

ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY



Dear Sir:

ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY is an international publication Indexed Internationally, that comes to establish a narrow scientific relationship between Universities, Technological Institutes and the Industry as well as professionals and students of related areas in the whole world. Next we offer a list of the areas and features in which ADV. MAT. SCI. & TECH. is interested in. Articles are published in three issues per year which constitutes a volume. All articles are arbitrated; once accepted for their publication, they are sent by electronic mail to an international title list, including authors, summaries and key words, (for subscribe send a e-mail To: <materialsctech@gmail.com>. When each volume is closed, you will have received the corresponding accrued, then it proceed to the impression in order to be sent by air mail to our subscribers. In short time, Titles, Summaries and Bibliographies are placed in English languages, so they will be available from any part of the world through the Web address: WWW.CIRES.ORG.VE

AREAS OF INTEREST

Chemistry. Physics. All basic and applied aspects related to Chemistry and Physics, Solid State. New materials structure measurement and analysis, ceramics, semiconductors, semimetals, superconductors, surfaces and interfaces, magnetic materials, optical and electrical properties, alloys, thin films, depositions, cermets, defects study, catalysis, porous media, devices, nano-particles, analytical microscopy, electrochemistry, including technology and improvement in experimental set-up, process and techniques. Theoretical Physics. Relativity. Magnetism. Chaos. Fractals. Elemental Particles. Radiactive elements. Energy. Petroleum. Gas. Alternative Energy. Fluids. New Compounds. Systems.

ANUAL FREQUENCY

PROPOSED FUTURE CALENDAR

Publication	April 30 th	August 31 th	December 20 th
--------------------	--------------------	---------------------	-----------------------

The articles should be sent printed by duplicate with original and well-defined photographs, in separate sheets with their numeration clearly established to the margin or setback with blue pencil, accompanied by a letter directed to the Editor, asking to be considered for their publication in ADV. MAT. SCI. & TECH. Original print works are necessary to be sent to the referees. Figures and photographs will be kept in our files as a testimony of the editorial handling. Two months later you will receive the letter of recommendation for your acceptance and the corresponding considerations.

Articles, graphics or drawings shall be sent in micro floppy disks using well-known processor text format specifying the version. (i.e., WordPerfect, Wordstar, MS-Word for Windows [preferred]). Illustrations should be digitalized to a resolution not minor of 300 DPI (photographies and images to 600 DPI and 256 colours) and stored in formats TIFF, GIF, JPEG, BMP, PCX formats or a well-known instead. They could be sent by electronic mail (uu-encoded, attached, etc.). If so, we ask to contact us previously using our E-mail address: <materialsctech@gmail.com>. The text should be prepared having as reference the international publication norms. The distribution of ADV. MAT. SCI. & TECH. is GRATUITE, Internet ON LINE but we accept any collaboration.

CIPMAT
P.O. BOX 397
MÉRIDA 5101
VENEZUELA
FAX: (+58 74) 71 29 39

SWETS ZEITLINGER BV
P. O. Box 830
2160 SZ Lisse / HOLLAND
Tlf. +31 252 435 111
FAX: +31 252 415 888

EBSCO INDUSTRIES
TITLE INFORMATION DEPT.
P.O. BOX. 1431 BIRMINGHAM
AL U.S.A. 35201-1431
FAX: (205) 995-1586

Héctor F. Aguilar, Ed.,

ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY



DIRECTIVE COUNCIL

HÉCTOR F. AGUILAR
DIRECTOR & EDITOR IN CHIEF

LIESELOTTE O. E. HOEGER
ADVERTISING DIRECTOR/MANAGER
DIRECTORA ADMINISTRATIVA

RAFAEL F. AGUILAR H.
TECHNICAL DIRECTOR/MANAGER
DIRECTOR TÉCNICO

EDITORIAL BOARD

Pedro Grima Gallardo, Ph D
President of the Editorial Board

TING C. HUANG, PhD

IBM ALMADEN RESEARCH CENTER
SANTA BARBARA, CALIFORNIA
UNITED STATES OF AMERICA

GILLES LAMARCHE, PhD

OTTAWA CHARLETON INSTITUTE FOR
PHYSICS
FACULTÉ DES SCIENCES -
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE
UNIVERSITÉ D'OTTAWA 150 LOUIS-
PASTEUR CP450 SUCC A OTTAWA,
ONTARIO, CANADA K1N-6N5

SHIH-LIN CHANG, PhD

DEPARTMENT OF PHISICS
NATIONAL TSIN-HUA UNIVERSITY
HSINCHU, TAIWAN 300

HYWEL A. DAVIES, PhD

POSTGRADUATE ADMISSION TUTOR
DEPARTMENT OF ENGINEERING
MATERIALS
THE UNIVERTSITY OF SHEFFIELD
SHEFFIELD S1 3JD UNITED KINGDOM

HIDEO TORAYA, PhD

CERAMIC RESEARCH LABORATORY
NAGOYA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ASAHIGAOKA, TAJIMI 507, JAPAN

ERNESTO E. MARINERO, PhD

HITACHI SAN JOSE RESEARCH
LABORATORY 3403 YERBA BUENA
ROAD SAN JOSE, CA 95135. USA

JAA ENGELBRECHT, PhD

PROFESSOR, DEPARTEMENT FISIKA
UNIVERSITEIT VAN PORT ELIZABETH
POSBUS 1600 PORT ELIZABETH 6000
SUID-AFRIKA / SOUTH AFRICA

ESTEBAN BROITMAN, PhD

LABORATORIO DE PELÍCULAS
DELGADAS
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
1003 BUENOS AIRES, ARGENTINA

ANTOINE F. MULABA, PhD

METALLURGY DEPARTMENT
FACULTY OF MINING AND
METALLURGY
TECHNIKON WITWATERSRAND
POBOX 17011 DOORNFONTEIN,
JOHANNESBURG, SOUTH-AFRICA

LEONEL COTA ARAIZA, PhD

CENTRO DE NANOCIENCIAS Y
NANOTECNOLOGIA, UNAM, ENSENADA
A. P. 2681 - 22800, ENSENADA B.C.
MÉXICO

ADVANCES IN
MATERIALS
SCIENCE & TECHNOLOGY



International Journal

INDEXED IN

CHEMICAL ABSTRACTS

CHEMICAL ABSTRACTS SERVICES CODEN AMSTFY

CAMBRIDGE SCIENTIFIC ABSTRACTS CSA

METALS ABSTRACTS / METADEX

ENGINEERED MATERIALS ABSTRACTS

ALUMINUM INDUSTRY ABSTRACTS

CERAMIC ABSTRACTS

CORROSION ABSTRACTS

MATERIALS BUSINESS FILE

STEEL ALERTS

NONFERROUS METALS ALERT

POLYMERS/CERAMIC/COMPOSITES ALERTS

VINITI ALL RUSSIAN SCIENTIFIC INFORMATION

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE

ULRICH INTERNATIONAL PERIODICALS DIRECTORY

LATINDEX

LANIC

OTROS

ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE & TECHNOLOGY



CONSTANCIA

Mérida 26 de Febrero de 2013

Mediante la presente se hace constar que el artículo titulado

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN HOMOGENEIZADOR DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS PARA LOS COHETES-SONDA ULA

Autores

**CARLOS EDUARDO SERRANO RAMOS, LEONARDO LACRUZ,
VICENTE MARCANO, JOHN FERREIRA & MARIA A. PARCO-BRIZUELA**

Ha sido aceptado para su publicación en la revista

ADV. MAT. SCI. & TECH. VOL 7, ABRIL 2013

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Héctor F. Aguilar'.

Héctor F. Aguilar, Ed.,

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN HOMOGENEIZADOR DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS PARA LOS COHETES-SONDA ULA

CARLOS EDUARDO SERRANO RAMOS¹, LEONARDO LACRUZ^{1,2}, VICENTE MARCANO^{1,2,3}, JOHN FERREIRA^{1,2}, MARIA A. PARCO-BRIZUELA^{1,2}

¹ Grupo de Ciencias Atmosféricas y del Espacio, Facultad de Ciencias, Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela

² Comisión Rectoral para el Programa de Ciencias Espaciales, Edif. CIAE-TELMAG, La Hechicera Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela

Autor de correspondencia: <vicente.marcano@gmail.com>

RESUMEN

Se llevó a cabo una investigación sobre el comportamiento de un conjunto de reactivos que son empleados en la preparación de propelentes sólidos para cohetes correspondientes al Proyecto Institucional Cohete Sonda ULA, a fin de elaborar una propuesta para la construcción de una máquina homogeneizadora de estos combustibles. Tomando en cuenta la reducción de costos, la facilidad de fabricación y desempeño de las máquinas, se desarrolló un diseño el cual presta además atención a una serie de requerimientos establecidos por el Proyecto Cohete Sonda ULA. Finalmente se cumplió con la etapa de manufactura del homogeneizador.

Palabras claves: Síntesis de combustible sólido, homogeneización de mezclas, cohetes sondas

ABSTRACT

A research about the performance of chemical compounds which are utilized in the synthesis of solid propellants for rockets corresponding to the Sounding Rocket ULA Project was carried out with the purpose to elaborate a proposal for the construction of a homogenize machine. A design was developed taking in account criteria such as inexpensive materials, versatile manufacture and high performance

which to bring special attention to the established requirements by the Sounding Rocket ULA Project. Finally, the construction of the homogenize machine was carried out.

Key words: synthesis of solid propellant, homogenization of chemical reactive, sounding rockets

1. INTRODUCCION

A partir de enero de 2005 con el apoyo del Rectorado de la Universidad de los Andes (ULA), se conformó un equipo de investigadores multi- e interdisciplinario el cual ha venido trabajando en el desarrollo de un cohete propulsado por combustible sólido con aplicaciones científicas y que ha sido bautizado con el nombre de cohete sonda-ULA. Este equipo representa la primera iniciativa del sector científico-universitario de la Republica Bolivariana de Venezuela para el desarrollo de cohetes sonda totalmente diseñados y construidos en el país. Según Informe Técnico de la Comisión Rectoral para el Programa de Ciencias Espaciales de la ULA (2011), se han realizado con éxito el lanzamiento de seis cohetes experimentales que permiten estudiar los aspectos de la física, química y biología atmosférica.

En el mes de diciembre de 2006 el equipo de investigadores de la ULA junto a expertos del Centro de Investigación y Desarrollo Aeronáutico (CIDAÉ) de la Aviación Militar Bolivariana, realizaron la primera prueba de rendimiento aerodinámico y propulsión de los cohetes serie ULA, presentándose durante el vuelo la falla de los pernos de anclaje de la tapa del motor. En abril de 2007 el equipo de la ULA realizó la segunda prueba de rendimiento aerodinámico obteniendo resultados satisfactorios al alcanzar una altura de aproximadamente 2 km con el cohete ULA-1-A. En febrero de 2008 el CIAE llevo a cabo la tercera prueba de rendimiento aerodinámico y propulsión. En esta ocasión un cohete denominado ULA-1-B mostró un desempeño óptimo alcanzando una altura cercana a los 8000 metros en un tiempo de vuelo de 31 segundos. En noviembre

de 2011, al realizarse la cuarta prueba de rendimiento aerodinámico y propulsión, un cohete denominado Bicentenario en vuelo supersónico logró superar los 20 km de altura, alcanzando la estratosfera. Además en esta prueba el CIAE-ULA prueba con éxito sus sistemas de recuperación de carga útil y realizó experimentos para la inducción de lluvia artificial (Marcano *et al.*, 2009; Parco *et al.*, 2013a y b; Lacruz *et al.*, 2013).

El Proyecto Universitario Cohete Sonda ULA está planificando elaborar motores tipo cohete con mayor empuje que permitan alcanzar alturas entre 60 y 200 km para obtener datos más completos de nuestra atmosfera y como meta a mediano plazo, posicionar un nanosatélite en órbita baja; para ello se necesita experimentar con nuevos combustible que ofrezcan mejores propiedades.

En dicha experimentación se requiere de nuevos equipos que por sus características son difíciles de adquirir en el mercado, por lo que deben ser elaborados por la institución. Entre estos equipos destaca un homogeneizador que permita procesar cantidades de hasta 20 kg de combustible. Para que el proceso de homogenización sea efectivo el equipo debe diseñarse para periodos de funcionamiento prolongados, pues el proceso puede requerir algunas horas trabajando a bajas velocidades y debe evitarse el calor generado en el proceso para evitar la ignición y además debe contar con una válvula para el desalojo de la mezcla homogeneizada.

En relación a los mezcladores de combustible sólido el Informe “*Missile Technology Control Regime*” (MTCR 2010) señala:

Los componentes más distintivos de una mezcladora son el recipiente y el montaje de la cuchilla de mezcla. Los recipientes son generalmente de 0.75 a 1 metro de profundidad y de 1 a 2 metros diámetro pero puede ser significativamente mayor para mezcladores de más de 450 galones. Pueden ser de doble pared; la pared interior está hecha de acero

inoxidable pulido y la pared exterior está hecha generalmente de acero laminado en frío, a veces pintado. El espacio entre las paredes es utilizado para la circulación de agua como refrigerante.

De lo anterior, y por las características de la mezcla, se desprende la necesidad de usar acero inoxidable para la elaboración del recipiente. Budynas y Nisbett (2008) señalan “Es de esperar que las partes que operan en una atmosfera corrosiva tengan una menor resistencia a la fatiga.”. Incluso los aceros inoxidables se oxidan, formándose en ellos una tenue película de oxido de cromo que constituye una barrera contra los ataques de la corrosión, sin embargo, un mal tratamiento térmico del acero inoxidable le hace susceptible a corrosión intergranular que podrá ser causa de fracasos en condiciones muy corrosivas

Para reducir el calor generado en el proceso producto del roce entre el fluido, las partículas sólidas, los elementos de mezclado y el recipiente, es necesario trabajar a bajas revoluciones, lo cual trae como ventaja el descarte de un sistema de refrigeración, simplificando así el diseño y la fabricación del equipo mencionado. Así mismo, se puede alejar el elemento motriz del recipiente para reducir la transferencia de calor hacia el mismo.

En motores eléctricos de inducción comerciales entre 1 y 5 hp se puede comprobar que las rpm en vacío dadas por el fabricante se ubican entre 2000 y 4000 (Chapman, 1987). Para lograr un régimen bajo de revoluciones es necesario el uso de un sistema de reducción, para el cual se debe buscar un medio de transmisión adecuado a la situación planteada.

El manejo de combustibles está sujeto a restricciones ambientales establecidas en convenios internacionales sobre el uso de productos químicos, lo que limita la utilización de estas sustancias y se requiere que su uso no

perturbe considerablemente al medio ambiente (Asamblea Nacional de la Republica Bolivariana de Venezuela, 2001).

No obstante, según el Informe Técnico de la Comisión Rectoral para el Programa de Ciencias Espaciales de la ULA (2011), el Proyecto Cohete Sonda ULA cuenta con el apoyo del CIDAЕ de la Aviación Militar Bolivariana y con el permiso de parte de la Dirección de Armamento y Explosivos (DAES) de la Fuerza Armada Bolivariana.

El objetivo del presente trabajo es diseñar y fabricar un homogeneizador de combustibles sólidos para cohete sonda que cumpla con los requerimientos establecidos por el Proyecto Institucional Cohete Sonda ULA y con las normas de seguridad que amerita el proceso.

Entre los objetivos específicos se encuentran:

1. Comparar entre diferentes tipos de homogeneizadores para establecer las bases de diseño y fabricación del equipo en cuestión.
2. Diseñar el homogeneizador en base a las partes y materiales que se pueden adquirir en el país.
3. Simular el equipo diseñado usando una herramienta computacional.
4. Minimizar los costos de fabricación.

Con este proyecto se pretende colaborar con el progresivo crecimiento del Proyecto Institucional Cohete Sonda ULA. El éxito de esta investigación no solo depende del correcto funcionamiento mecánico de la máquina en sí, también depende de que el objetivo para el cual se ha diseñado sea cumplido, es decir, que se pueda obtener un combustible que cumpla con las especificaciones requeridas para un correcto quemado.

De obtenerse resultados positivos con este homogeneizador, esta tecnología podría ser usada por otras instituciones como universidades y organismos gubernamentales que deseen encaminarse en el desarrollo de cohetes.

2. COMBUSTIBLES SÓLIDOS

En el ámbito de las ciencias espaciales el sistema de propulsión suministra la maniobrabilidad, velocidad y alcance de un vehículo espacial. Los sistemas modernos de propulsión tienen diversas formas pero en todas se convierte una fuente de energía en una corriente de alta velocidad controlada de partículas para producir fuerza. A pesar de que diferentes tipos de energía tales como: energía solar, energía nuclear y energía eléctrica; se consideran útiles para la propulsión, ha sido la energía química la que ha tenido amplia aceptación en sistemas de propulsión de cohetes.

Los cohetes de combustible sólido son los más sencillos para diseñar y construir por eso se han utilizado por siglos. A lo largo de la historia de la humanidad, muchos investigadores entusiastas de la propulsión, han probado muchos combustibles, cambiando los tipos de reactivos, los porcentajes de estos, el tamaño de las partículas, en búsqueda del mejor propelente (Avallone y Baumeister).

En el siglo pasado la ciencia e ingeniería comenzó a darle al combustible sólido una gran importancia, sobre todo en la época de la carrera espacial, evidenciándose esto en la gran cantidad de publicaciones técnicas y científicas. Aún hoy muchas de estas publicaciones tienen vigencia, con algunas modificaciones. Según los reactivos empleados para formular el propelente sólido, estos se clasifican en dos grupos (Kubota, 2001):

- 1) *Propelentes sólidos compuestos*: posee partículas de reactivo oxidante suspendidas en una matriz de combustible, el cuál puede ser resinas, azúcares, entre otros.
- 2) *Propelentes sólidos de base doble*: consiste en nitrocelulosa sólida disuelta en nitroglicerina, con trazas de otros aditivos. Estos propelentes son altamente explosivos.

Según Fordham (1980):

Los propelentes sólidos, tipo compuesto, poseen tres componentes principales: una porción orgánica que es rica en carbono e hidrógeno, conocido como el aglutinante, que sirve como un aglutinante y un generador de gas, una sal Inorgánica oxidante, rica en oxígeno, y un metal que actúa como catalizador.

La mayor parte de la información que se tiene sobre la composición, preparación, manipulación y características termodinámicas de estos combustibles proviene de patentes divulgadas de investigaciones realizadas por estudiosos del área (Hendel, 1965; Jagiello, 1965; Brew y Price, 1979; Allen, 1982; Doll *et al.* 1991; Cai *et al.* 2008). En base a esta información se pueden mencionar un conjunto de mezclas ampliamente probadas en la cohetería:

- Perclorato de amonio (70%) + resina (14%) + aluminio (16%): $\rho=1768\text{kg/m}^3$
- Nitrato de potasio (68%-70%) + resina (22%-24%) + oxido de hierro (8%): $\rho=1845\text{kg/m}^3$
- Parafina líquida (85%-90%) + aluminio (10%-15%): $\rho=882\text{Kg/m}^3$
- Nitrato de potasio (65%) + sacarosa (35%): $\rho=1887\text{ Kg/m}^3$
- Nitrato de Amonio (40%-70%) + Magnesio (16%-36%) + Polioxipropilenglicol (12%-18%): $\rho=1712\text{ kg/m}^3$.

Los porcentajes dados de estas mezclas corresponden a concentraciones en masa.

Dentro de los propelentes sólidos es muy utilizado el polvo de aluminio (Baschung *et al.*, 2011) que tiene un excelente rendimiento y una mayor facilidad de uso que otros polvos. Como oxidante el más utilizado es el perclorato de amonio, también es común el uso de nitrato de amonio y recientemente se ha puesto en uso dinitramida de amonio, con mejor rendimiento que el perclorato de amonio, aunque es menos abundante y su uso es más complejo (MTCR, 2010).

El aglutinante usado en propulsores sólidos es normalmente un caucho sintético y entre los más comunes se pueden mencionar: polibutadieno terminado en hidroxilo (HTPB), carboxilo polibutadieno terminado (CTPB) y polibutadieno-polímero de ácido acrílico (PBAA). Poliésteres tales como el polipropilenglicol también suelen ser usados como aglutinante (MTCR, 2010). Además de actuar como carburante, el aglutinante da una resistencia mecánica adecuada a la mezcla (Fordham, 1980).

Los propelentes sólidos tienen la característica de deflagrantes, es decir, “son bajos explosivos cuya descomposición es controlada y relativamente lenta con el objetivo de darle el tiempo suficiente a la presión de los gases producidos sin destruir el dispositivo de lanzamiento ni el elemento a propulsar” (Fordham, 1980).

3. HOMOGENEIZACIÓN

Bhavsar (2011) define a la “máquina de homogeneizado” de la siguiente manera:

El homogeneizador es un dispositivo usado en el laboratorio para la homogeneización de los diversos tipos de material, para dispersar y mezclar los alimentos, productos químicos, productos farmacéuticos y biotecnológicos. Un homogeneizador es una máquina que toma una sustancia y hace que sea de una consistencia uniforme y ayuda a reducir la separación.

La homogeneización es un término genérico que se refiere al tratamiento de una mezcla para que sea uniforme y es usado en muchas aplicaciones científicas e industriales. Varios equipos con diferentes tecnologías para la dispersión y mezcla son usados para dispersar, homogeneizar, emulsionar, suspender, molienda en húmedo, formación de gases, preparación de muestras, aceleración de reacciones. La homogeneización abarca entonces un área amplia, cuando alguien se refiere a este proceso puede estar haciendo referencia a alguno de los procesos antes mencionados.

4. PREPARACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS

En el proceso de homogeneización de combustibles sólidos se deben tener en cuenta ciertos cuidados, un proceso inadecuado puede llegar a provocar la ignición de la mezcla y en casos particulares se corre el riesgo de explosiones (Fordham, 1980).

Los métodos de fabricación investigados contemplan que el proceso se realice a temperaturas entre 40 y 120°C, según algunas patentes revisadas, pero se debe tener en cuenta que estas mezclas no deben entrar en contacto directo con llama ni con ningún objeto o medio que pueda estar a la temperatura de ignición, la cual varía según el propelente. Algunos métodos de calentamiento usados son las camisas de agua y resistencias eléctricas debidamente ubicadas (MTCR, 2010).

Es importante señalar que en el proceso de homogeneización de propelentes del tipo que se desea trabajar no se puede hablar de disolución, no hay soluto ni solvente, por las características apróticas de los compuestos involucrados, es decir, no aceptan ni ceden protones. Se habla de una homogeneización como una correcta y consistente distribución de las partículas del oxidante y demás componentes en el aglutinante.

Para obtener un combustible de características apropiadas es necesario entonces adecuar la distribución de las partículas dentro de la mezcla, tomando en cuenta el tamaño de partícula del oxidante y de la viscosidad del aglutinante. Desde el punto de vista del tamaño de las partículas se logra una mejor distribución de estas en la medida en que su tamaño sea menor (Kubota, 2001). Se habla de grana como el término utilizado para definir el diámetro de partículas submicroscópicas y microscópicas. En el caso del reactivo que se denomina oxidante este diámetro debe estar por debajo de las 100 micras. Si el tamaño de las partículas de oxidante excede el valor mencionado se presentan problemas de inestabilidad del propelente ante la presencia de electricidad estática, pudiendo haber peligro de ignición. En el caso del aglutinante-carburante no existe el problema de definir el tamaño de la partícula ya que este generalmente es una resina (Marcano et al., 2009).

De una mezcla óptima también depende la calidad del quemado y una correcta velocidad de la combustión, lo que a su vez determina el lograr un empuje óptimo para un motor con una configuración determinada. El procedimiento empleado en el proyecto Universitario Cohete Sonda ULA para la preparación del combustible, consiste en el mezclado del oxidante y el carburante por agitación manual en un recipiente plástico, previo a esto se ha realizado la trituration. Se procede luego a calentar la mezcla a unos 100°C (figura 4.1a) manteniéndola en constante agitación por un espacio aproximado de 30 minutos, hasta obtener una pasta acaramelada de color uniforme producto de la fundición del azúcar como se muestra en la figura 4.1b.



Figura 4.1a.

Figura 4.1b.

Terminado el proceso de mezcla se procede a verterla en el motor o en algún molde para formar lo que se conoce como grano. El grano se refiere a la carga de combustible, sin importar cual sea su tamaño, esta denominación se mantiene. Al ser vertida, la mezcla es sometida a constante agitación y presión para evitar la acumulación de burbujas y compactar por igual todo el contenido.

La forma del grano dependerá del molde y una vez endurecido el aglutinante este debe poseer la suficiente resistencia mecánica que permita manipular el grano sin que se fracture. Un ejemplo de grano propulsor se muestra en la figura 4.2.



*Figura 4.2. Grano propulsor de combustible sólido
(Tomada del MTCR, 2010)*

En la figura 4.3 se muestra un pequeño grano de 500 gramos de nitrato de potasio y sacarosa preparado en el CIAE para una prueba en estática del motor ULA 1-A.



Figura 4.3 Grano elaborado en el CIAE.

Los granos de combustible sólido poseen una perforación central, la cual puede poseer una amplia variedad de formas tales como circular, estrella, hueso, cruz, dendrita, entre otras. La forma del núcleo también tiene una profunda influencia en el perfil de la curva empuje tiempo (Nakka, 2005). La forma de esta perforación puede lograrse directamente con el molde o mediante el mecanizado del grano. La figura 4.4 muestra algunas configuraciones de grano y su perfil empuje-tiempo.

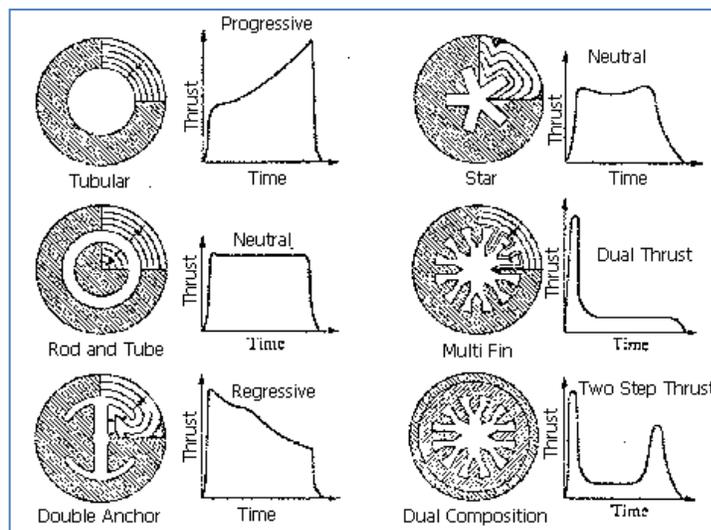


Figura 4.4 Forma del núcleo central de granos de propelente sólido.

(R. Nakka)

5. EQUIPOS DE HOMOGENEIZACIÓN

Los equipos e infraestructura necesaria para la producción de combustibles sólidos son elementos complejos y especializados. Las instalaciones y equipos son necesarios para la preparación de los diversos ingredientes propulsantes, mezcla y manejo, colada y curado del propelente y otras operaciones especializadas como prensado, mecanizado y pruebas de aceptación (Fordham, 1980).

Los homogeneizadores de combustibles sólidos son máquinas capaces de manejar materiales muy viscosos. Se derivan de las máquinas usadas para

mezclar la masa del pan. Su finalidad es la de manejar líquidos y polvos de diferentes densidades y convertirlos en una mezcla uniforme (MTCR, 2010).

La mezcla puede hacerse por lotes, es decir, agregando progresivamente las sustancias a la máquina ó por mezcla continua agregado simultáneamente los ingredientes en sus proporciones correctas a la cámara de mezcla. (MTCR, 2010).

El elemento motriz empleado para los mezcladores de propelentes es un motor eléctrico, unido directamente o a través de un sistema de reducción a los elementos de mezcla. Un homogeneizador debe contar con un conjunto de elementos agitadores ubicados en la cámara de homogeneizado, estos se mueven dentro de la mezcla induciendo movimientos radiales, tangenciales y axiales al fluido, estas palas se encargan de barrer el fondo y la pared del recipiente contentivo de la mezcla a homogeneizar, involucrando en el proceso a toda la masa y manteniéndola en constante movimiento. Los elementos de mezcla empleados no se diferencian mucho de los usados en otros procesos de homogeneización, excepto por la necesidad de que sean de un material resistente a la corrosión, el más usado es el acero inoxidable pulido (Fordham, 1980)

A continuación se explican algunos conceptos de interés asociados al diseño y fabricación de un homogeneizador.

5.1 Potencia

Las características del material mezclado junto con las características de las cuchillas y su velocidad determinan la potencia requerida por la máquina. Esta potencia también se ve grandemente influenciada por el valor de revoluciones por minuto de trabajo de la máquina, siendo la potencia directamente proporcional a las rpm (Beer, F. 1981).

Según Potter y Wiggert (2004) “Cuando un cuerpo se mueve dentro de un fluido se produce una fuerza en sentido contrario al movimiento de dicho cuerpo”.

En un mezclador esta fuerza se traduce en un momento torsor que debe vencer el motor. Si se trata de un fluido esta fuerza está relacionada directamente con la viscosidad del mismo y un coeficiente de arrastre C_D que depende del número de Reynolds y del tipo de elemento agitador que se utilice. Si se trata de un material granular las fuerzas dependen del coeficiente de fricción interna del grano y del coeficiente de fricción del material con los elementos de mezcla y las paredes del recipiente.

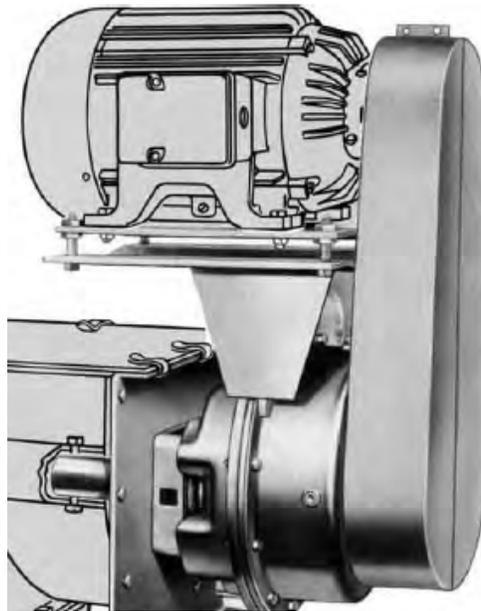
5.2 Sistemas de transmisión de potencia

Para la transmisión de torque de una máquina motriz a una máquina conducida, existen al menos tres métodos muy utilizados; transmisión con engranajes, correas flexibles de caucho reforzado y cadenas de rodillos (Provenzano, 2006). En las máquinas usadas para homogeneizado es más común el uso de engranajes y de poleas. Los engranajes se usan generalmente cuando la potencia a transmitir es alta y cuando se requieren cajas de reducción de velocidad variables. Las correas representan un medio de transmisión más sencillo y además requieren de menos cuidados de precisión en el diseño y las poleas son económicas respecto a los engranajes.

Ventajas de los sistemas de transmisión por correas:

- Larga duración de vida
- Bajos niveles de ruido durante el funcionamiento.
- Servicio y ajuste fácil y de coste reducido.
- Funcionamiento en seco, no se necesita suministro de aceite.
- Alto índice de rendimiento.

El sistema de transmisión por correas es de importancia para este proyecto pues es el sistema considerado desde el principio por las ventajas mencionadas, además es ampliamente utilizado en este tipo de máquinas. Un ejemplo de ensamblado se muestra en la figura 5.1.



*Figura 5.1 Ensamblaje de transmisión de un homogeneizador.
(Screw Conveyor Corporation)*

5.3 Cámara de homogeneizado

Es el recipiente donde se lleva cabo el proceso de homogenización, en esta se encuentran los agitadores y en caso de ser necesario se ubican instrumentos de medición de temperatura, humedad y presión.

El material del recipiente de mezcla debe lidiar con la abrasión causada por las partículas de los componentes de la mezcla y con la corrosión asociada a estas sustancias. Es por esto que generalmente sea cual sea el oxidante y el tamaño del equipo se recomienda el uso de acero inoxidable.

6 METODOLOGÍA

6.1 Consideraciones de diseño

El primer paso fue tomar en cuenta los siguientes aspectos: resistencia a la corrosión, la seguridad, fácil fabricación (respecto a los procesos de manufactura disponibles en el taller y disponibilidad de partes y materiales), bajo costo y la facilidad para realizarle mantenimiento.

6.2 Métodos de recolección de información

Se recolectaron datos, procesos y recomendaciones relacionadas con el proceso de diseño y manufactura de los homogeneizadores en las fuentes que se indican a continuación.

6.2.1 Revisión de equipos similares

El proceso de búsqueda de alternativas se inició con una revisión de diferentes máquinas relacionadas. Esta revisión consistió en la búsqueda de locales comerciales donde se encuentran principalmente máquinas de mezclado para la elaboración de pan. Como ya se mencionó las máquinas de mezclado fueron similares en las distintas áreas de producción. De la observación de estas máquinas surgieron algunas de las ideas principales aplicadas al diseño final del homogeneizador.

6.2.2 Manuales técnicos y trabajos relacionados

Consistió en la revisión de manuales desarrollados por algunas empresas dedicadas a la fabricación de homogeneizadores y máquinas destinadas a la manipulación de mezclas con características similares a los propelentes sólidos (densidad, viscosidad, textura). De igual manera se realizó el estudio de algunos trabajos similares publicados en la web, casi en su mayoría estos trabajos tratan de máquinas destinadas a la mezcla de concreto.

6.2.3 Preparación de muestras de combustible

Se prepararon algunas muestras de la mezcla del nitrato de potasio (oxidante con el que se contaba), resina epoxy y oxido de hierro para observar su aspecto, concluyendo que el tipo de homogeneizador debe permitir manejar una mezcla pastosa de aspecto granular como las de nitrato de potasio y perclorato de amonio y también permitir manejar mezclas menos viscosas como la del combustible a base de parafina. Si bien es cierto que se tiene como prioridad el uso de oxidantes como perclorato de amonio, nitrato de amonio y nitrato de potasio, no se descarta la posibilidad de usar otros tipos de combustibles.

6.3 Análisis de alternativas

El uso de herramientas como Autocad e Inventor fue fundamental para elaborar los planos empleados en la fabricación. En la evaluación de las distintas alternativas se realizaron cálculos que definen aspectos importantes como el consumo de potencia y la cantidad de material a emplear en la fabricación. En este punto también se analizó la dificultad para manufacturar los elementos correspondientes a cada alternativa, ¿con que máquinas y herramientas se cuentan para elaborar las partes de la máquina? y la facilidad de conseguir los elementos que no puedan fabricarse dentro del taller.

6.4 Producción

El fin último de esta investigación fue la construcción del prototipo. Para la manufactura del prototipo se emplearon las máquinas y herramientas disponibles dentro del taller del CIAE-ULA. Se busca el aprovechamiento de algunos materiales disponibles en el taller para de esta manera reducir los costos de la máquina.

7 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

A continuación se presentan las alternativas que se tomaron como posibles soluciones al problema planteado.

7.1 Homogeneizador planetario

Consta de un rotor central ubicado verticalmente alrededor del cual se mueve otro rotor que se traslada y rota con la ayuda de algún mecanismo. Este tipo de máquinas se usan con éxito en la mezcla de concreto y también se usa en la homogeneización de combustibles sólidos (figura 7.1). Una característica de este tipo de máquinas es que la cámara de mezcla debe ser cilíndrica para aprovechar eficientemente el recorrido del rotor planetario (MTCR, 2010).



Figura 7.1 Homogeneizador planetario (MTCR, 2010)

El modelo planteado como alternativa se muestra en la figura 7.2.

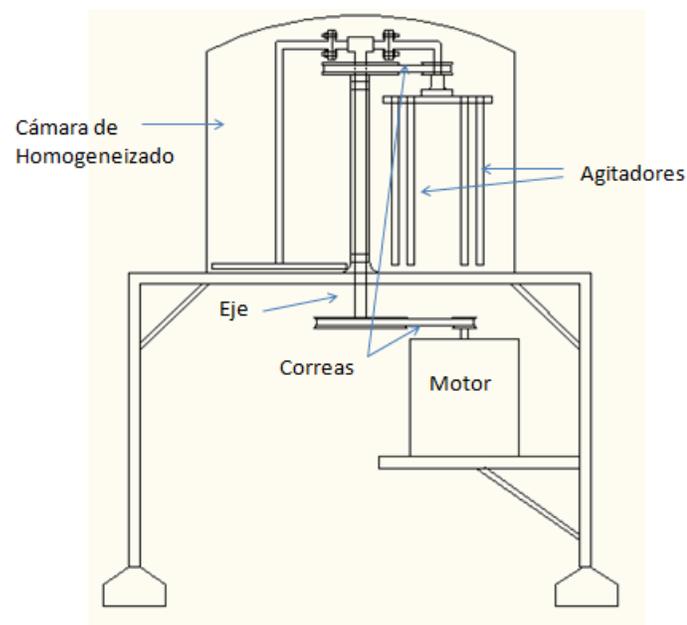


Figura 7.2 Homogeneizador planetario propuesto como alternativa

En este modelo planteado además de las palas del rotor planetario también se tiene una cuchilla encargada de barrer el fondo del recipiente para lograr la interacción de toda la mezcla evitando la acumulación en ese sector de un porcentaje de reactivos no homogeneizados.

Ventajas:

- Buen desempeño con fluidos.
- El sistema planetario ya ha sido probado en homogeneizadores de combustible sólido.
- Mantenimiento relativamente sencillo.

Desventajas:

- Dificil fabricación.
- Costo elevado (cantidad de material).
- Alto consumo de potencia.

7.2 Doble Rotor con cilindros

Esta máquina se basa en un diseño de un mezclador para sustancias muy viscosas, consta de dos cilindros contrarrotatorios que ayudados por la viscosidad de la sustancia, la hacen pasar a través de unos peines que son los que realizan la distribución de las partículas. Su uso se restringe prácticamente a fluidos por lo que para combustibles sólidos se prevé que los cilindros no logran hacer circular las partículas de oxidante resultando una posible acumulación de éste en el fondo del recipiente (ONDERZOEKINGSINSTITUUT RESEARCH, 1985).

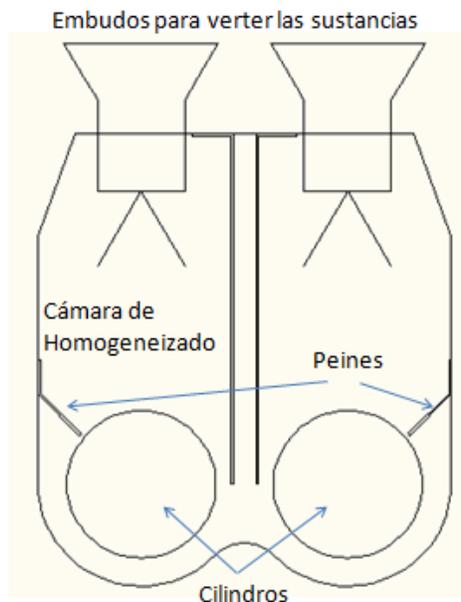


Figura 7.3 Homogeneizador de doble rotor con cilindros contrarrotatorios.

Ventajas:

- Fácil fabricación
- Poco consumo de potencia

- Fácil mantenimiento

Desventajas:

- Pobre desempeño
- Costo elevado (necesita más acero inoxidable que otros)

7.3 Doble rotor de cuchilla helicoidal

Este diseño consta de dos palas horizontales, también contrarrotatorias, con una forma helicoidal, es usada para la elaboración de masa por lo que representa una buena opción para el tipo de mezcla que se quiere tratar. La forma del recipiente es similar al modelo anterior.



Figura 7.4 Homogeneizador de doble cuchilla helicoidal

Ventajas:

- Fácil Fabricación
- Bajo costo
- Fácil mantenimiento
- Poco consumo de potencia

Desventajas

- Sus elementos no barren la mayoría del recipiente.

7.4 Doble tornillo sin fin

Este modelo reúne características de los modelos anteriores en cuanto a la forma y disposición del recipiente y el uso de dos elementos para la mezcla.

Consta de un arreglo horizontal de dos tornillos sin fin, pueden hacerse contrarrotatorios o invertir el sentido de las hélices y hacerlas girar en el mismo sentido. Con los sin fin se busca crear una circulación de la sustancias en dirección opuesta, aprovechando el buen desempeño de estos elementos para el transporte (Avallone y Baumeister, 1995), de esta manera, se crea en el centro una constante interacción de las partículas.

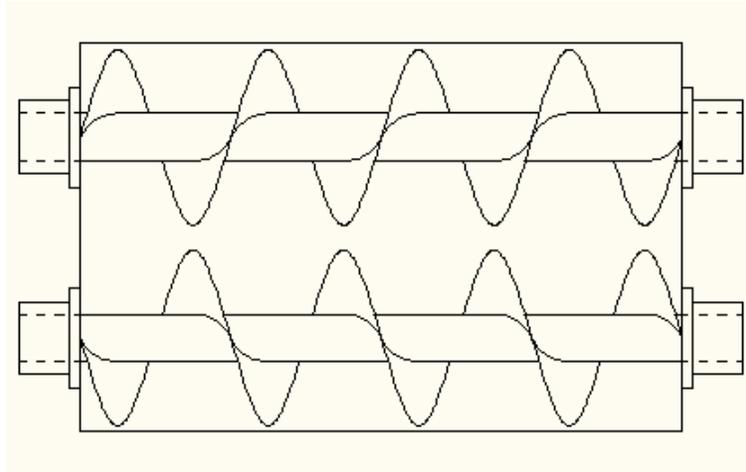


Figura 7.5 Arreglo de doble tornillo sin fin con hélices invertidas.

Ventajas:

- Los sin fin transportan cualquier tipo de material
- Consumo de potencia moderado
- Bajo costo
- Fácil Mantenimiento

Desventajas:

- Difícil manufactura (no se cuenta con una máquina adecuada para elaborar las hélices).

8 SELECCIÓN

Las ventajas y desventajas presentadas en la sección 5.1 fueron planteadas como comparaciones de características positivas y negativas entre un modelo y otro. Algunas consideraciones de diseño como la resistencia a la corrosión se aplica a cada máquina por igual, sea cual sea el modelo se debe usar acero inoxidable por lo explicado en el punto 3.4.3, por lo que no se establece diferencia

de material entre los modelos, no obstante, la cantidad de material usado para cada uno significa un mayor o menor costo, lo cual si es importante. El sistema de transmisión no es determinante debido a que la transmisión de potencia se hace de manera similar en todos los modelos, sin embargo, en el homogeneizador de tornillo sin fin se tiene la ventaja de que ambos rotores pueden girar en el mismo sentido, lo cual facilita la conexión mediante correas. En base a la información recabada se elaboró una matriz de selección tomando en consideración características como costo, manufactura y desempeño.

Tabla 8.1 Matriz de selección de la alternativa.

	Mantenimiento	Costo	Manufactura	Desempeño	Rango
Factor de ponderación	0.15	0.25	0.25	0.35	1
Modelo 1	5	3	3	6	4,35
Modelo 2	8	4	6	4	5,1
Modelo 3	7	7	9	6	7,15
Modelo 4	6	7	6	9	7,3

Se decide entonces elaborar un homogeneizador de doble rotor con tornillos sin fin ya que este tiene como principal ventaja la versatilidad al poder manejar una gran cantidad de materiales, de ahí su uso en el transporte de fluidos, material granular, materiales abrasivos, etc. Esto supone por lo tanto un mejor desempeño respecto a los requerimientos de diseño sobre las otras máquinas.

9 DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

9.1 Medidas del recipiente

Los combustibles presentan propiedades distintas. Para determinar las dimensiones interesa principalmente la densidad. Conociendo la masa y la

densidad de una sustancia se puede determinar el volumen que ocupa a cierta temperatura, en este caso las estimaciones se realizan a una temperatura ambiente de 25°C. Para ese particular se tiene como base el requerimiento de homogeneizar como mínimo una cantidad de 20 kilogramos de propelente.

En este diseño se pretende que la mayor cantidad de material se encuentre dentro del radio de acción de los sin fin para que la totalidad de la masa esté permanentemente en movimiento. Esto es importante para las mezclas a base de Nitrato de Potasio y Perclorato de amonio, ya que al tratarse de granos ligeramente humedecidos por la resina es fundamental la constante circulación para evitar el estancamiento de material.

Se realiza el cálculo del volumen necesario para 25 kg de cada una de las mezclas, obteniéndose los valores de la tabla 6.1.

El exceso de 5 kg se toma previendo el hecho de que la masa no estará compacta, por lo que existirán vacíos, también se prevé el espacio que ocupan los elementos de la máquina sumergidos. Los valores para las mezclas granulares son similares por lo que se trabaja con el valor de 14 litros. Se decide no tomar el valor de la parafina porque esta no se tiene como una alternativa principal como combustible de los cohetes. La zona barrida por la hélice del sin fin corresponde a la de un cilindro de su mismo diámetro, por lo que se asume que cada sin fin debe barrer un volumen de 7 litros para empezar a buscar entre el radio y la longitud unas dimensiones adecuadas. Las dimensiones en mm finalmente decididas se muestran en las figura 9.1a y 9.1b. Se toma un espacio de 2 cm entre la periferia de las hélices como zona para el enfrentamiento de corrientes generadas por las mismas, también se considera una holgura de 5mm entre la periferia de la hélice y el recipiente.

Tabla 9.1 Volumen para 25 kg de las diferentes mezclas.

Mezcla	Densidad (Kg/m ³)	Volumen para 25 Kg. (litros)
Perclorato de amonio+ resina + aluminio	1768	14,14
Nitrato de potasio + resina + oxido de hierro	1845	13,55
Parafina liquida + aluminio	882	28,36
Nitrato de potasio + sacarosa	1887	13,05
Nitrato de amonio + Magnesio + Polioxipropilenglicol	1712	14,60

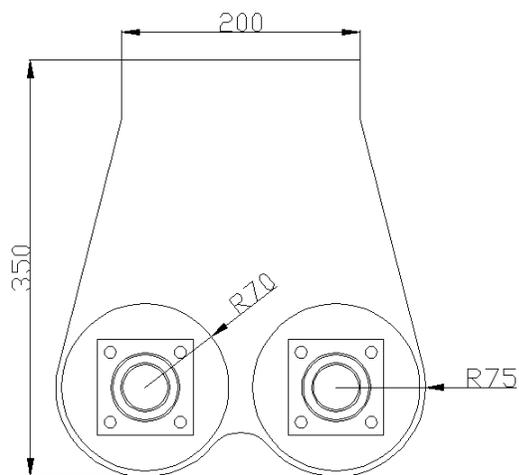


Figura 9.1a Medidas del recipiente (Vista Frontal).

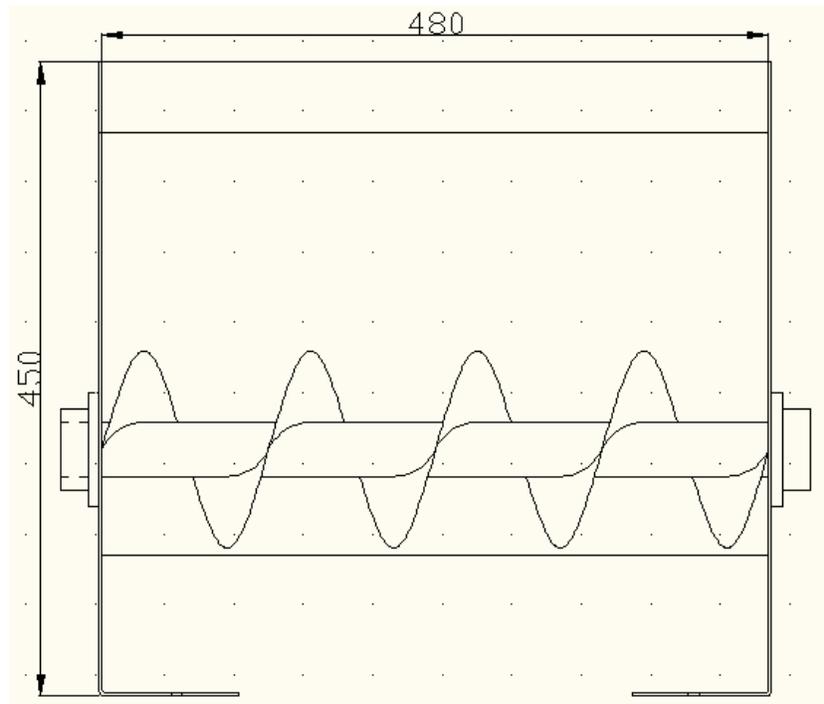


Figura 9.1b Medidas del recipiente (vista lateral).

En la figura 6.1b también se observa la extensión de las tapas del recipiente que se usan luego para ensamblar a la base de la máquina mediante pernos.

9.2 Base del homogeneizador

La base de la máquina ha sido definida de manera que resulte estable, y que permitiera el acoplamiento de los diferentes elementos, es decir, la unión al recipiente mediante 8 tornillos, el asiento del eje de transmisión y el asiento del motor. Los materiales usados son:

- Perfil UPN de 3" x 1 ½ ".
- Ángulo de 1".
- Ángulo de 1 ¼ ".
- Ángulo de 1 ½ ".

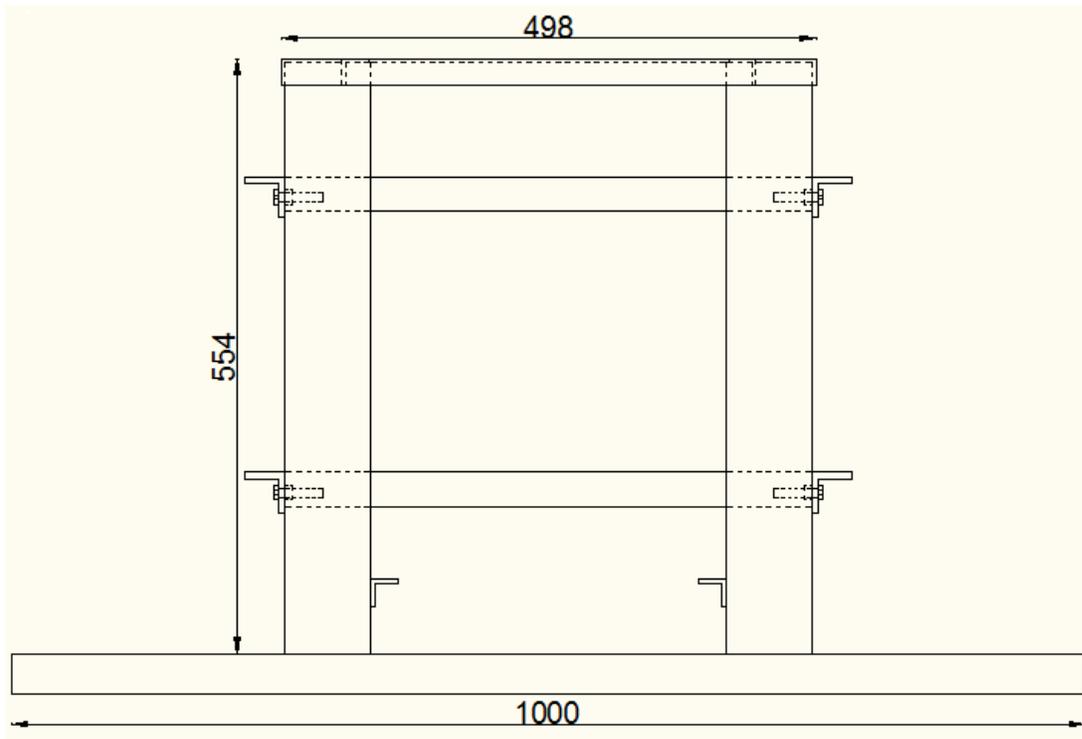


Figura 9.2 Medidas de la base (vista lateral).

La altura de la base ha sido establecida de manera que el recipiente quede en una posición cómoda para verter las sustancias en este. La altura total hasta el borde superior del recipiente es de 1,1 m.

En las figuras 9.2 y 9.3 se observa la ubicación de los asientos del eje y del motor, estos, pueden pivotar para permitir tensionar las correas de transmisión, por ello se dejó una ranura en uno de los lados para permitir así un rango de tensión.

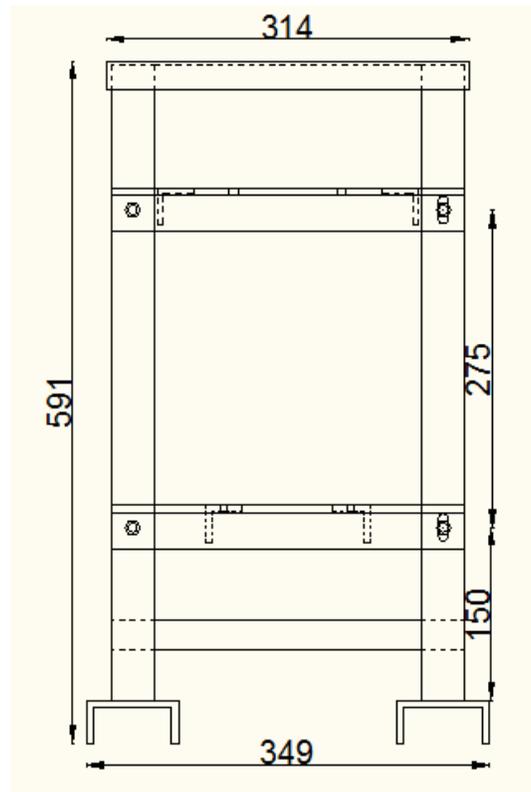


Figura 9.3 Medidas de la base (vista frontal)

La figura 9.4 muestra la forma de la base donde va acoplada al recipiente mediante 8 pernos.

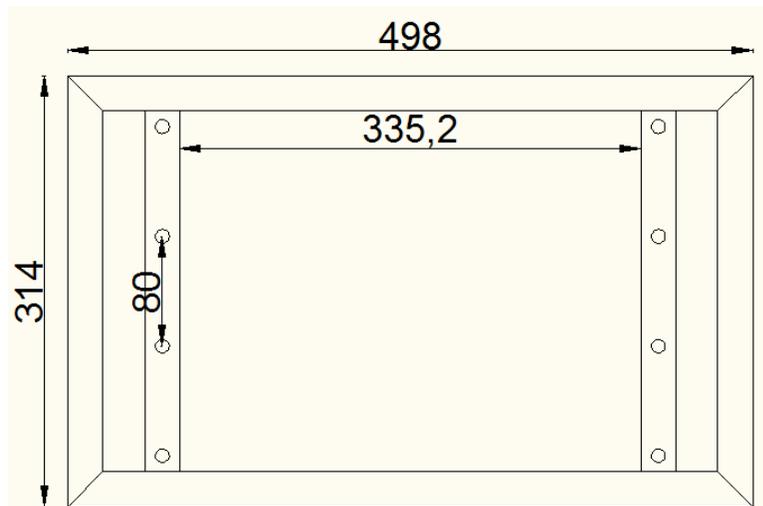


Figura 9.4 Vista superior de la base donde se une al recipiente (diseñada para ángulo de 1").

9.3 Potencia requerida

Para calcular la potencia requerida por el equipo se ha utilizado una expresión recomendada por Avallone (1995), expresiones similares se han encontrado en otros trabajos. Se calculó primero una potencia H, que luego se corrige con un factor de sobrecarga F_o y la eficiencia del medio de transmisión.

La expresión utilizada es la siguiente:

$$H = (H_{pf} + H_{pm}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$H_{pf} = (A * L * N) * 10^{-6} \quad \text{Ec. 2}$$

$$H_{pm} = (C * W * L * F) * 10^{-6} \quad \text{Ec. 3}$$

A es un factor de tamaño de hélice, tomado de la tabla 9.2 para un diámetro de 6 pulgadas (aproximado al diámetro usado) su valor es de 54.

Tabla 9.2 Factor A. (Avallone y Baumeister, 1995)

Diametro en plg	6	9	10	12	14	16
Diametro en mm	152	229	254	305	356	406
Factor A	54	96	114	171	255	336

L (pies) es la longitud de la hélice, si se suman ambos ejes es de 0,96m=3,15 pies.

N es la velocidad en rpm, para densidades mayores a 1600 kg/m³ se recomienda como máximo 70 rpm.

C es la cantidad de material desplazado y depende del factor de llenado, que en este caso como se asume que se aprovecha todo el radio de acción de la hélice es del 100% por lo que el factor de llenado del área es de 1. Se usa la siguiente ecuación:

$$C = V * A_s \quad \text{Ec. 4}$$

V es la velocidad del material dada por $V = \frac{\text{Paso} * N}{60} = 0, \frac{14m}{s}$

A_s es el área de la sección dada por $A_s = \frac{\pi * D^2}{4} = 0,015m^2$

$$C = 0,14 * 0,015 = \frac{0,002m^3}{s} = 273, \frac{95pies^3}{h}$$

W es la densidad del material, se trabaja con la mayor densidad entre las posibles mezclas. $W=1887 \text{ Kg/m}^3 = 118,8 \text{ Lb/pies}^3$.

F es un factor que depende del material, Avallone (1995) da un valor de 1,8 para azúcares y Screw Conveyor Corporation (2010) recomienda 1,5 para nitrato de amonio. Se trabaja con $F=1,8$ para mayor seguridad.

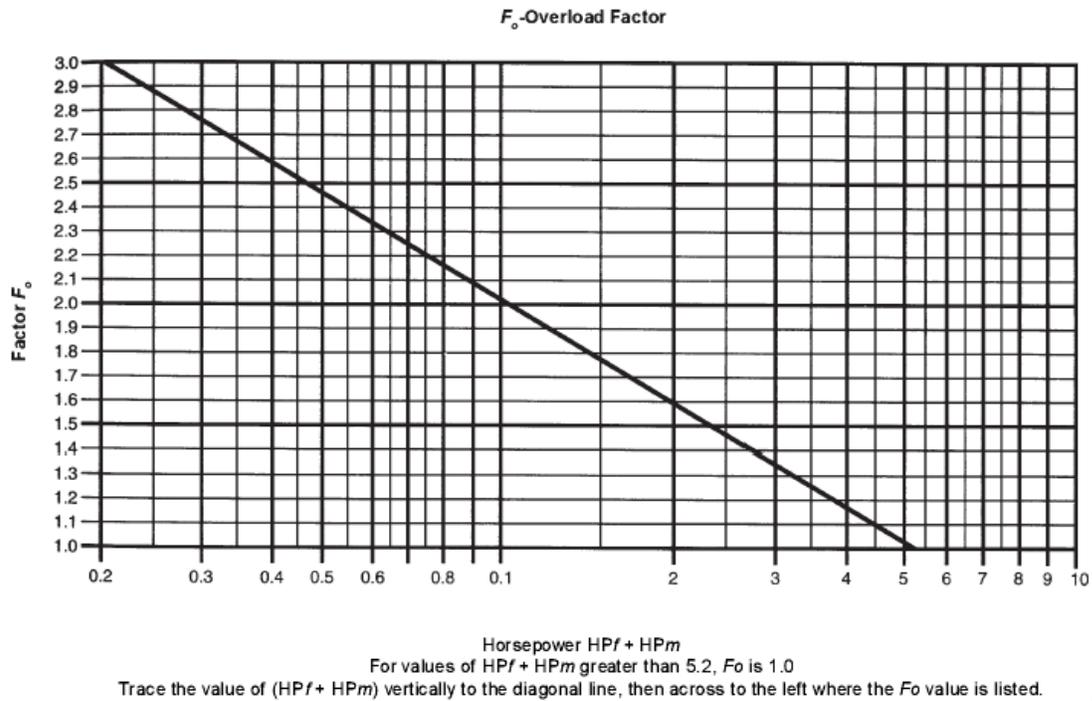
Con estos valores se obtiene un valor de $H=0,196$. Luego con este valor se halla la potencia corregida con la siguiente expresión:

$$hp = \frac{H * F_o}{e}$$

Ec. 5

El factor F_o obtenido de la gráfica de la Figura 9.5 es de 3. La eficiencia para sistema de transmisión por correa de la tabla 9.3 es de 0,87.

$$hp \text{ del motor} = 0,68$$



Fif

Figura 9.5 Factor de sobrecarga. (Quiroga R., 2010)

Tabla 9.3 Eficiencia de los sistemas de transmision. (Quiroga R., 2010)

e Drive Efficiency Factor				
Screw Drive or Shaft Mount w/ V-Belt Drive	V-Belt to Helical Gear and Coupling	Gearmotor w/ Coupling	Gearmotor w/ Chain Driver	Worm Gear
.88	.87	.95	.87	Consult Manufacturer

En nuestros laboratorios se cuenta con un motor de 1 hp (figura 9.6) que cumple con los requerimientos de la potencia calculada. Este motor tiene una velocidad nominal de 3320 rpm pero solo se necesitan 70 en los ejes del homogenizador, por lo que a continuacion se define el sistema de reduccion.



Figura 9.6 Motor de 1 hp.

9.4 Sistema de transmisión

A continuación se define la transmisión de potencia realizando la selección de correas, poleas y el estudio del eje de transmisión.

9.4.1 Selección de los elementos

Como se expuso en el punto 5.2 el sistema de transmisión mas apto para ser usado en esta máquina, por sus ventajas incluyendo el bajo costo y facil configuración es el sistema de transmisión por correas, por lo que se trabaja en función de definir una reducción con el uso de poleas.

Para poder diseñar el sistema de transmisión ha sido necesario primero recoger información acerca de los diámetros de poleas de facil ubicación en Mérida, encontrandose una variedad en aluminio con diámetros entre 2 ½ y 12 pulgadas.

La relación de transmisión requerida es de 47,4. Luego de analizar las dimensiones es difícil lograr esta relación sólo con poleas por lo que es necesaria la variación de algún parámetro eléctrico para lograr la velocidad

correcta. Con el uso de un eje intermedio se busca reducir las rpm lo máximo posible mecánicamente.

La polea del motor y la mas pequeña del eje seleccionadas tienen un diámetro de $2\frac{1}{2}$ " (mínimo conseguido). La polea mayor del eje es de 12" (máximo conseguido) y las poleas acopladas a los sin fin son seleccionadas para el mayor diámetro disponible sin que se produzca interferencia entre ellas, estas son de 6". Los diámetros mencionados son diámetros externos, se toma un diámetro intermedio como diámetro de paso.

Con la conexión de las poleas mencionadas se logra una relación de transmisión de 15,22, en la figura 9.7 se muestra la ubicación de estos elementos.

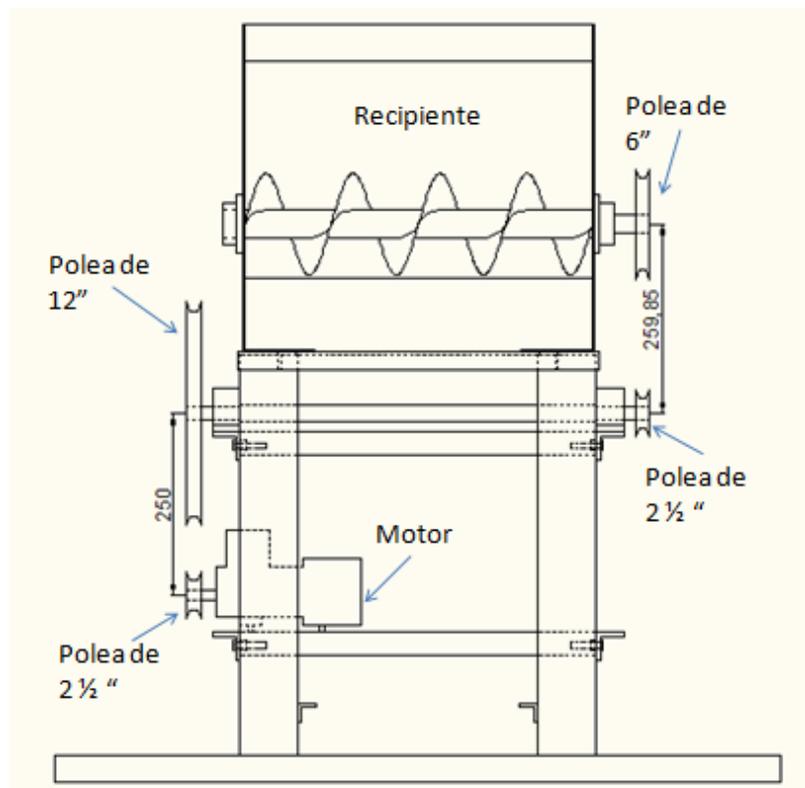


Figura 9.7 Ubicación de los elementos de transmisión de potencia.

9.4.2 Eje de transmisión

Como ya se cuenta con un eje de 7/8", se le realiza un análisis de fatiga y además con la posibilidad de reducir en los extremos el diámetro a 3/4" para conectar los rodamientos y poleas, esto debido a que las chumaceras conseguidas son de este diámetro. Las medidas y cargas de la barra se muestran en la figura 9.8.

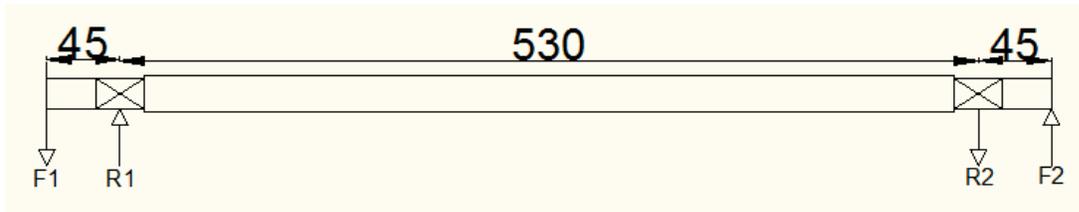


Figura 9.8 Medidas y cargas en el eje de transmisión.

9.4.2.1 Cálculo de esfuerzos

Características de la barra:

Material: hierro dulce

Resistencia a la tracción=340Mpa

Cargas por correas:

Según el catálogo de rodamientos NTN (NTN Corporation, 2004) se define la fuerza tangencial con la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{19,1 \cdot 10^6 \cdot H}{D_p \cdot n} \quad \text{Ec. 6}$$

H es la potencia en Kw

D_p es el diámetro de paso de la polea

Luego la carga radial se calcula con:

$$K_r = F_b \cdot K_t \quad \text{Ec. 7}$$

Donde F_b corresponde a un factor que depende de la correa, para correas en V $F_b=2$.

Con las ecuaciones 6 y 7 resulta:

$$K_{t1}=56,5 \text{ N}, \quad K_{r1}=113\text{N}=F_1$$

$$K_{t2}=318,5 \text{ N}, \quad K_{r2}=637\text{N}=F_2$$

Luego haciendo sumatoria de momentos en B y sumatoria de fuerzas verticales se obtienen las reacciones 1 y 2.

$$R_1=176,7\text{N}, \quad R_c=700,7 \text{ N}$$

El torque en el eje se calcula con la potencia y la velocidad angular:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{510}{61,58} = 8,3 \text{ N.m}$$

Los diagramas de fuerza cortante, momento flector y torsor se muestran en la figura 9.9.

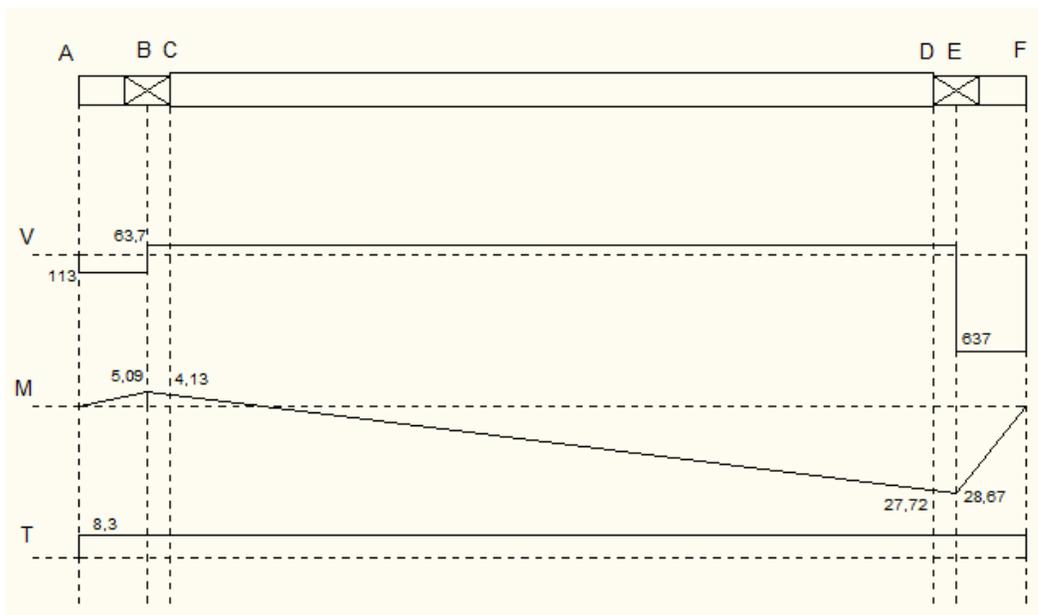


Figura 9.9 Diagrama de fuerza cortante, momentos flector y torsor.

Se toma la zona C como crítica por el cambio de sección y la consecuente concentración de esfuerzos. A continuación se dan las propiedades de esta sección.

$$A_D = 38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2, \quad A_d = 28 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$I_D = 1,15 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4, \quad I_d = 6,4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$J_D = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4, \quad J_d = 12,8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

En la figura 9.10 se observan las cargas correspondientes a la zona crítica y se señala el punto crítico en el cual se realiza el estudio de esfuerzos.

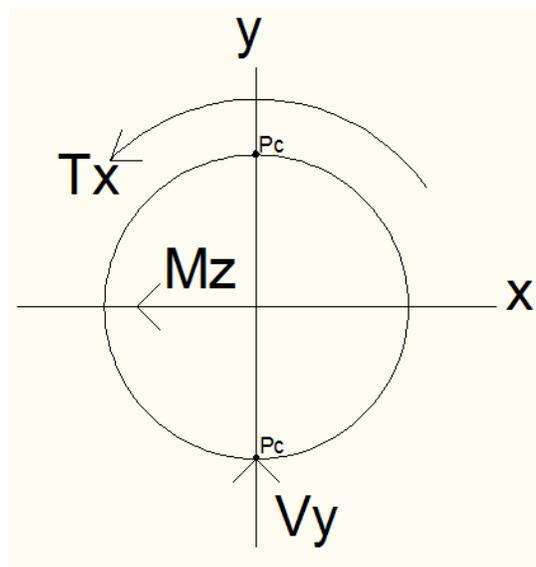


Figura 9.10 Cargas en zona crítica.

Esfuerzos:

$$\sigma_{x\max} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{27,72 \cdot 0,0095}{6,4 \cdot 10^{-9}} = 41,1 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{x\min} = -41,1 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{xa} = 41,1 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{xm} = 0$$

Como en el punto crítico no existen efectos por cortante directa, los efectos por cortante son solo por torsión, como el momento torsor es constante este es un esfuerzo medio.

$$\tau_{zy} = \frac{T \cdot r}{J} = \frac{8,3 \cdot 0,0095}{12,8 \cdot 10^{-9}} = 6,2 \text{ Mpa}$$

Indice de sensibilidad al entalle (q) y factor de concentración de esfuerzos (K_f):

El factor de concentración K_t con $D=22\text{mm}$, $d=19\text{mm}$ y $r=1\text{mm}$ para flexión es de 1,9.

Para todos los grados de hierros fundidos se recomienda usar un $q=0,2$, pues estos tienen una baja sensibilidad a las ranuras (Budynas y Nisbett, 2008).

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,2(1,9 - 1) = 1,2$$

Con lo que el esfuerzo alternante queda:

$$\sigma_{\text{Na}} = 1,2 \cdot 41,1 = 49,4 \text{ Mpa}$$

Los esfuerzos principales alternantes y medios son:

$$\sigma_a = 49,4 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_m = \sqrt{3\tau_{zy}^2} = 10,74 \text{ Mpa}$$

9.4.2.2 Límite de Resistencia a la Fatiga

Teórico:

$$S_e = 0,4S_{\text{ut}} = 0,4 \cdot 340 = 136 \text{ Mpa}$$

Factores de corrección:

K_a (superficie):

$$K_a = a \cdot S_{\text{ut}}^b = 4,51 \cdot 340^{-0,265} = 0,96$$

K_b (tamaño):

$$K_b = 1,24d^{-0,107} = 0,9$$

K_c (carga)=0,85

K_e (confiabilidad 99%)=0,814

Luego el límite de resistencia a la fatiga corregido es:

$$S_e = 0,96 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \cdot 0,814 \cdot 136 = 81,3 \text{ Mpa}$$

Se aplica la teoría de Gerber para hallar el factor de seguridad

$$\frac{F_S \cdot \sigma_a'}{S_e} + \left(\frac{F_S \cdot \sigma_m'}{S_{ut}} \right)^2 = 1$$

Ec. 8

$$F_s = 1,5$$

Se concluye que el eje no presentará falla por fatiga.

9.4.3 Longitud de las correas

Conociendo la distancia entre ejes y los diámetros primitivos de las poleas se calculó la longitud de las correas. Para la correa que conecta el motor con el eje de transmisión se usó la siguiente expresión:

$$L = (2C) + 1,57(D_p + d_p) + \frac{(D_p - d_p)^2}{4C}$$

Ec. 9

C es la distancia tentativa entre centros, D_p y d_p son los diámetros primitivos de las poleas.

$$L = (2 \cdot 250) + 1,57(294 + 52) + (294 - 52)^2 / (4 \cdot 250) = 1101,8 \text{ mm} = 43"$$

Observando las longitudes de correas estandarizadas se eligió un número 42, cuya longitud es de 1097 mm.

9.5 Tornillos sin fin

Según Avallone (1995), la hélice debe tener un paso más o menos igual que su diámetro exterior utilizándose otras conformaciones para casos especiales, incluso existen configuraciones de paso variable. Los pasos de hélice más cortos son recomendados para transportadores inclinados y los de paso variable son usados cuando se requiere que el transportador se autoalimente.

En el catálogo Screw Conveyor Catalog and Engineering Manual (Screw Conveyor Corporation, 2010) se da una extensa explicación sobre las aplicaciones y el dimensionamiento de los elementos que componen las máquinas basadas en este principio. De dicho catálogo se han obtenido las recomendaciones para seleccionar el calibre de la lámina para las hélices del sin fin, el calibre del recipiente o carcasa y el diámetro del eje, tomando en cuenta el tipo de material a transportar y el diámetro exterior de la hélice entre otros factores.

Para el diámetro de 14 cm y usando como material perclorato de amonio, se recomienda un lámina calibre 14 (2 mm). Para el recipiente o carcasa se recomienda calibre 16 (1,52 mm). El diámetro recomendado para el eje es de 1 ½ “.

Para efectos de fabricación, conociendo que para realizar la hélice se deben cortar discos, estirarlos y luego soldarlos, se trabaja con un paso de 12 cm, esto con el objetivo de usar 4 discos para cada sin fin, completando así los 48 cm de longitud requeridos.

Para facilitar el ensamblaje de los sin fin se debe usar como eje de los mismos un tubo de acero inoxidable de 1 ½ “ y en los extremos se deben acoplar unas barras pequeñas (figuras 9.11 a y b) encajadas dentro del tubo y sujetas a este por un prisionero como se muestra en la figura 9.12, permitiendo liberar el sin fin al remover las barras de los extremos junto al rodamiento. De esta manera también se reducen considerablemente los costos ya que el costo de la barra es unas 10 veces mayor que la del tubo de acero inoxidable.

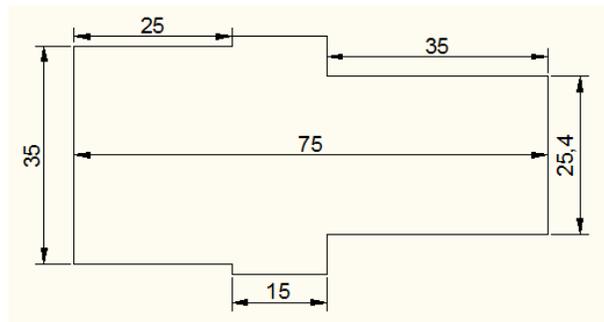


Figura 9.11a Barra de acople de extremo sin polea.

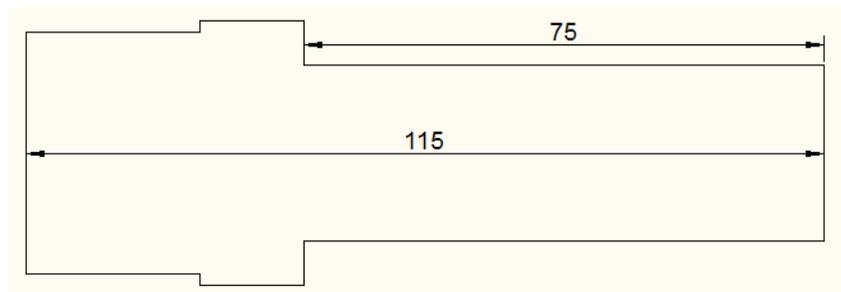


Figura 9.11b Barra de acople de extremo con polea

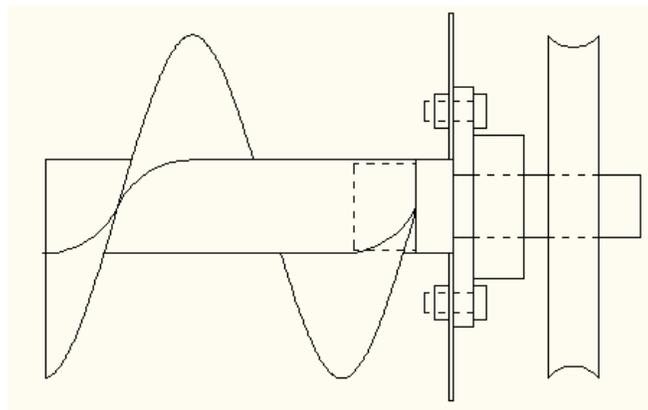


Figura 9.12 Acoplamiento de sin fin con barra, rodamiento y polea.

9.6 Tubería para desalajo de la mezcla

Se le realiza unos agujeros al recipiente en el fondo y a ambos lados donde se dirige la corriente de material inducida por los sin fin. De esta manera se dejan dos salidas de 1 ½ ". Este diámetro es tentativo, pues de momento no se puede determinar su efectividad a la hora de fluir la mezcla, sin haber realizado las respectivas pruebas con la máquina funcionando. En las figuras 9.13a y b se muestra la forma propuesta para la tubería de salida y la ubicación de la válvula,

con esta configuración se puede notar que alguna pequeña cantidad de mezcla quedaría sin homogeneizar, por lo que se tendría que tomar esta fracción como pérdida.

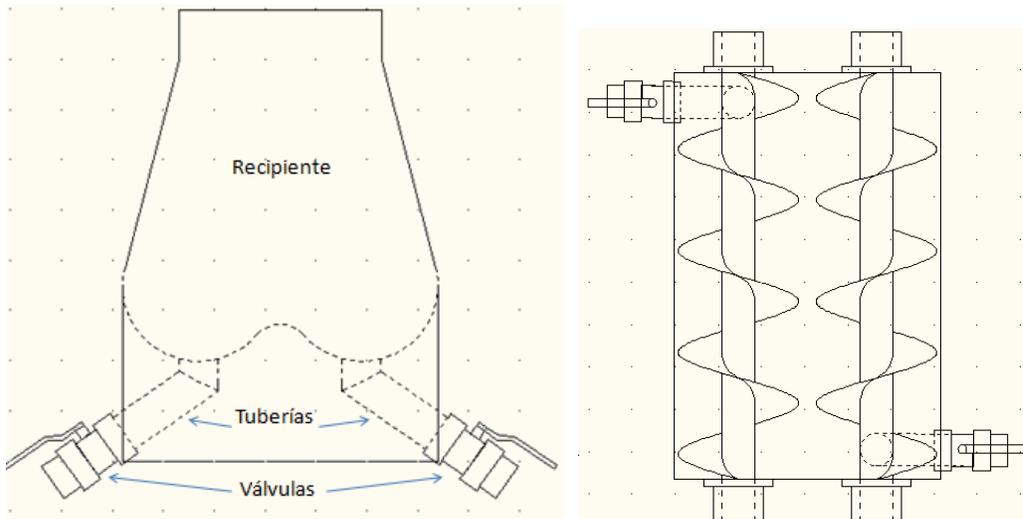


Figura 9.13a Tuberías (Vista frontal) Figura 9.13b Tuberías (Vista superior)

10 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

10.1 Procesos de manufactura utilizados

- Cilindrado: para reducir el diámetro del eje de transmisión y los ejes de acoplamiento de los sin fin al tamaño adecuado para ensamblarlo a las chumaceras.
- Ranurado: esta operación se realiza en las bases de soporte del motor y del eje de transmisión para dejar un pequeño rango de giro que sirve para el tensado de las correas.
- Corte: se realiza corte a la lámina de acero inoxidable para ir confeccionando las diferentes partes. También se realiza el corte de los discos en la fresadora para elaborar los tornillos sin fin.

- Doblado: esta operación es realizada con dos máquinas, una dobladora con muelas y otra con rodillos y se usa para dar la forma al recipiente y a las tapas laterales.
- Taladrado: para abrir los orificios de las tapas laterales donde van los ejes del sin fin y para los orificios de sujeción de las chumaceras y del recipiente a la base.
- Soldadura con arco eléctrico: se realiza soldadura para unir las hélices entre si y al eje, para ensamblar el recipiente y para la elaboración de la base del homogeneizador.

10.2 Fabricación de los elementos

A continuación se explican los procedimientos mediante los cuales se llevó a cabo la manufactura de los elementos del homogeneizador.

10.2.1 Tornillos sin fin

Los primeros elementos fabricados son los tornillos sin fin, al no contar con una máquina en el laboratorio con la cual dar la forma helicoidal al acero, se tiene que hacer el trabajo en varias fases.

Lo primero que se hizo es cortar discos con un diámetro un poco mayor al de las hélices (14,5 cm de diámetro) previendo que al ser estirados el diámetro se reduce (esto se muestra en la figura 10.1). El porta herramienta que se observa en la figura 10.1 debió ser fabricado ya que no se cuenta con uno de tamaño suficiente para el diámetro exterior. La máquina utilizada fue una fresadora.

Una vez cortados los discos externos se procedió a cortar los discos internos. El método empleado para conocer este diámetro es desarrollando la hélice en un plano como se muestra en la figura 10.2.



Figura 10.1 Corte de los discos.

El paso es de 12 cm, el perímetro del eje de $1\frac{1}{2}$ '' (3,81 cm) es de 11,97 cm. Se calculó el perímetro del círculo interno con lo que se obtiene un valor de 16,95 cm, lo que representa un diámetro de 5,4 cm.

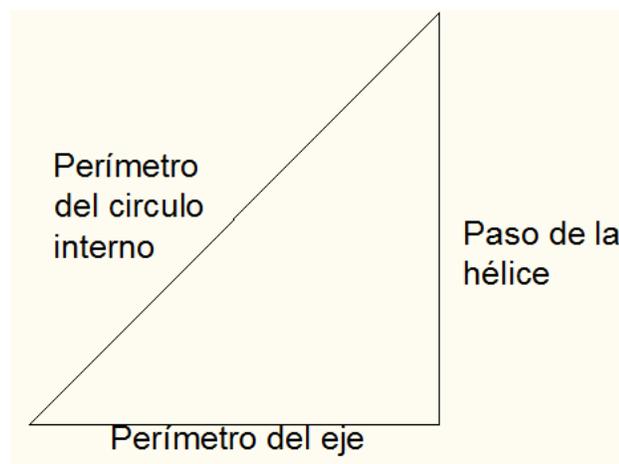


Figura 10.2 Desarrollo de la hélice para diámetro interno del disco.

Se realizaron varias pruebas a partir de estos valores haciendo los discos de cartón para verificar si se ajustan al eje con las dimensiones obtenidas. Esto se muestra en la figura 10.3.



Figura 10.3 Disco de cartón de prueba.

Se encuentra que si se da el diámetro de 5,4 cm calculado el ajuste es muy forzado y más aun para el acero que sería difícil de deformar. Probando con otro disco de cartón se obtuvo que dando un diámetro de 6 cm. el ajuste al eje es mucho más cómodo por lo que se toma este valor experimental.

Se procedió a estirar los discos con la ayuda de una prensa y sargentos, resultando como se muestra en la Figura 10.4.



Figura 10.4 Disco estirado

De manera similar se usó este procedimiento en 8 discos suficientes para cumplir con la dimensión de los tornillos de ambos ejes. Una vez estirados los discos se realizó la soldadura entre ellos, y luego al eje de acero inoxidable para así terminar el arreglo helicoidal (figuras 10.5 a y b).



Figura 10.5a. Soldadura (Leonardo Lacruz) Figura 10.5b

Luego se realizó el mecanizado de los elementos que sirven de acople entre el sin fin y los rodamientos (figura 10.6), para esto se usa una barra de acero inoxidable de 1 ½, cuyo diámetro es reducido a 35 mm en el extremo que encaja en el tubo del sin fin y a 1" en el extremo donde se acopla a la chumacera.

Se usaron rodamientos de 1" puesto que representan un menor costo y además las medidas de las chumaceras de 1 ½ no permitieron ubicarlas correctamente atornilladas al recipiente. Estos elementos se observan en la figura 10.7.



Figura 10.6 Mecanizado de la barra de acero inoxidable



Figura 10.7 Barras ya mecanizadas.

10.2.2 Recipiente

Para el recipiente se usó la misma lámina empleada en el sin fin, ésta es de acero inoxidable AISI 304 con acabado 2B. Se realiza el doblado de la lámina para dar forma al recipiente (foto 10.8a). Hay que acotar que se ha modificado la forma inicialmente planteada en el diseño para facilitar la fabricación, debido a que con

las máquinas con que se cuenta resulta difícil dar la forma, por ello se ha dejado como se muestra en las figura 10.8b. Para completar el recipiente se cortaron las tapas laterales y se taladran los agujeros correspondientes al eje de los sin fin y los pernos que sirven de unión entre en recipiente y la base, esto se realiza antes de soldar todo el recipiente por resultar más sencilla la manipulación (figura 10.9).



Figura 10.8a Doblado del recipiente.



Figura 10.8b Forma final del recipiente.



Figura 10.9 Tapa lateral con sus agujeros.

Finalmente se realizó la soldadura del recipiente con electrodo E308L-16, la forma final de este se observa en la figura 10.10.



Figura 10.10 Recipiente ya soldado.

En el interior del recipiente también se deben ubicar unas estoperas que evitan la fuga de la mezcla, no permitiendo que ésta entre en contacto con la chumacera donde se apoyan los ejes de los sin fin. Para fijar las estoperas se ha soldado al recipiente un guía donde encajan a presión (figura 10.11).



Figura 10.11 Guía para las estoperas.

10.2.3 Base

Para la base se utilizaron los perfiles y ángulos mencionados en la parte de diseño, los cuales han sido soldados, resultando la estructura que se observa en la figura 10.12.



Figura 10.12 Base de la máquina

Los elementos que sirven de base para el motor y para el eje pivotan en uno de los lados mediante un tornillo, en el otro se ha hecho una ranura (figura 10,13) que sirve para el tensado de las correas, de esta forma cuando se logre una tensión adecuada se ajustan los tornillos a ambos lados. Estos elementos se han elaborado con ángulo de 1 ½ " (transversales) y 1 ¼ " (longitudinales), soldándolos de manera que su longitud coincida con los bordes de la viga vertical de perfil UPN. A estos elementos también se les ha realizado los agujeros correspondientes para la ubicación de los pernos que sirven de unión del motor y las chumaceras del eje de transmisión.



Figura 10.13 Mecanizado de ranuras para tensor de correas.

Terminada la fabricación de la base se presentaron los demás elementos como las chumaceras, poleas, correas y motor y se realiza el ensamblaje de la figura 10.14.



Figura 10.14 Ensamblaje.

En la figura 10.15 se observa la máquina funcionando con el motor ya conectado a corriente.



Figura 10.15

10.2.4 Protector para las correas y poleas

Se han ubicado unos protectores a ambos lados de la máquina donde se encuentran las poleas para proteger al personal del alcance de éstas. Estos protectores han sido elaborados con una malla plástica y un borde de acero de 8 cm para evitar accidentes en la manipulación del equipo.



Figura 10.16 Protector para las correas y poleas.

11. CONCLUSIONES

En este trabajo se buscó diseñar y construir una máquina con características adecuadas para la homogeneización de los combustibles sólidos empleados en el marco del Proyecto Institucional Cohetes Sonda ULA. Empezar un proyecto como este en nuestro país representa algunas dificultades en cuanto a la búsqueda de la información en vista de que no se tiene un amplio historial en el desarrollo de estas tecnologías, e incluso, el antecedente más destacable en esta área en Venezuela proviene del mencionado Proyecto Institucional. Mucha de la información acumulada en 6 años de experiencia por los miembros del Proyecto Cohete Sonda ULA ha servido como punto de partida para realizar esta investigación.

El diseño del prototipo ha sido producto del análisis realizado a las alternativas mencionadas en el capítulo 5, apoyada por la matriz planteada donde se ha dado una ponderación a cada alternativa para aspectos importantes de diseño como mantenimiento, manufactura, costo y desempeño. Se encontró que la máquina de

doble rotor con tornillos sin fin representa la mejor opción, principalmente por su desempeño, ya que en comparación con las otras máquinas es más efectivo en el tratamiento de las mezclas descritas, manteniendo en constante movimiento la mayoría de la masa dentro de la cámara de homogeneizado. Las decisiones tomadas son también en su mayoría producto del debate constante a lo largo de meses en nuestro grupo de investigación.

El proceso de diseño desarrollado se ha centrado en ciertos requerimientos tratados a lo largo del trabajo y en la necesidad de poder fabricar la máquina con los equipos y herramientas disponibles en el taller, además con la posibilidad de conseguir las partes y materiales con facilidad en el país, en este particular, estas expectativas han sido satisfactoriamente cumplidas. En la siguiente tabla se da un estimado de costos tanto de materiales como partes adquiridos para la fabricación.

Materiales y partes	Costo (Bs)
Lámina de acero Inoxidable de 2m x 1m	4500
Tubo de acero inoxidable de 1,5 m	150
Barra de acero inoxidable de 50 cm	400
Chumaceras, 6 en total	900
Tornillería	150
Electrodos	130
Pintura	80
Poleas y correas	900
Total	7210

En la tabla anterior no se ha considerado el costo de los elementos con los que ya se contaba como el motor y los materiales para la base, con lo que el costo de fabricación superaría los 10000 Bs.

12 RECOMENDACIONES

Por tratarse de la mezcla de sustancias de manejo peligroso, se recomienda que las pruebas iniciales al equipo se realicen con sustancias de características similares de densidad y apariencia que no representen el riesgo que representan los combustibles sólidos. Se debe verificar de esta manera, a parte del homogeneizado, que no ocurran variaciones bruscas en la temperatura de los elementos de la máquina que provoquen el mismo efecto en la mezcla.

Es importante que la instalación definitiva de la máquina se haga en un lugar adecuado, y que considere las medidas de seguridad, correspondientes a la norma Covenin 2272-91 que trata sobre el manejo y almacenamiento de explosivos y la norma Covenin 3060:2002 que especifica la correcta señalización que debe usarse.

REFERENCIAS

- ALLEN, HENRY. (1982). 4,361,526. U.S. Patent. *Thermoplastic Composite Rocket Propellant*.
- AVALLONE, E. Y BAUMEISTER, T. (1995). *Manual del Ingeniero Mecánico* (9ªed.). McGraw-Hill.
- BASCHUNG, B., GRUNE, D., LICHT, H., SAMIRANT, M. COMBUSTION PHENOMENA OF A SOLID PROPELLANT BASED ON ALUMINIUM POWDER. *International Journal of Energetic Material and Chemical Propulsion*. 10: 219-225.
- BEER F. Y JHONSTON, R. (1981). *Mecánica de Materiales*. México: McGraw-Hill.

BHAVSAR, S. (2011). *Overview of homogenizer processes*. Pharma times. p. 37.

BREW, W. y PRICE, R. (1979). 4,165,247. U.S. Patent. *Polyurethane Solid Propellant Binder*.

BUDYNAS, R. y NISBETT, J. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: Mcgraw-Hill Interamericana.

CHAPMAN, S. (1985). *Máquinas Eléctricas*. Colombia: Mcgraw-Hill Latinoamericana.

DOLL, D. y LUND, G. (1991). 5,076,868. U.S. Patent. *High Performance, Low Cost Solid Propellant Compositions Producing Halogen Free Exhaust*.

FORDHAM, S. (1980). *High explosives and propellants*. Great Britain. Pergamon Press.

GUSMEROLI, D. (2009). *Máquinas de elevación y transporte*.

HENDEL, F. (1965). *Review of Solip Propellants for Space Exploration*. California: Jet Propulsion Laboratory.

HUNLEY, J. (1999). *The history of solid-propellant rocketry*. Nasa.

JAGIELLO, Leonard. (1965). 3.192.289. U.S. Patent. *Method of Casting Solid Propellant Rocket Motors*.

KUBOTA, N. (2007). *Propellants and Explosives – Thermochemical Aspects of Combustion*. Wiley-VCH Editorial.

MARCANO, V., BENÍTEZ, P., LA ROSA, C., LACRUZ, L., PARCO, M., FERREIRA, J., SERRA, V. A., PEÑALOZA, M., RODRÍGUEZ, L., CÁRDENAS, J. E., MINITTI, V., ROJAS, J. J. 2009. PROGRESOS ALCANZADOS EN EL PROYECTO UNIVERSITARIO COHETE SONDA ULA. *Revista Universitaria, Ciencia y Tecnología*. 13: 305-316.

MTCR PARTNERS. (2010). *Missile technology control regime*.

NTN CORPORATION. (2004). *Rodamientos de Bolas y de Rodillos*.

N.V. ONDERZOEKINGSINSTITUUT RESEARCH. (1985). 28.946. Patente de Invención en España. *Un procedimiento para mezclar u homogeneizar una sustancia muy viscosa con una mezcla*.

POTTER, M. y WIGGERT, D. (2002). *Mecánica de Fluidos*. Michigan, Estados Unidos: Thomson.

PROVENZANO, S. y DÍAZ, M. (2006). *Sistemas de transmisión por correas*. UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Mérida.

QUIROGA, R. (2010). *Diseño y construcción de un mezclador de tornillo sinfín para mortero seco*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.

RICHARD NAKKA'S *Experimental Rocketry* Web Site. [On-line]. Disponible en: <http://www.nakka-rocketry.net>.

SCREW CONVEYOR CORPORATION. (2010). *Screw Conveyor Catalog and Engineering Manual*.