción de solución de CMC:

- Medir el peso (en gramos) de carboximetil celulosa en polvo necesario para formar la solución (15 gr.)
- Evitar que la CMC (polvo) se pegue en las paredes del recipiente, ya que debido al calor y a la alta temperatura, éste químico se quema, produciendo una disminución en la concentración de la solución, suciedad e impide una total polimerización en el agua nitrogenada.

Se debe seguir estrictamente los pasos citados en el PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE NANOPARTÍCULAS; con ello se asegura una reacción final exitosa y una nanopartículas de tamaño deseado.



**Figura 40: Solución de CMC cuando el químico (polvo) se quemó. Observar la turbidez de la solución y la suciedad.**



**Figura 41: Solución de CMC totalmente polimerizada.**

## **2. INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO**

El objetivo de la nitrogenación del agua, es la eliminación del oxígeno disuelto; éste proceso es necesario para evitar la oxidación de la solución de Sulfato de Hierro y obtener nanopartículas de hierro cero valente dentro del rango de 0 a 100 nanómetros. Entre menos oxígeno disuelto tenga el agua nitrogenada en las tres soluciones menor es la probabilidad de oxidación.

En los primeros prácticas de preparación de las nanopartículas, el tamaño de las mismas fue elevado (entre 100 y 150 nanómetros) y con una varianza de tamaño de alto valor. Esto se produjo debido a la falta de nitrogenación de CMC, previo a la mezcla de las tres soluciones. La solución de CMC se la realizaba con un día de anticipación, razón por la cual se requería una nueva nitrogenación; mientras que las soluciones de BH<sub>4</sub> y FES se la realizaba el día en que se llevaba a cabo la mezcla de las tres soluciones con agua nitrogenada recién obtenida.

### 3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La temperatura es un factor primordial para la producción de solución CMC; es necesaria la temperatura adecuada para polimerizar todo el químico (polvo) en agua nitrogenada. En el caso de haber un exceso en la elevación de temperatura, la CMC podría quemarse lo cual impediría que la solución posea la concentración idónea de carboximetil celulosa.

Otro factor en el cual la temperatura influye es en el eje del recipiente CMC, debido a que éste se dilata provocando mayor rozamiento y fricción en el orificio de la tapa bridada; y además provoca que las esferas del rodamiento tengan mayor apriete. Para superar lo mencionado anteriormente, se requiere de un motorreductor con alto torque que provea las RPM necesarias para la agitación.

En el experimento se logró determinar la importancia de la lubricación con un aceite que resista alta temperatura y que ayude a contrarrestar el efecto del vapor de agua sobre el eje del recipiente CMC. De hecho la lubricación es necesaria en los tres recipientes (revisar PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE NANOPARTÍCULAS).

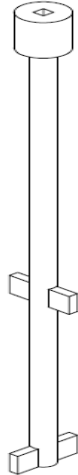


**Figura 42: Lubricación del eje del recipiente CMC**

### 4. INFLUENCIA DE LA AGITACIÓN

La agitación es el parámetro que permite conseguir uniformidad en la solución cuando se mezclan el agua nitrogenada con su respectivo químico (polvo). Una característica elemental de la agitación son las RPM y la forma de las paletas del eje; hay que tomar en cuenta que mientras mayor sean las RPM, la agitación pierde el objetivo de producir uniformidad en la solución ya que a grandes velocidades las paletas solo trasladan el fluido y no lo agitan.

La forma de las paletas también es importante, para producir la mayor turbulencia posible y que haya gran área de contacto con el fluido se recomienda paletas planas de una longitud total de 50 o 60% el diámetro del recipiente.



**Figura 43: Gráfico del diseño de Eje del recipiente CMC**

## CONCLUSIONES

1. Después de realizar el diseño del Reactor de Nano-partículas y sus facilidades asociadas se pudo determinar que el parámetro más crítico fue la presión externa debido a que este establecerá tanto el espesor de pared del cuerpo como de la cabeza del recipiente, puesto que la presión admisible externa es mucho menor a la presión admisible interna.
2. El material Nylon Poliamida (Duralón) fue muy útil y versátil para la manufactura de los tanques de Borihidruro y reactor de nano-partículas de los modelos a escala, debido a que sus características mecánicas y su composición química permitieron un desarrollo exitoso del experimento. Este material es de fácil maquinabilidad y no genera ninguna cotaminación ni reacción química indeseada que altere el proceso de generación de nano-partículas. Además es un material liviano que permite la fácil manipulación de los tanques.
3. En el recipiente de Carboxi-metil celulosa los parámetros que se deben controlar son presión, temperatura y nivel, en el recipiente de borihidruro los parámetros que se deben controlar son presión y nivel; para el reactor, al ser el recipiente principal donde se generan las nano-partículas, se deben controlar todos los parámetros inmersos en el proceso como son: temperatura, presión, nivel y porcentaje de oxígeno disuelto en la solución.
4. Para asegurar la formación de nano-partículas de tamaño dentro del rango de 0 – 100 nm, se debe seguir el procedimiento establecido, dando importancia a factores muy importantes como son orden y limpieza. De esta manera se asegurará que la completa disolución de los químicos en cada uno de los tanques y un producto final dentro de los parámetros requeridos.
5. El diseño de los recipientes prototipo tomó como referencia los parámetros y aspectos del modelo a escala, con lo cual se puedo comprobar la factibilidad de llevar el proceso de generación de nano-partículas de hierro cero-valente a un proceso industrial.

## REFERENCIAS

- Acedo Sánchez, J. (2006). Instrumentación y control avanzado de procesos. Madrid, España.
- Alcocer, J. (2007). *Apuntes de Diseño Mecánico*. Quito.
- Aranda, G. (2003). *Columna de Líquido, Manómetro Primario*. Jalisco, México.
- ASME. (2007). Boiler & Pressure Vessel Code X Fiber-Reinforced Plastic Pressure Vessel.
- Catálogos Matrices Kitasatos*. (s.f.). Obtenido de <http://labotienda.com/>
- Cengel, Y. (2007). *Trasnferencia de Calor y Masa*. McGraw-Hill.
- Cortes, M. (s.f.). *Temperatura Clasificación*. Academia de Bioinstrumentación.
- Dondé Castro, M. J. (2005). *Transporte de Momentum y Calor Teoría y Aplicaciones a la Ingeniería de Proceso*. Yucatán: Universidad Autónoma de Yucatán.
- Feng, H. (2007). Manipulating the Size and Dispersibility of Zerovalent Iron Nanoparticles by use of Carboxymethyl Celullose Stabilizers .
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall.
- Kern, D. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor*.
- Li, X.-q. (2006). Zero-Valent Iron Nanoparticles for Abatement of Environmental Pollutants: Materials and Engineering Aspects.
- Perry, R. H. (2001). *Manual del Ingeniero Químico* . Mc Graw Hill.
- Red colombiana de Metrología. (2011). Agitación Mecánica. *Revista química útil*.
- Saavedra, F. (1854). Manómetros y barómetros metálicos. *Revista de Obras Públicas*, Tomo I: (261-263).
- Scott, H. (2001). *Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas*. Prentice Hall.
- Smeaton, R. W. (1990). *Motores eléctricos, selección, mantenimiento y reparación*. MxGraw-Hill Interamericana de México.
- Üzüm, Ç. (2008). Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous  $\text{Co}^{2+}$  ions under various experimental conditions. *Chemical Engineering Journal*.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Acero\\_inoxidable](http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable)  
[http://www.utp.edu.co/~publio17/ac\\_inox.htm](http://www.utp.edu.co/~publio17/ac_inox.htm)