

Diseño y Simulación De un Pantógrafo a Plasma

David Esteban Bravo Palacios.

Universidad Particular Internacional SEK

Nota del autor:

David Esteban Bravo Palacios, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional Sek.

Director Msc. Jaime Molina

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

Davidestbravo92@gmail.com

Quito, Junio 2017

Declaración Juramentada

Yo, DAVID ESTEBAN BRAVO PALACIOS, con cédula de ciudadanía 172160330-4, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

DAVID ESTEBAN BRAVO PALACIOS

C.C.: 172160330-4

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres y hermano, Gerardo, Marlene y Gabriel ya que sin su apoyo y dedicación este logro no sería posible, agradezco el apoyo en cada una de las decisiones de mi vida, así como las exigencia para el cumplimiento en cada una de las mismas, agradezco a la Universidad Internacional SEK por haber sido un segundo hogar en el cual viví experiencias que me formaron tanto profesional como espiritualmente, así mismo agradezco a los docentes de la facultad de ingeniería mecánica por brindarme su conocimiento, agradezco a mis amigos por brindarme su apoyo y su aliento en este camino y sin lugar a duda agradezco a Dios por haberme dado la vida y las capacidades para poder lograr esta meta.

“Tengo miedo de la muerte y del dolor, pero convivo con eso.

El miedo me fascina, me mantiene Alerta.”

Ayrton Senna

TABLA DE CONTENIDOS

TABLA DE CONTENIDOS	4
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS.....	6
REFRERENCIAS	8
Introducción	9
Objetivo General.....	10
Método	11
Funciones básicas de centros de mecanizado.	12
Trabajos Similares	13
Rango de espesores más frecuentes a cortar.	13
Ciclo de trabajo.	13
Fuente de alimentación e intensidad máxima.	13
Gases a utilizar.....	13
Ciclo de trabajo.	13
Definición del Tema	14
Materiales a Utilizar.....	14
Diseño Asistido por Computadora.....	15
Especificaciones Técnicas	16
Diseño en el Software Inventor.....	16
Diseño de Materialización	23
Diseño de Materialización Preliminar	23
Establecimiento de las Condiciones Críticas	24
Resultados	53
Evaluación de Los Principales Parámetros	53

Análisis de los Principales Elementos	53
Ejes.....	53
Factor de Seguridad para el Eje Transversal Izquierdo	55
Factor de Seguridad para el Eje Transversal Derecho	55
Rodamientos	56
Simulación de Esfuerzos Asistido por Computadora	60
Nodos y Malla.....	68
Convergencia de la Simulación.	68
Discusión.....	70
Evaluación de Diseño Preliminar.....	70
Análisis de Diseño	70
Rediseño del porta plasma.	70
Evaluación de Valores	72
Conclusiones	73
Recomendaciones	75
Referencias.....	76
Bibliografía	76
Anexos	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	52
Tabla 2	52
Tabla 3	56
Tabla 4	57
Tabla 5	59
Tabla 6	59
Tabla 7	60
Tabla 8	62
Tabla 9	64
Tabla 10	66
Tabla 11	72

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Descripción del diseño preliminar	17
<i>Figura 2.</i> Mesa de trabajo	18
<i>Figura 3.</i> Ejes gemelos Verticales	19
<i>Figura 4.</i> Cojinetes excéntricos	20
<i>Figura 5.</i> Eje principal	20
<i>Figura 6.</i> Carro Porta Herramientas.	21
<i>Figura 7.</i> Palpador Y Porta Plasma	22
<i>Figura 8.</i> Vista preliminar del diseño virtual.....	22
<i>Figura 9.</i> Diseño virtual con zoom en la mesa de trabajo.	23
<i>Figura 10.</i> Diagrama de cuerpo libre del eje principal.....	24
<i>Figura 11.</i> <i>Figura 12.</i>	27
<i>Figura 13.</i> Diagrama de cuerpo del eje de desplazamiento principal.....	30
<i>Figura 14.</i> Diagrama de cuerpo libre, distribución de cargas en el eje principal por secciones. .	31
<i>Figura 15.</i> Generador de componentes Inventor.	39
<i>Figura 16.</i> Generador de componentes Inventor.	40

<i>Figura 17.</i> Diagrama del cuerpo libre del eje transversal izquierdo.....	41
<i>Figura 18.</i> Diagrama de cuerpo libre eje transversal derecho	43
<i>Figura 19.</i> Diagrama cuerpo libre izquierdo	46
<i>Figura 20.</i> Gráfico momento Flector Eje trasversal Izquierdo.....	47
<i>Figura 21.</i> Diagrama cuerpo libre derecho.....	47
<i>Figura 22.</i> Gráfico momento Flector eje transversal derecho.....	48
<i>Figura 23.</i> Diagrama del cuerpo libre del eje principal.....	49
<i>Figura 24.</i> Diagrama de cortante para el eje principal	50
<i>Figura 25.</i> Diagrama de momento Flector para el eje principal.....	50
<i>Figura 26.</i> Diagrama del ángulo de flexión para el eje principal	51
<i>Figura 27.</i> Diagrama de deflexión para el eje principal	51
<i>Figura 28.</i> Intervalos máximos de pendientes y deflexiones transversales. (Richard G. Budynas, 2008)	57
<i>Figura 29.</i> Identificación de soportes en la estructura.....	58
<i>Figura 30.</i> Análisis de tensión-Tensión de Von Mises.....	61
<i>Figura 31.</i> Análisis de tensión- Desplazamiento.....	61
<i>Figura 32.</i> Análisis de tensión- Coeficiente de seguridad.....	62
<i>Figura 33.</i> Detalles de juntas de canal soldadas. (Structural Welding Code Steel D1,1., 2000)	65
<i>Figura 34.</i> Soldadura de canal Bisel individual.....	67
<i>Figura 35.</i> Configuración de Mallas y Nodos	68
<i>Figura 36.</i> Configuración de Convergencia.	69
<i>Figura 37.</i> Trazado de convergencia.	69
<i>Figura 38.</i> Diseño Preliminar del Porta Plasma.	71
<i>Figura 39.</i> Rediseño final del Porta plasma.....	71

REFRENCIAS

Anexo A. Especificaciones Técnicas.....	78
Anexo B. Referencias de especificación.....	79
Anexo C. Valores guía para factor de seguridad estático (SKF, 2016).....	80
Anexo D. Requerimientos básicos para el correcto funcionamiento Software Inventor 2016....	80
Anexo E. Análisis y comparación de Costos.....	81

Introducción

Desde el principio de los tiempos la humanidad ha tenido la necesidad de desarrollar herramientas y procesos que faciliten sus actividades cotidianas.

La industria mundial ha desarrollado un nivel impresionante de tecnología para poder cumplir con las amplias demandas del mercado, por lo que las tecnologías en la industria son constantemente evolutivas en busca de reducir tiempo, costo y mejorar la calidad de sus procesos. Por lo cual, es imposible que un empresario pretenda competir a estos niveles sin la ayuda de este tipo de tecnologías, hasta en las empresas de producción artesanal se aprecia la presencia de herramientas (tecnologías) que facilitan el cumplimiento de varias tareas productivas.

En la actualidad la industria desarrolla diferentes tecnologías en busca de saciar sus necesidades y agilizar sus procesos de producción, así mismo se requiere desarrollar maquinarias dependiendo de cada tipo de industria, necesidad productiva y posibilidad económica.

Por esta razón, se considera la necesidad de realizar el diseño de una máquina de corte, accesible a la pequeña industria y a talleres de producción artesanal. Los principales compradores de este tipo de maquinaria pueden ser las industrias de alta producción, las cuales necesitan acortar procesos y ahorrar recursos. Las empresas pequeñas muchas veces se ven limitadas a la adquisición de este tipo de maquinarias, debido principalmente a su alto costo, por lo que se limitan a realizar procesos más artesanales.

Por lo anteriormente expuesto, se aprecia la necesidad de proveer a la Pequeña Industria Ecuatoriana de una alternativa para el corte de piezas metálicas, mediante el diseño de un pantógrafo a plasma el cual facilitará las tareas de corte de piezas metálicas o la reproducción de piezas desgastadas.

Ésta herramienta, se diseña con la idea de que en un futuro se pueda realizar la construcción de la misma, con el fin de que esta máquina agilite la reproducción de piezas 2D que se encuentren deterioradas y permiten reproducir una pieza con la facilidad de seguir sus contornos con un palpador. Por otra parte, si se compara el tiempo de reproducción versus el tiempo que llevaría él tomar las medidas de la pieza y el traslado de las mismas a una plataforma de diseño, se aprecia las ventajas que ofrece esta máquina herramienta, además de permitir la elaboración de un elemento diseñado desde cero con la facilidad de elaborar el patrón o el boceto de la pieza deseada

y plasmarla en un papel el cual se usará como modelo para así obtener la piezas inexistentes que se requieran para la construcción de una máquina.

Un pantógrafo a plasma, basa su funcionamiento en la regla de paralelogramos de René Descartes la cual describe la unión de dos fuerzas en ejes no paralelos lo cual permite conocer la resultante de dos fuerzas de diferente dirección.

Si bien este tipo de equipos ya existen en el mercado, ya sean de similares presentaciones o de mayor tecnología, el diseño de esta maquinaria busca que las medianas y pequeñas industrias de alta producción, puedan optar por una alternativa tecnológica de menor costo y que no se limiten únicamente a realizar procesos más artesanales.

Adicionalmente, el diseño de este tipo de maquinaria busca brindar a la pequeña industria la información básica, con relación a los criterios de diseño y tipo de materiales, así como una guía sobre los planos de construcción, a fin de que puedan hacerlo ellos mismos, dependiendo de sus capacidades, si bien esta máquina no cumple con todas las capacidades de un centro de mecanizado moderno, brinda una alternativa confiable para realizar sus funciones como cualquier otro centro de mecanizado.

Objetivo General

Bajo este concepto el presente proyecto tiene como objetivo principal el diseñar y simular un pantógrafo de plasma mediante el uso del software inventor, con miras a la futura construcción de esta máquina, ofreciendo a la industria ecuatoriana una alternativa económica para mejorar sus procesos de corte y producción.

Método

A partir de un proceso de manufactura de corte, se desea obtener piezas reproducidas o diseñadas desde cero, por lo cual como primer paso se realiza una investigación previa de lo que son los procesos de manufactura y sus diferentes ramas.

Los procesos de manufactura de mecanizado realizan su tarea mediante un conjunto de operaciones de fabricación de elementos, ya sea por arranque de viruta o por procesos abrasivos, descritos a continuación:

Mecanizado por arranque de Viruta: Este proceso se produce mediante la remoción de material en forma de viruta, la materia prima es cortada con distintos tipos de herramientas hasta llegar al producto deseado. Las herramientas varían según la necesidad del proceso, generalmente están constituidas por cuchillas que desprenden la viruta del material trabajado.

Mecanizados por procesos abrasivos: Este proceso sucede mediante el desgaste de partículas incandescentes en partes seleccionadas por el operador o la necesidad del proceso.

A través de la evolución de estos procesos y conocimientos, es como las tareas de Mecanizado han ido mejorando paulatinamente con la aparición de nuevas tecnologías, en busca de facilitar las tareas del operador dentro de la industria, mejorando la calidad y el tiempo de dichas tareas, como es el proceso de corte por plasma el cual a través de un proceso que utiliza un chorro de gas ionizado a alta velocidad genera la formación del plasma, el cual conduce la electricidad desde la antorcha de plasma hacia la materia prima; El plasma calienta los elementos en un punto en particular, fundiendo el metal.

En 1954, científicos descubren que al aumentar el flujo del gas y reducir la abertura de la boquilla utilizada en la soldadura TIG, se obtiene un chorro de plasma. Este chorro es capaz de cortar metales, lo que dio lugar al proceso de corte por plasma conocido hoy en día. (Electric, 2002).

En la Página web [WAY BACK MACHINE.COM](http://WAYBACK.MACHINE.COM) se describe

El fundamento del corte por plasma se basa en elevar la temperatura del material a cortar de una forma muy localizada superando inclusive los 30.000 °C.

El procedimiento consiste en llevar el gas utilizado hasta el cuarto estado de la materia (plasma), estado en el que los electrones se disocian del átomo y el gas se ioniza volviéndolo conductor. Luego se provoca un arco eléctrico a través de la sección de la boquilla del soplete, esta es sumamente pequeña, lo que concentra extraordinariamente la energía cinética del gas empleado, ionizándolo, y por polaridad adquiere la propiedad de cortar. (internet archive Wayback Machine , s.f.)

Por lo expuesto, se decide realizar un centro de mecanizado manual, un pantógrafo a plasma, en el cual para mecanizar una pieza a partir de un modelo se usa el movimiento del palpador de copiado, el cual guía la herramienta de corte. Este sistema realiza el control de los movimientos en una herramienta de trabajo por medio de la guía del palpador, el cual sigue el modelo del elemento que se desea reproducir.

En estos centros de mecanizado se aplica normalmente la denominación de "eje", como la dirección de los desplazamientos principales de las partes móviles de la máquina. Las máquinas-herramientas están provistas de un número de ejes principales, característica que hace factibles los trabajos de mecanizado sobre la pieza. Estos ejes se designan convencionalmente como X, Y, y Z.

La disposición de los carros móviles puede ser muy sofisticada, dando origen a una gran variedad de diseños. Los fabricantes de máquinas herramientas determinan dichas disposiciones en función de los requerimientos, en cuanto a la capacidad de carga y precisión de posicionado.

Funciones básicas de centros de mecanizado.

- ✓ Traducir los movimientos relativos entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo en forma de velocidades y avances.
- ✓ Mantener las posiciones relativas de la herramienta de corte y de la pieza de trabajo, a fin de que la remoción de material resultante produzca la forma requerida.

Así se han desarrollado los procesos de manufactura que permiten a través de un conjunto de trabajos para modificar las características de diferentes materias primas, en lo cual los procesos de manufacturas se los clasifica en:

- **Procesos Primarios:** Fundiciones, Modelados, Conformados, Procesos Especiales.
- **Procesos Secundarios:** Mecanizados, Tratamientos térmicos.
- **Procesos Terciarios:** Uniones, Soldaduras, Tratamientos superficiales. (Serrano, 2015)

Trabajos Similares

Se toma como guía un estudio para la selección de cortadoras de plasma dado que se requiere una para el funcionamiento de la máquina que se está diseñando. En este tema se encuentra el siguiente estudio donde se pudo obtener un aporte para la selección del equipo de plasma teniendo en cuenta las necesidades de los trabajos a realizar, los espesores que se necesitarán y demás, en el cual se determina:

Rango de espesores más frecuentes a cortar.

En base al análisis de los espesores más frecuentes a cortar, y de las aplicaciones que se quiere dar, el mínimo espesor de diseño será de 0.5 mm y el máximo de 12,7 mm.

Ciclo de trabajo.

Se opta por operar al 100% (10 minutos de trabajo continuo) con el espesor de diseño máximo, para dar lugar a espesores superiores al máximo pero a ciclos menores al 100%.

Fuente de alimentación e intensidad máxima.

De acuerdo a lo más común en talleres industriales se opta por una fuente de alimentación de 220 V y un rango de intensidad de 20-60 A.

Gases a utilizar.

Se optó por considerar un sistema dual con aire comprimido, considerando la calidad de los cortes en los diferentes materiales y el factor económico

Los Rangos de espesores más frecuente a cortar: En función de las aplicaciones ya definidas, el mínimo espesor de diseño será de 0,5 mm y el máximo de 12,7 mm.

Ciclo de trabajo.

Se optó por operar al 100% (10 minutos de trabajo continuo) con el espesor de diseño máximo, para dar lugar a espesores superiores al máximo pero a ciclos menores al 100%. Ver sección factor utilización Capítulo 2.1 – Fuente de alimentación e intensidad máxima De acuerdo a lo más común en talleres industriales optamos por una fuente de alimentación de 220V y un rango de intensidad de 20-60A. (Mirallas & Portes, 2015)

Se puede revisar el estudio completo del que se recoge esta información si se sigue el link en la bibliografía.

Definición del Tema

Diseño y simulación de los esfuerzos de una máquina-herramienta, que permita maximizar la producción y reproducción de piezas de alta complejidad fuera del alcance de un diseño fácil en un software CAD, disminuyendo el tiempo de fabricación y entregando un producto de alta calidad.

La máquina a diseñar será de operación manual y estará en la capacidad de mecanizar piezas de metal a partir del seguimiento del contorno de una pieza de muestra, lo cual guiará la herramienta de corte en relación a los ejes horizontal, transversal y vertical.

Esta máquina funcionara a través de una cortadora de plasma, la cual estará sujeta a un sistema de brazos flotantes que guiarán su movimiento a través del material, buscando la reproducción de la pieza de muestra.

Materiales a Utilizar

El objetivo principal de este proyecto, es el de diseñar y simular los esfuerzos de un pantógrafo de plasma, así que el único material que se requiere es una computadora que posea un software de diseño CAD, por lo que para este caso específico se escogió Inventor, debido a su facilidad al momento de generar las simulaciones de esfuerzos.

Para utilizar este tipo de software, es necesario cumplir ciertos requerimientos en la computadora que se utilizarán para que el software funcione correctamente, estos requerimientos los podemos observar en el Anexo D.

Diseño Asistido por Computadora

Para realizar el diseño de un pantógrafo a plasma, el cual como ya se indicó anteriormente permitirá a la pequeña industria tener acceso a tecnología a bajo costo, con lo que se espera contribuir a mejorar su nivel de calidad y competitividad en tema de trabajos, además de abrir una línea totalmente nueva de servicio en las industrias, independientemente de los proyectos particulares de la misma empresa.

Para poder realizar este diseño, se parte de las necesidades básicas de una industria pequeña de metal mecánica, la cual necesita constantemente el corte preciso o la reproducción de piezas para la creación artesanal de maquinaria, esta necesidad hace que los técnicos recurran a un centro automatizado de corte por plasma, lo cual si se habla de empresas pequeñas por tema de costos muy pocas veces es viable, por lo que la alternativa es recurrir a métodos artesanales de fabricación de piezas utilizando herramienta no 100% destinadas para este propósito, estos métodos si bien son efectivos no siempre cumplen con los altos niveles de calidad del mercado, además de ser métodos que requieren extensas horas de trabajo además de mano de obra altamente experimentada.

Así es como este diseño, basa su funcionamiento en dos simples y puntuales criterios:

- El costo de la máquina diseñada, debe ser relativamente bajo a comparación de las que se pueden conseguir en el mercado actual
- Se busca además de entregar una calidad y precisión similar a la maquinaria que se encuentra en el mercado, que pueda ser operada con suma facilidad, ya que muchas de las personas que desde hace mucho tiempo realizan trabajos artesanales, se muestran reacios a adoptar maquinarias que sobrepasen sus capacidades y entendimiento, debido a que operar este tipo máquinas sin la capacitación necesaria puede ser una mala experiencia para ellos, más que una ayuda en sus tareas cotidianas.

Los demás conceptos de funcionamiento, se establecieron a partir de este par de criterios principales, los cuales funcionaron como una base para el diseño preliminar de este pantógrafo a plasma.

En función a estos criterios se analiza el tamaño total de la máquina, pensada en total relación con el tamaño promedio de las industrias a las que está destinada esta maquinaria. Por otra parte, si bien se realiza esta máquina pensando en las pequeñas industrias, también se analiza la idea de poder mejorar el nivel de producción en el mercado nacional, por lo cual se parte de una mesa media de trabajo la cual tiene una dimensión de 1120 [mm] por 800 [mm] de ancho.

Además si bien el diseño preliminar se realiza desde cero, se buscó bases claras para que rijan el proceso de diseño, por lo que se realizan varias tablas en las cuales se pretende fijar especificaciones técnicas de la máquina a diseñar.

Especificaciones Técnicas

Las especificaciones técnicas son los requerimientos y exigencias que se plantean como guía para el diseño y la futura construcción de la máquina.

Para establecer las especificaciones del producto, se dispone de una lista con las especificaciones que permiten evaluar de forma metódica varios conceptos relacionados con las funciones, características, prestaciones y condiciones del entorno del producto, las cuales son presentadas en los Anexos A y B.

A partir del Anexo A, se elabora el anexo B que contiene el documento de especificaciones.

Después de realizar las consideraciones que se aprecian en los Anexos A y B, se procede a trabajar en el diseño preliminar, en el cual se realizará el diseño virtual, es decir en una software CAD, en este caso Inventor, para posteriormente realizar los cálculos correspondientes en el diseño de materialización, para comprobar que el diseño virtual con cada una de sus dimensiones sea el adecuado para soportar el trabajo al que será ejercido.

Diseño en el Software Inventor

Para realizar el diseño de la máquina en una plataforma CAD, se escoge una plataforma Inventor.

Se parte de medidas preestablecidas en etapas anteriores como son las dimensiones de la mesa de trabajo, dimensiones máximas de las piezas a ser producidas, además de la altura promedio del operario teniendo en cuenta temas de ergonomía del trabajador.

En base a los criterios anteriormente analizados, es creado el diseño preliminar.

Este diseño preliminar es realizado en 5 etapas de diseño consecutivas, la primera será la mesa de trabajo la cual pasa a formar la estructura principal de la cortadora de plasma, la segunda etapa será los portajes gemelos verticales en los cuales correrán el eje horizontal donde estará presente el carro porta herramientas, la tercera etapa será el diseño del eje principal, la cuarta etapa será el diseño del carro porta herramientas donde estarán apoyados tanto el palpador y la pistola de plasma y por último en la quinta etapa se realizara el diseño del palpador y del porta plasma

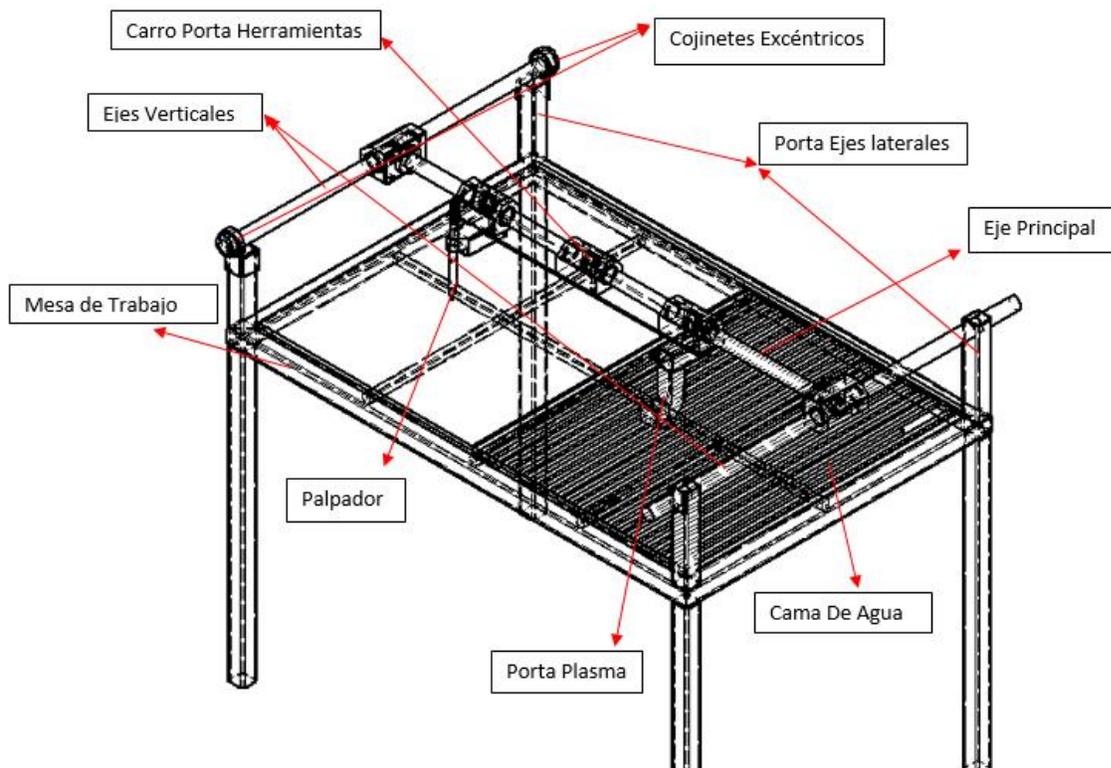


Figura 1. Descripción del diseño preliminar

En la Figura 1, se pueden apreciar la descripción de cada uno de los elementos del diseño anteriormente mencionados.

A continuación se describirán los conceptos básicos mediante los cuales se diseñaron cada uno de los elementos descritos en la Figura 1.

El diseño de la mesa de trabajo se basa en una mesa de medidas de 1120 [mm] de largo por 800 [mm] de ancho y con una altura de 800 [mm], estructurado mediante tubos cuadrados de norma DIN 59410 de 40 [mm] por 40 [mm] y de un espesor de 2.9 [mm] de acero al carbono AISI 1018.

La mesa de trabajo se diseñó mediante criterios de dimensiones y ergonomía que se lo puede encontrar en el Anexo A, en la cual se describe las dimensiones de piezas que se desean elaborar, además de la altura promedio de los trabajadores.

La estructura de la mesa de trabajo se puede apreciar en la figura 2.

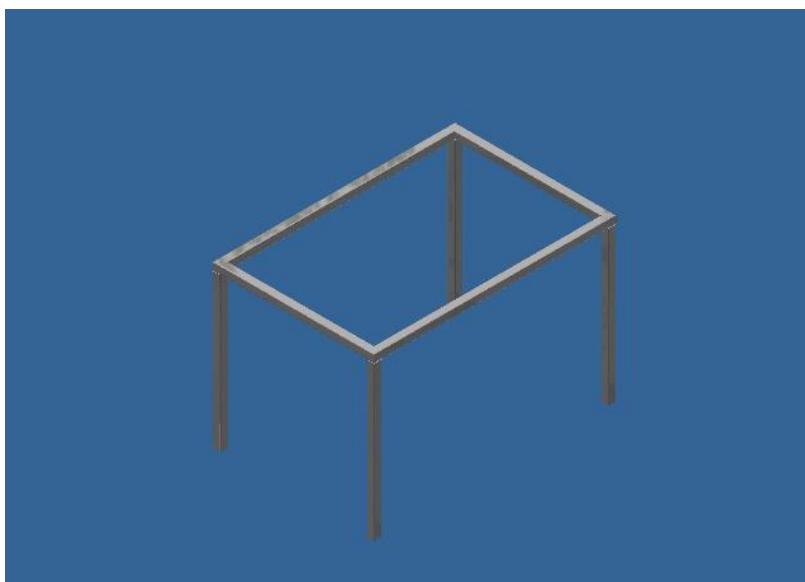


Figura 2. Mesa de trabajo

A continuación se diseñan los porta ejes verticales, en los cuales se apoyan los ejes gemelos verticales, en este proceso de diseño se obtienen cuatro torres que estarán apoyadas en los extremos de la mesa de trabajo, las dos torres del lado izquierdo tendrán en su extremo superior un destaje en forma de U, en donde descansarán los extremos de uno de los ejes gemelos verticales; a diferencia de las otras dos torres las cuales tendrán en su extremo superior unos apoyos cilíndricos.

Las torres son de la misma estructura que la mesa de trabajo de tubo cuadrado de norma DIN de 40 [mm] por 40 [mm], un espesor de 2.9 [mm] y una altura de 220 [mm], en los cuales están apoyados los ejes gemelos de 30 [mm] de diámetro y 850 [mm] de largo, para la

comprobación de las dimensiones de la estructura a continuación se realizan cálculos que validan las dimensiones seleccionadas como se lo aprecia en la tabla 6.

Las dimensiones escogidas para la torres se deciden a partir del análisis de ergonomía que se puede revisar en el Anexo A, el cual describe que se necesita una altura mínima de un 1600 [mm] como medida promedio del usuario, por lo cual se aumenta este tamaño de las torres para que el usuario tengan el mando del palpador a una altura prudente para su comodidad.

Para el diseño del porta ejes se toma en consideración la necesidad del paralelismo de los mismo, ya que si alguno de los ejes no se encuentra al nivel presentará una resistencia al movimiento del eje principal en el eje Y, por lo cual para poder controlar este detalle se decide diseñar en los extremos de las torres, un sistema de apoyos excéntricos, lo cual nos permitirá mediante este movimiento nivelar los ejes verticales, este sistema puede ser apreciado en la figura 3. Para entender mejor el conjunto mencionado, se lo puede apreciar en la figura 4

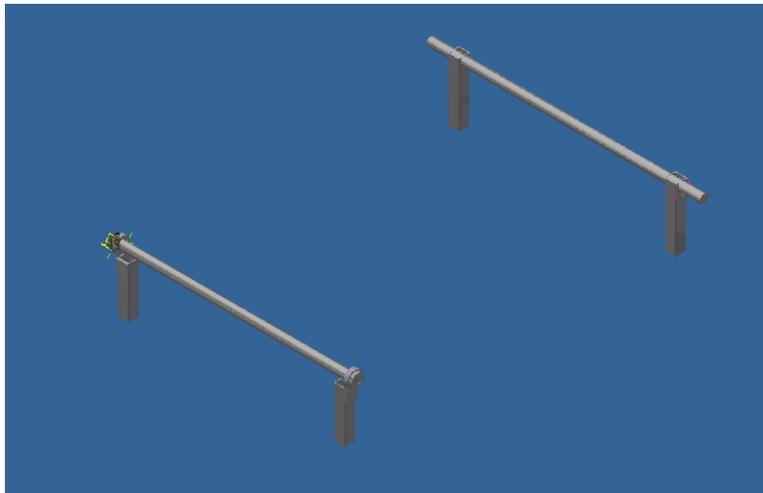


Figura 3. Ejes gemelos Verticales

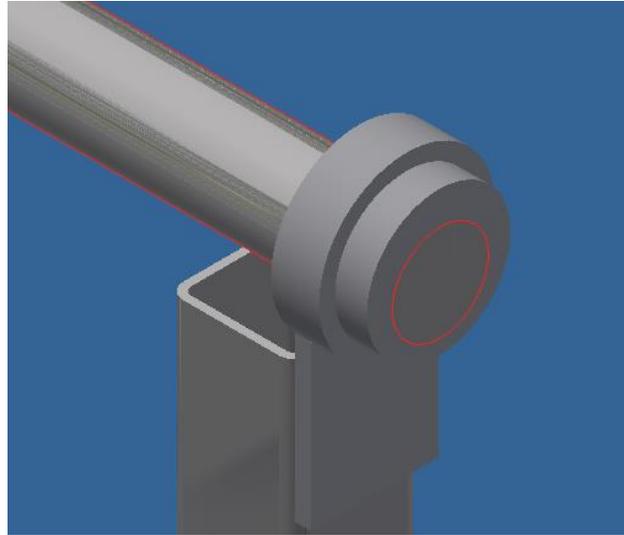


Figura 4. Cojinetes excéntricos

A partir de este punto, el diseño se basó en el eje principal horizontal, el carro porta herramientas y sus elementos.

Para el eje horizontal se utiliza un eje de las mismas características que las de los ejes gemelos, cambiando únicamente su longitud la cual es de 1100 [mm].

En este diseño, además del eje se realiza los apoyos, que estarán atornillados a los rodamientos lineales de los ejes gemelos verticales.

Este diseño se puede apreciar en la figura 5.

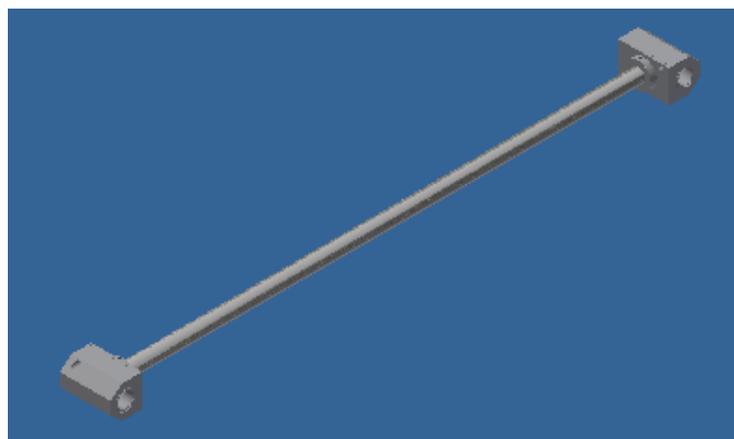


Figura 5. Eje principal

Se prosigue con el diseño del carro porta herramientas (Figura.6), en el cual estarán apoyados tanto el palpador como la porta plasma.

El carro está constituido por tres rodamientos lineales SFK, unidos mediante una placa de 638 [mm] de largo por 67 [mm] de ancho y 5 [mm] de espesor, estas medidas se presentan tras la necesidad de distribuir la punta del palpador y la punta de la pistola de plasma en los extremos de sus segmentos de trabajo y para que con su movimiento se alcance la dimensión máxima de las piezas de trabajo que se elaborarán como se puede apreciar en el Anexo A; los rodamientos por otra parte necesitan tener el suficiente espacio para poder ser fijados a esta placa, por lo cual la placa tiene el mismo ancho que un rodamiento SFK.

En esta placa estarán apoyados tanto el palpador con la porta plasma, los dos elementos estarán posicionados a la misma distancia del eje para que no exista variantes al momento de realizar los procesos de corte a través de un molde.

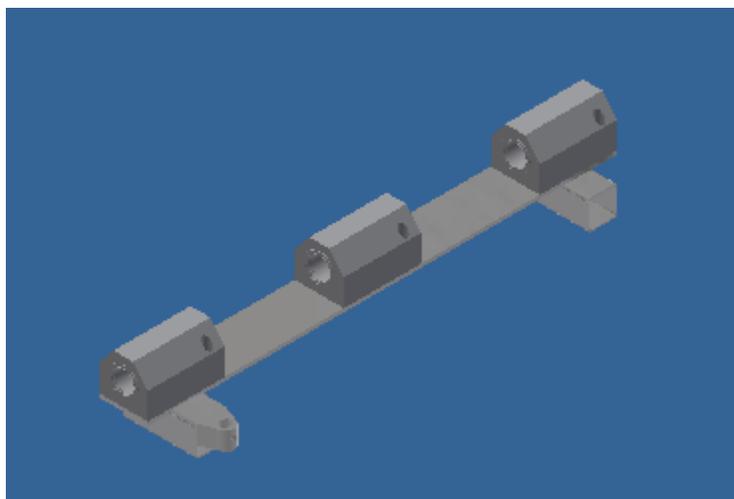


Figura 6. Carro Porta Herramientas.

Por último se realiza el diseño de los otros elementos, como es el palpador y la porta plasma.

El palpador es diseñado en forma de lápiz, mediante un cilindro central de 15 [mm] de diámetro por 190 [mm] de largo, el cual en su último tramo tiene una sección perfilada la cual se pensó para un mayor confort al momento del agarre de la herramienta, así mismo en su otro extremo posee una cabeza en forma de cono la cual será la encargada de seguir el perfil de las piezas que serán copiadas.

El porta plasma por otra parte, está diseñado en forma de un cilindro de 30 [mm] de diámetro cortado a la mitad, la mitad de su parte inferior cuenta con un canal el cual está pensado para el espacio que ocupará la boquilla del soplete de plasma. Se trabaja en base a estas dimensiones, tomando como modelos los sopletes que se pudieron encontrar en varias tiendas comerciales que se visitaron en la ciudad.

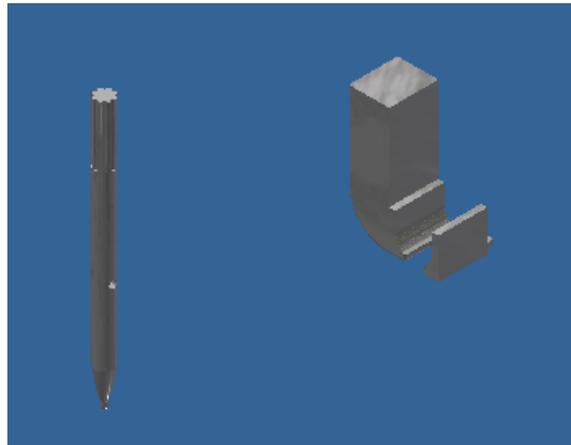


Figura 7. Palpador Y Porta Plasma

Mediante la unión o el ensamble de todas las partes anteriormente indicadas se obtiene un producto final el cual se lo puede apreciar a continuación.

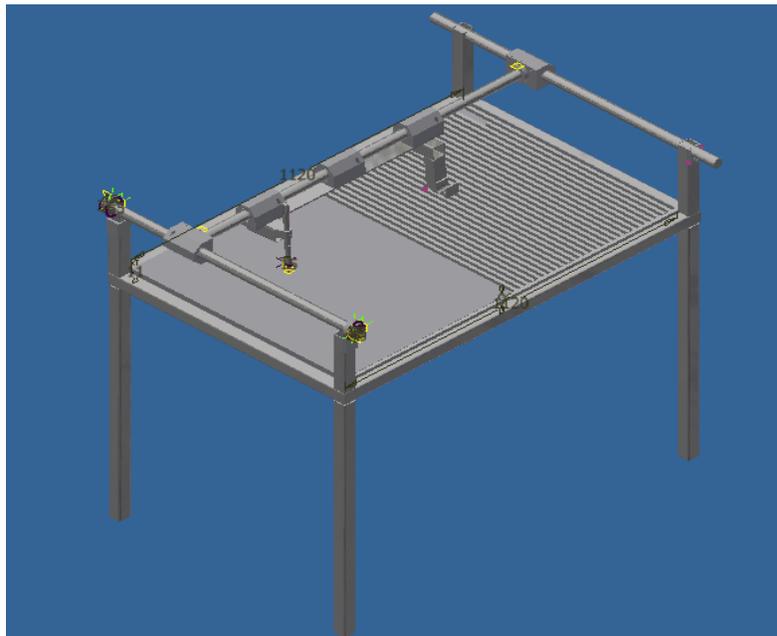


Figura 8. Vista preliminar del diseño virtual.

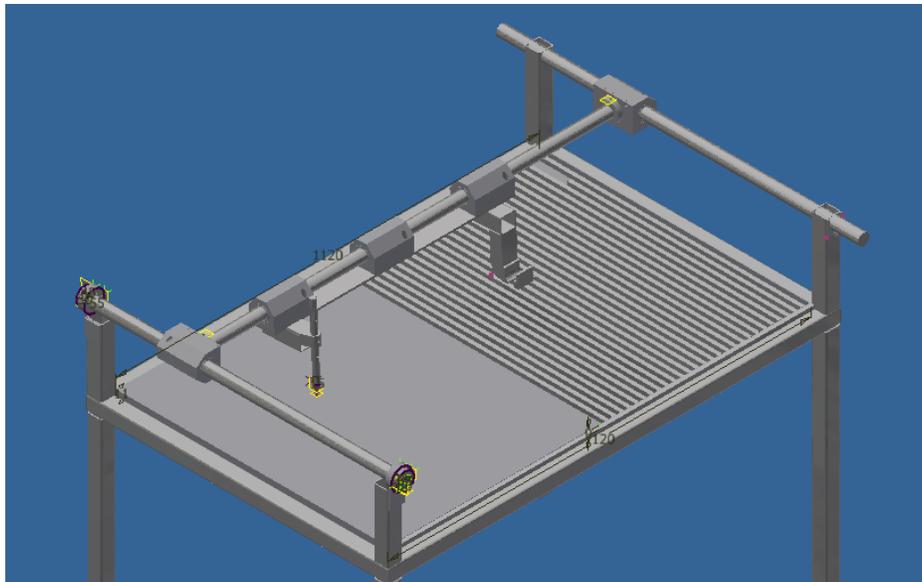


Figura 9. Diseño virtual con zoom en la mesa de trabajo.

Diseño de Materialización

Realizados los diseños preliminares en el software inventor se procede a realizar los cálculos para validar que las dimensiones y materiales escogidos sean los correctos para soportar los esfuerzos a los que estarán sometidos.

Diseño de Materialización Preliminar 1

Para comenzar con el proceso de diseño se decide realizar los análisis estructurales de los ejes para comprobar si las dimensiones de los mismos soportarán las cargas a las cuales estarán sometidas, se parte de los ejes para luego proceder con los cálculos sobre la estructura.

Se decide comenzar con los cálculos de los ejes, por la razón de que en los cálculos de la estructura intervienen las cargas que los ejes producen sobre la misma, lo cual indica que si las dimensiones y materiales de los ejes seleccionados no soportan las cargas a las que estarán sometidos no servirá

¹ Nota: se indica que se entiende como “Diseño de Materialización” a los cálculos de esfuerzos sobre la estructura para comprobar si las dimensiones y los materiales escogidos soportaran las cargas a las que estarán sometidas se obtiene este concepto del libro Diseño Concurrente anteriormente citado.

de nada que la estructura soporte las cargas de los ejes, por esta razón se precede a validar las dimensiones y materiales de los ejes en primera instancia. (Romeva, 2002)

Establecimiento de las Condiciones Críticas

La principal condición crítica en la cual se basó el diseño, fueron las dimensiones máximas de las piezas que se elaborarán, las cuales serán de 460 mm de largo por 580 mm de ancho y máximo espesor de 15 mm estas dimensiones están previamente establecidas en la sección de especificaciones técnicas, dichas dimensiones se pueden apreciar en el Anexo B ; además de esta condición se tomó en cuenta la necesidad del paralelismo de los dos ejes en el eje Y, para lo cual se procede a crear un sistema de bocines excéntricos en los extremos de un eje, a fin de poder nivelar los dos ejes con exactitud.

Reacciones de apoyo en los extremos del eje principal de desplazamiento (eje x).

Se procede a realizar el análisis del eje principal (Figura 10), en el cual se representan todas las cargas a las que está sometido.

Como se observó anteriormente, en el módulo de diseño en el software Inventor (Figura 5) el eje principal es el que soporta el movimiento del carro porta herramientas, lo cual obliga a tomar en cuenta en los cálculos las cargas que cada uno de estos elementos generan sobre el eje.

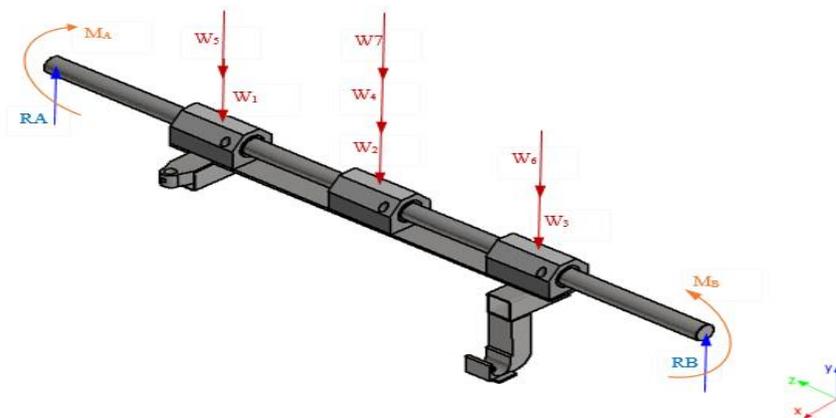


Figura 10. Diagrama de cuerpo libre del eje principal

De la figura 10 se obtiene la siguiente nomenclatura:

R_A = Fuerza de reacción en el extremo Izquierdo del eje, [N].

R_B = Fuerza de reacción en el extremo Derecho del eje, [N].

$W_1 = W_2 = W_3 =$ *Peso de los rulimanes lineales* [N].

$W_4 =$ *Peso de la placa de sujección de los rulimanes* [N].

$W_5 =$ *Peso del porta palpador* [N].

$W_{1,a} =$ *Suma de los pesos en el punto 1* [N].

$W_6 =$ *Peso del porta plasma* [N]. $W_{3,b} =$ *suma de los pesos en el punto 3* [N].

$W_7 =$ *Peso del eje principal* [N]. $W_{2,c} =$ *Peso de los pesos en el punto 2* [N].

$M_A =$ Momento en el apoyo del eje del lado izquierdo, [N].

$M_B =$ Momento en el apoyo del eje del lado derecho, [N].

Primero es necesario calcular todos los pesos que actúan sobre el sistema.

$W_1:$

$$m = 0.80 \text{ Kg}$$

$$W_1 = m * g = 0.80 * 9.81 = 7.84 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_1 = 7.84 [N]}$$

$W_4:$

$$m = 1.669 \text{ Kg}$$

$$W_4 = m * g = 1.669 * 9.81 = 16.37 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_4 = 16.37 [N]}$$

$$W_5: \quad m = 0.618 \text{ Kg}$$

$$W_5 = m * g = 0.618 * 9.81 = 6.06 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_5 = 6.06 [N]}$$

$$W_6: \quad m = 4.39 \text{ Kg}$$

$$W_6 = m * g = 4.39 * 9.81 = 43.06 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_6 = 43.06 [N]}$$

$$W_7: \quad m = 6.104 \text{ Kg}$$

$$W_7 = m * g = 6.104 * 9.81 = 59.88 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_7 = 59.88 [N]}$$

$$W_{1.a}: \quad W_{1.a} = W_1 + W_5 \text{ N}$$

$$W_{1.a} = 7.84 + 6.06 = 13.9 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_{1.a} = 13.9 [N]}$$

$$W_{3.b}: \quad W_{3.b} = W_3 + W_6 \text{ N}$$

$$W_a = 7.84 + 43.06 = 50.9 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_{3.b} = 50.9 [N]}$$

$$W_{2.c}: \quad W_{2.c} = W_2 + W_7 + W_4 \text{ N}$$

$$W_a = 7.84 + 59.88 + 16.37 = 84.09 \text{ [N]}$$

$$\mathbf{W_{2.c} = 84.09 [N]}$$

Antes de realizar los cálculos para despejar de las reacciones en los extremos del eje, es necesario obtener los momentos presentes en dichos extremos, los cuales son indispensables para los cálculos siguientes.

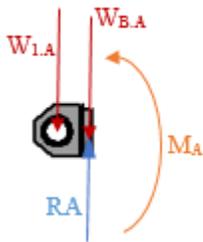


Figura 11.

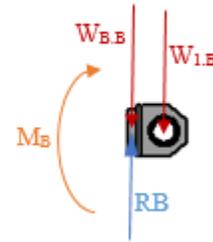


Figura 12.

De las figuras 11 y 12 obtenemos la siguiente nomenclatura:

M_A = Momento en el extremo A del eje [N].

$W_{1.A} = W_{1.B}$ = Peso del rodamiento los extremos del eje [N]

M_B = Momento en el extremo B del eje [N].

$W_{B.A}$ = Peso bocín en el extremo A del eje [N]. R_B =Reacción en el extremo B del eje [N]

$W_{B.B}$ = Peso del bocín en el extremo B del eje [N]. R_A =Reacción en el extremo A del eje [N].

Se calculan los pesos para proceder a realizar los cálculos.

$$W_{B.A}: \quad m = 0.428 \text{ [Kg]}$$

$$W_{B.A} = 0.428 * 9.81 = \text{ [N]}$$

$$W_{B.A} = 4.19 \text{ [N]}$$

$$W_{B.B}: \quad W_{B.B} = W_{B.A}$$

$$W_{B.B} = 4.19 [N]$$

$$W_{1.A}: \quad W_{1.A} = W_1 = 7.84 [N]$$

$$W_{1.A} = 7.84 [N]$$

Se realiza la sumatoria de momentos de los diagramas de cuerpo libre de las figuras 11 y 12 y se obtiene:

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ M_A + (R_A[N] * 0.035) - (W_{BA}[N] * 0.0405) &= 0 \\ M_A &= -0.035R_A[N] + 0.17 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum M_B &= 0 \\ M_B + (R_B[N] * 0.035[m]) - (W_{BB}[N] * 0.0405[m]) &= 0 \\ M_B &= -0.035R_B[N] + 0.17 \end{aligned} \quad (2)$$

Obtenidas las masas de todos los componentes que se encuentran sobre el eje, y tomando en cuenta que las incógnitas son las reacciones de los extremos del eje, es decir Ra y Rb, y que los momentos en cada uno de los extremos del eje producidos por el rodamiento lineal unido a una placa de sujeción en la cual se encuentra un buje, basta con realizar una sumatoria de fuerzas y una sumatoria de momentos en el eje para poder despegar las incógnitas, basando nuestro análisis en la figura 10.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A[N] + R_B[N] - W_1[N] - W_2[N] - W_3[N] - W_4[N] - W_5[N] - W_6[N] - W_7[N] = 0 \quad (3)$$

$$R_A + R_B = 3(7.84) + 16.37 + 6.06 + 43.06 + 59.88$$

$$R_A + R_B = 148.89 [N]$$

$$\sum M_A = 0$$

$$W_A * 0.2835 + W_B * 0.55 + W_C * 0.8165 - R_B * 1.1 + M_A - M_B = 0 \quad (4)$$

A partir de la solución del sistema de ecuaciones que incluye las expresiones 1 – 4, se obtienen los siguientes resultados:

$$R_A = 65.544[N]$$

$$R_B = 83.382[N]$$

$$M_A = -2.124 [Nm]$$

$$M_B = -2.748 [Nm]$$

Cargas críticas sobre los rodamientos lineales del eje principal

Después de calcular las reacciones en los dos extremos del eje es necesario calcular las cargas que se generan por el contacto de los rodamientos con el eje. Estas cargas posteriormente indicarán si los rodamientos soportan las cargas a las que serán sometidas, además de si la deflexión del eje se encuentra dentro del rango permitido.

Los rodamientos seleccionados son rodamientos lineales de la marca SKF, se escogen rodamientos lineales ya que su funcionamiento cumple con todas las necesidades de nuestra máquina, además de evitar la construcción de algún mecanismo de riel que simule los movimientos que provén estos rodamientos.

En primera instancia se determinan las fuerzas de reacción entre los ejes de desplazamiento y los rodamientos lineales, para lo cual se hace referencia a la figura 13

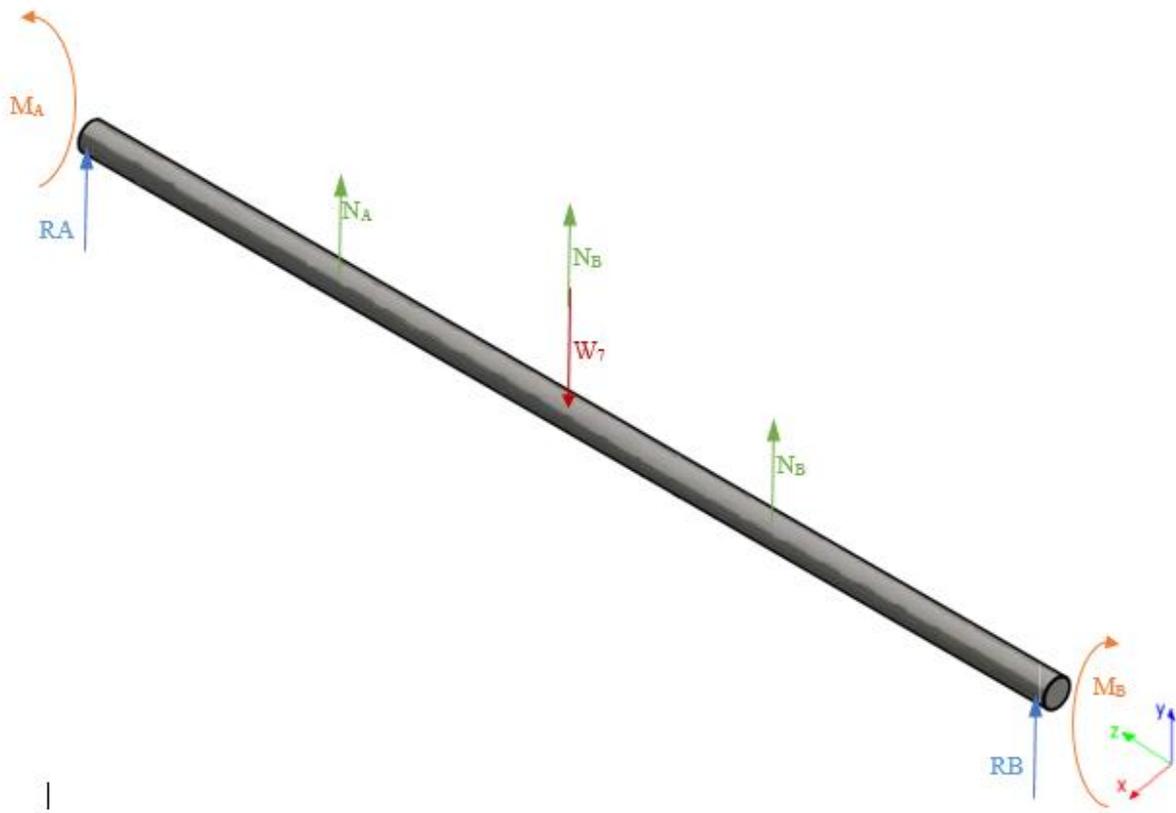


Figura 13. Diagrama de cuerpo del eje de desplazamiento principal

Para el análisis en base a la figura 13, se establece la siguiente notación:

R_A = Fuerza de reacción en el extremo izquierdo del eje principal, [N].

R_B = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje principal, [N].

N_A = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 1, [N].

N_B = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 2, [N].

N_C = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 3, [N].

W_7 = Peso del eje principal, [N]. M_B = Momento en el lado derecho del eje [N].

M_A = Momento en el lado izquierdo del eje [N].

Para realizar los cálculos se parte de los siguientes datos:

- Peso del eje (W_7): 59.88 [N]
- Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje (R_A): 65.544 [N]
- Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje (R_B): 83.382 [N]
- Momento en el lado izquierdo del eje (M_A): -2.124 [N.m]
- Momento en el lado derecho del eje (M_B): -2.748 [N.m]

Las reacciones de contacto normal se calculan a partir de las siguientes ecuaciones, obtenidas a partir del análisis del diagrama de cuerpo libre el cual es analizado en la figura 14, en este caso el eje estaría estáticamente indeterminado.

Un eje es estáticamente indeterminado, cuando a través del análisis estático usual se obtiene una cantidad de ecuaciones que no son las suficientes para despejar las incógnitas que se presentan en el problema, lo cual nos obliga a realizar un análisis de secciones sobre el eje, como se lo puede apreciar en la figura 14, mediante lo cual se obtendrán varias ecuaciones para encontrar las incógnitas deseadas.

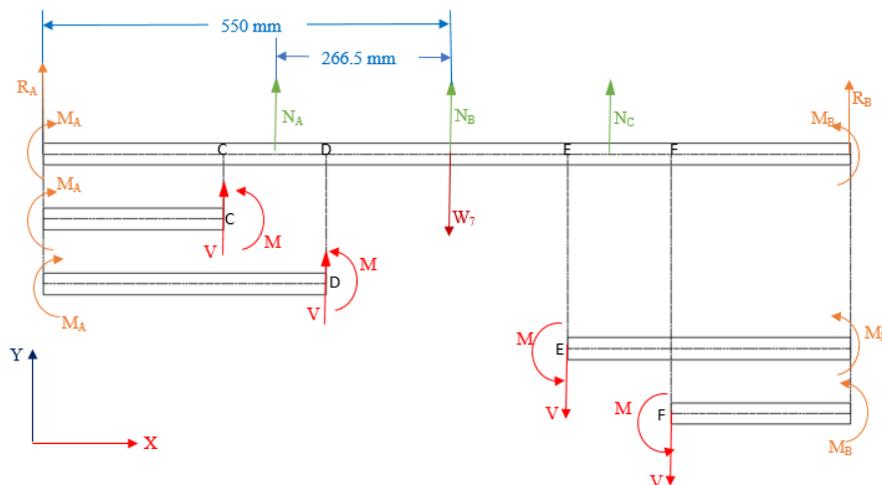


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre, distribución de cargas en el eje principal por secciones.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A[N] + R_B[N] - W_7[N] + N_A[N] + N_B[N] + N_C[N] = 0 \quad (5)$$

$$-65.544 - 83.382 + 59.88 = N_A + N_B + N_C$$

$$N_A + N_B + N_C = -89.046 [N]$$

$$\sum M_{NB} = 0 \quad (6)$$

$$0.2665N_C + 0.55R_B + M_B = 0.2665N_A + 0.55R_A + M_A$$

Para poder desarrollar un análisis de secciones entre los puntos de discontinuidad se establecen puntos de sección, los cuales los tenemos representados en la Figura 14, las mismas que están definidas por distancias y se desarrolla el análisis en los puntos C, D, E, F que los podemos ver igualmente en la Figura 14.

$$0 \leq x \leq (550 - 266.5)$$

$$\sum M_C = 0 \quad (7)$$

$$M = R_A x + M_A$$

$$(550 - 266.5) < x \leq 550$$

$$\sum M_D = 0 \quad (8)$$

$$M = R_A x + N_A(X - 283.5) + M_A$$

$$550 < x \leq 816.5$$

$$\sum M_E = 0 \quad (9)$$

$$M = N_C(816.5 - X) + M_B + R_B(816.5 + 283.5 - X)$$

$$(550 + 266.5) < x \leq 1100$$

$$\sum M_F = 0 \quad (10)$$

$$M = R_A(1.1 - X) + M_B$$

Deflexión debido a flexión

El problema de flexión de vigas, es con frecuencia el más común en el diseño mecánico.

Por lo cual se puede obtener que, la deflexión cuando una viga es sometida a un momento flexionante M está dada por:

$$\frac{1}{p} = \frac{M}{EI} \quad (11)$$

En la cual p es el radio de curvatura. La cual se sabe mediante desarrollos matemáticos que la curvatura de una curvatura plana está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{p} = \frac{d^2y/dx^2}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (12)$$

Donde se entiende que y describe la deflexión de la viga en cualquier punto x a lo largo de su longitud. Por lo que se obtiene la siguiente ecuación.

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \dot{v} \quad (13)$$

En muchos problemas de flexión, la pendiente es muy pequeña, por lo que el denominador de la ecuación 12 se lo considera como igual a la unidad. Entonces, la ecuación 11 se podrá describir como:

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} = \ddot{v} \quad (14)$$

(Richard G. Budynas, 2008)

En base a lo anterior, Mediante lo cual se realiza el siguiente desarrollo para cada una de las siguientes secciones:

Sección 1.

$$0 \leq x \leq 0.2835$$

$$M = R_A$$

$$M = R_{Ax} + M_A$$

15

$$\begin{aligned}
 EI\ddot{v} &= M = \dot{R}_A x + M_A \\
 EI\dot{v} &= \frac{R_A x^2}{2} + M_A x + C_{1.1} \\
 EIv &= \frac{R_A x^3}{6} + \frac{M_A x^2}{2} + C_{1.1}x + C_{1.2}
 \end{aligned}$$

Para poder obtener C1.1 y C1.2 se parte de las siguientes condiciones iniciales y considerando que la deflexión y la pendiente en el punto inicial son 0 obtenemos que:

$$v(0) = 0; \quad \dot{v}(0) = 0 \} C_{1.2} = 0; \quad C_{1.1} = 0 \quad (16)$$

Remplazamos estas condiciones iniciales en la ecuación 15 y se obtiene:

$$\begin{aligned}
 EI\dot{v} &= \frac{R_A x^2}{2} + M_A x \\
 EIv &= \frac{R_A x^3}{6} + \frac{M_A x^2}{2}
 \end{aligned} \quad (17)$$

Se procede a realizar el mismo procedimiento para la siguiente sección

Sección 2.

$$0.2835 < x \leq 0.550$$

$$M = R_A x + N_A(x - 0.2835) + M_A$$

$$EI\ddot{v} = M = R_A x + N_A \ddot{x} - N_A(0.2835) + M_A \quad (18)$$

$$EI\dot{v} = \frac{R_A x^2}{2} + \frac{N_A x}{2} - (0.2835)N_A x + M_A x + C_{2.1}$$

$$EIv = \frac{R_A x^3}{6} + \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} + \frac{M_A x^2}{2} + C_{2.1}x + C_{2.2}$$

A continuación se igualan las ecuaciones 17 con los resultados de la ecuación 18, y se obtiene x como punto común igual a 0.2835

$$\begin{aligned}
EIv &= EIv \\
\frac{R_A x^3}{6} + \frac{M_A x^2}{2} &= \frac{R_A x^3}{6} + \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} + \frac{M_A x^2}{2} + C_{2.1} x + C_{2.2} \\
0 &= \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} + C_{2.1} x + C_{2.2} \\
EI\dot{v} &= EI\dot{v} \\
\frac{R_A x^2}{2} + M_A x &= \frac{R_A x^2}{2} + \frac{N_A x}{2} - (0.2835) N_A x + M_A x + C_{2.1} \\
C_{2.1} &= -\frac{N_A x^2}{2} + 0.2835 N_A x \\
0 &= \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} - \frac{N_A x^3}{2} + 0.2835 N_A x^2 + C_{2.2} \\
C_{2.2} &= -\frac{0.2835 N_A x^2}{2} + \frac{1}{6} N_A x^3 \\
C_{2.2} &= \frac{-3(0.2835^3 N_A) + 1(0.2835^3 N_A)}{6} \\
C_{2.2} &= \frac{-2(0.2835^3) N_A}{6} \\
C_{2.2} &= -7.6 * 10^{-3} N_A \\
C_{2.1} &= \frac{0.2835^3 N_A}{2} \\
C_{2.1} &= 0.01139 N_A
\end{aligned} \tag{19}$$

Con los datos obtenidos se puede remplazar los resultados de la ecuación 19, en la ecuación 18 para obtener la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
EI\dot{v} &= \frac{R_A x^2}{2} + \frac{N_A x}{2} - (0.2835) N_A x + M_A x + C_{2.1} \\
EI\dot{v} &= \frac{R_A x^2}{2} + \frac{N_A x}{2} - (0.2835) N_A x + M_A x + 0.01139 N_A \\
EIv &= \frac{R_A x^3}{6} + \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} + \frac{M_A x^2}{2} + C_{2.1} x + C_{2.2}
\end{aligned} \tag{20}$$

$$EIv = \frac{R_A x^3}{6} + \frac{N_A x^3}{6} - \frac{0.2835 N_A x^2}{2} + \frac{M_A x^2}{2} + 0.001139x - 7.6 * 10^{-3} N_A$$

(

Sustituyendo los valores conocidos para la sección 2 y con un x de 0.550 mm se obtiene:

$$EIv = -6.4302 * 10^{-4} N_A + 1.4962 \quad (21)$$

Se realiza para las siguientes secciones el mismo procedimiento.

Sección 3

$$550 \leq x \leq 816.5$$

$$EI\ddot{v} = M = 0.8165 N_C - N_C x + M_B + 1.1R_B - R_B x$$

$$EI\dot{v} = 0.8165 N_C x - \frac{N_C x^2}{2} + M_B x + 1.1R_B x - \frac{R_B x^2}{2} + C_{3.1} \quad (22)$$

$$EIv = 0.8165 \frac{N_C x^2}{2} - \frac{N_C x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + \frac{1.1R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + C_{3.1} x + C_{3.2}$$

Sección 4

$$816.5 \leq x \leq 1100$$

$$EI\ddot{v} = M = 1.1R_B - R_B x + M_B$$

$$EI\dot{v} = 1.1R_B x - \frac{R_B x^2}{2} + M_B x + C_{4.1} \quad (23)$$

$$EIv = \frac{1.1R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + C_{4.1} x + C_{4.2}$$

Para poder obtener C4.1 y C4.2 se parten de las siguientes condiciones de borde y considerando que la deflexión y la pendiente en el punto final de la viga son 0 obtenemos que

$$v(1.1) = 0; \quad \dot{v}(1.1) = 0 \quad (24)$$

Por lo que si remplazamos en la ecuación se obtiene:

Sección 4

$$0 = 1.1^2 R_B - \frac{1.1^2 R_B}{2} + M_B 1.1 + C_{4.1}$$

$$C_{4.1} = -\frac{1.1^2 R_B}{2} + 1.1 M_B$$

$$C_{4.1} = -47.42331 \quad (25)$$

$$0 = \frac{3}{3} \left(\frac{1.1^3 R_B}{2} \right) - \frac{1.1^3 R_B}{6} + \frac{1.1^2 M_B}{2} + 1.1 C_{4.1} + C_{4.2}$$

$$C_{4.2} = 16.834367$$

Vea el valor de Rb, Mb en la página 28.

Ahora se igualan las ecuaciones 22 con 23 para obtener, con x como punto común igual a 816.5 mm y utilizando los resultados de las ecuaciones 25 se obtiene:

$$EIv_3 = EIv_4$$

$$1.1 R_B x - \frac{R_B x^2}{2} + M_B x + C_{4.1} = 816.5 N_C x - \frac{N_C x^2}{2} + M_B x + 1.1 R_B - \frac{R_B x^2}{2} + C_{3.1}$$

$$C_{3.1} = C_{4.1} - (0.8165^2) N_C + \frac{0.8165^2 N_C}{2}$$

$$C_{3.1} = -0.333 N_C - 47.42331 \quad (26)$$

$$EIv_3 = EIv_4$$

$$\frac{1.1 R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + C_{4.1} x + C_{4.2} = 816.5 \frac{N_C x^2}{2} - \frac{N_C x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + \frac{1.1 R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + C_{3.1} x + C_{3.2}$$

$$C_{3.2} = 0.8165 C_{4.1} + C_{4.2} - \left(\frac{0.8165^3 N_C}{3} \right) - (0.8165 C_{3.1})$$

$$C_{3.2} = 0.09N_C + 16.8343$$

Se reemplaza las ecuaciones 26 en la sección 3 para despejar

Sección 3

$$EIv = 0.8165 \frac{N_C x^2}{2} - \frac{N_C x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + \frac{1.1R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + C_{3.1}x + C_{3.2}$$

$$EIv = 0.8165 \frac{N_C x^2}{2} - \frac{N_C x^3}{6} + \frac{M_B x^2}{2} + \frac{1.1R_B x^2}{2} - \frac{R_B x^3}{6} + (-0.333N_C - 47.42331)x + 0.09N_C + 16.8343 \quad (27)$$

Sustituyendo los valores conocidos para la sección 3 y un x de 0,550 se obtiene

$$EIv = 0.0032N_C + 1.8695 \quad (28)$$

Se iguala la ecuación 21 que corresponde en la sección 2 a la ecuación 28 de la sección 3 y se obtiene:

$$-6.4302 * 10^{-4}N_A + 1.4962 = 0.0032N_C + 1.8695$$

$$N_A = -622.4606 - 4.906N_C \quad (29)$$

Se reemplaza el resultado de la ecuación 29 en la ecuación 6 para poder despejar una de las normales.

$$\sum M_{NB} = 0$$

$$0.2665N_C + 0.55R_B + M_B = 0.2665N_A + 0.55R_A + M_A$$

$$0.2665N_C + 45.86 - 2.748 = -165.88 - 1.30N_C + 36.047 - 2.124 \quad (30)$$

$$N_C = -111.23 [N]$$

Con una normal despejada se podrá despejar las demás, obteniendo como resultado

$$\begin{aligned}
 N_A &= -76.7611 [N] \\
 N_B &= 98.9487 [N] \\
 N_C &= -111.23 [N]
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

Para comprobar que los valores obtenidos son correctos y poder continuar con los cálculos con suma confianza, se realiza una comprobación en la plataforma Inventor, usando su opción de “Design accelerator” el cual permite ingresar valores de cargas y obtener todas las cargas que se presentaran en este eje.

En este caso obtenidas las normales se procede a comprobar las reacciones con las que se calcularon estas normales, lo cual si se ingresa en el programa los normales sobre el eje se debe obtener las reacciones con las que se trabajó.

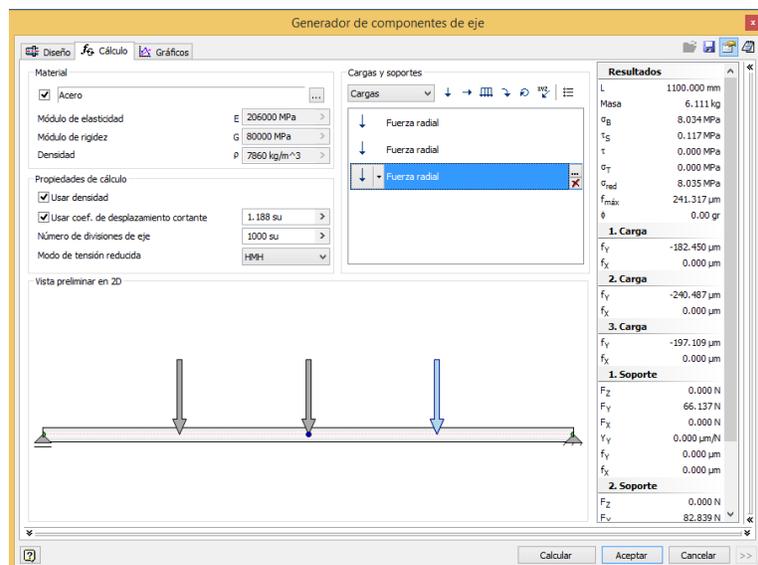


Figura 15. Generador de componentes Inventor.

En la figura 15, se observa la ventana del programa que permite el ingreso de las cargas sobre el eje con sus valores respectivos, en este caso N_A , N_B , N_C .

Así se obtiene los gráficos de cargas que se presentan en el eje, lo cual se puede apreciar en la figura 16.

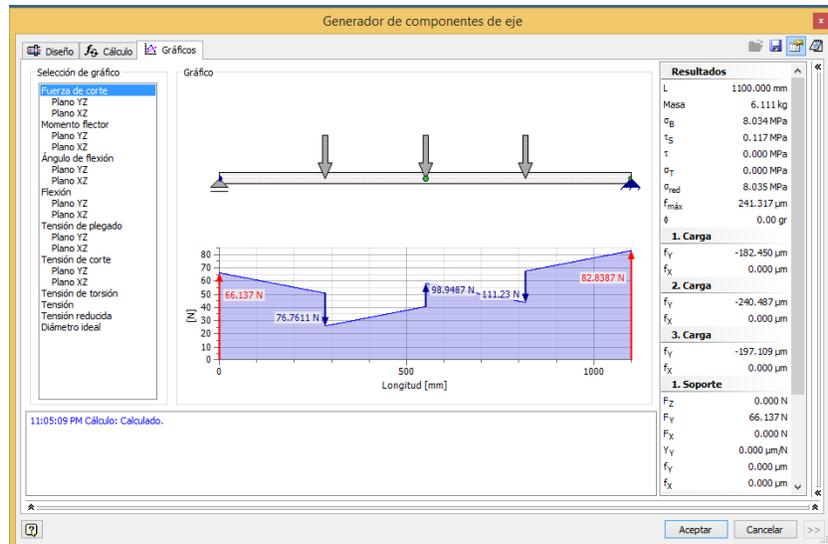


Figura 16. Generador de componentes Inventor.

Obtenidas las Figuras 15, 16 se comprueba que los datos obtenidos a través de cálculos teóricos coinciden con los que se obtienen mediante la plataforma Inventor, lo cual valida los cálculos realizados ya que de las dos maneras se obtienen valores similares.

Como se puede observar a través del ingreso de las normales obtenidas físicamente, se obtiene la reacciones en el extremo del eje que se observan en la Figura 16 en las líneas rojas.

Cargas críticas sobre los rodamientos lineales de los ejes transversales.

Obtenidas las reacciones en los extremos del eje principal, se procede a calcular las reacciones de los extremos del eje transversal, las cuales se producen en los apoyos de la estructura.

Para poder realizar el cálculo de estas reacciones se basa el análisis en la Figura 17, la cual describe el eje transversal izquierdo con sus respectivas cargas.

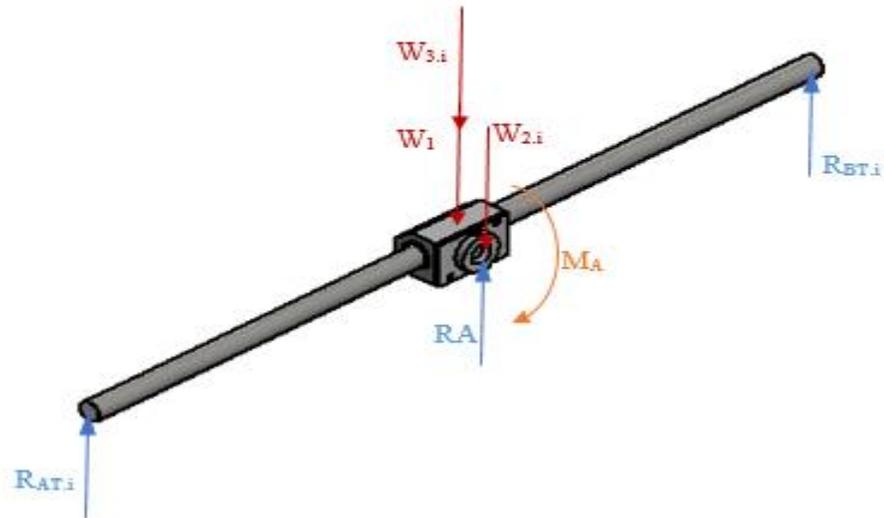


Figura 17. Diagrama del cuerpo libre del eje transversal izquierdo

De la figura 17 se obtiene la siguiente notación:

$R_{AT,i}$ = Fuerza de reacción en el extremo Izquierdo del eje transversal, [N].

$R_{BT,i}$ = Fuerza de reacción en el extremo Izquierdo del eje transversal, [N].

R_A = Fuerza de reacción en el extremo Izquierdo del eje principal, [N].

W_1 = Peso del rodamiento, [N].

$W_{2,i}$ = Peso del cojinete en lado izquierdo, [N].

$W_{3,i}$ = Peso del eje transversal izquierdo, [N].

Se calcula los pesos de cada elemento con sus masas correspondientes.

$$W_1: \quad m = 0.80 [Kg]$$

$$W_1 = 0.80 * 9.81 = [N]$$

$$\mathbf{W_1 = 7.84 [N]}$$

$$W_{2.i}: \quad m = 0.55 [Kg]$$

$$W_{2.i} = 0.55 * 9.81 = [N]$$

$$\mathbf{W_{2.i} = 5.39 [N]}$$

$$W_{3.i}: \quad m = 4.71 [Kg]$$

$$W_{3.i} = 4.71 * 9.81 = [N]$$

$$\mathbf{W_{3.i} = 46.20 [N]}$$

Obtenidas los pesos de los elementos y a través del análisis de la figura 17, se obtiene las siguientes ecuaciones de las cuales despejaremos las reacciones en los extremos del eje izquierdo:

$$\sum Fy = 0$$

$$R_{AT.i} + R_{BT.i} - W_1 - W_{2.i} - W_{3.i} + R_A = 0$$

$$R_{AT.i} + R_{BT.i} - 7.84 - 5.39 - 46.20 + 65.544 = 0$$

$$R_{AT.i} + R_{BT.i} = -6.11[N]$$

(32)

$$\sum M_A = 0$$

$$(R_{AT.i} * 0.425) - (R_{BT.i} * 0.425) = 0$$

$$R_{AT.i} = R_{BT.i}$$
(33)

Se reemplaza la ecuación (32) en la ecuación (33) y se despeja las reacciones en los extremos del eje transversal izquierdo:

$$(33) \text{ en } (32)$$

$$R_{AT.i} + R_{BT.i} = -6.11$$

$$2R_{AT.i} = -6.11$$

$$R_{AT.i} = -3.0574[N]$$
(34)

$$R_{AT.i} = R_{BT.i}$$

$$R_{BT.i} = -3.057[N]$$
(35)

Se realiza el mismo análisis del eje transversal del lado derecho para obtener las reacciones en sus extremos, el análisis se realiza a través de la Figura 18.

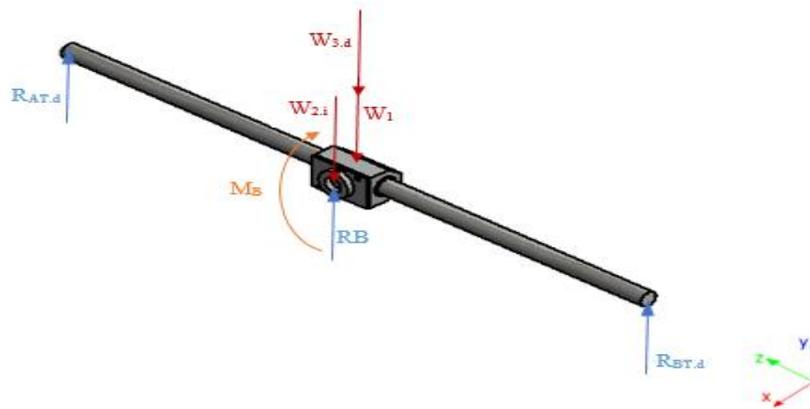


Figura 18. Diagrama de cuerpo libre eje transversal derecho

Del análisis de la figura 18 se obtiene la siguiente notación:

$R_{AT.d}$ = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje transversal, [N].

$R_{BT.d}$ = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje transversal, [N].

R_B = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje principal, [N].

W_1 = Peso del rodamiento, [N].

$W_{2.d}$ = Peso del bocín en lado derecho, [N].

$W_{3.d}$ = Peso del eje transversal derecho, [N].

Se obtiene las masas de los elementos:

$$W_1: \quad m = 0.80 \text{ [Kg]}$$

$$W_1 = 0.80 * 9.81 = \text{[N]}$$

$$\mathbf{W_1 = 7.84 \text{ [N]}}$$

$$W_{2.d}: \quad m = 0.55 \text{ [Kg]}$$

$$W_{2.d} = 0.55 * 9.81 = \text{[N]}$$

$$\mathbf{W_{2.d} = 5.39 \text{ [N]}}$$

$$W_{3.d}: \quad m = 4.71 \text{ [Kg]}$$

$$W_{3.d} = 4.71 * 9.81 = \text{[N]}$$

$$\mathbf{W_{3.d} = 46.20 \text{ [N]}}$$

Se despeja las reacciones del eje transversal del lado derecho:

$$\begin{aligned}\sum Fy &= 0 \\ R_{AT.d} + R_{BT.d} - W_1 - W_{2.d} - W_{3.d} + R_B &= 0 \\ R_{AT.d} + R_{BT.d} - 7.84 - 5.39 - 46.20 + 83.382 &= 0 \\ R_{AT.d} + R_{BT.d} &= -23.952[N]\end{aligned}\tag{36}$$

$$\begin{aligned}\sum M_B &= 0 \\ (R_{AT.d} * 0.425) - (R_{BT.d} * 0.425) &= 0 \\ R_{AT.d} &= R_{BT.d}\end{aligned}\tag{37}$$

Se reemplaza la ecuación (37) en la ecuación (36) y se despeja las reacciones en los extremos del eje transversal derecho:

$$\begin{aligned}(38) \text{ en } (37) \\ R_{AT.d} + R_{BT.d} &= -23.952 \\ 2R_{AT.d} &= -23.952 \\ R_{AT.d} &= -11.976[N]\end{aligned}\tag{38}$$

$$\begin{aligned}R_{AT.d} &= R_{BT.d} \\ R_{BT.d} &= -11.976[N]\end{aligned}\tag{39}$$

Después obtener las reacciones en los extremos de los dos ejes transversales, se procede a realizar un análisis para obtener las cargas sobre los ejes

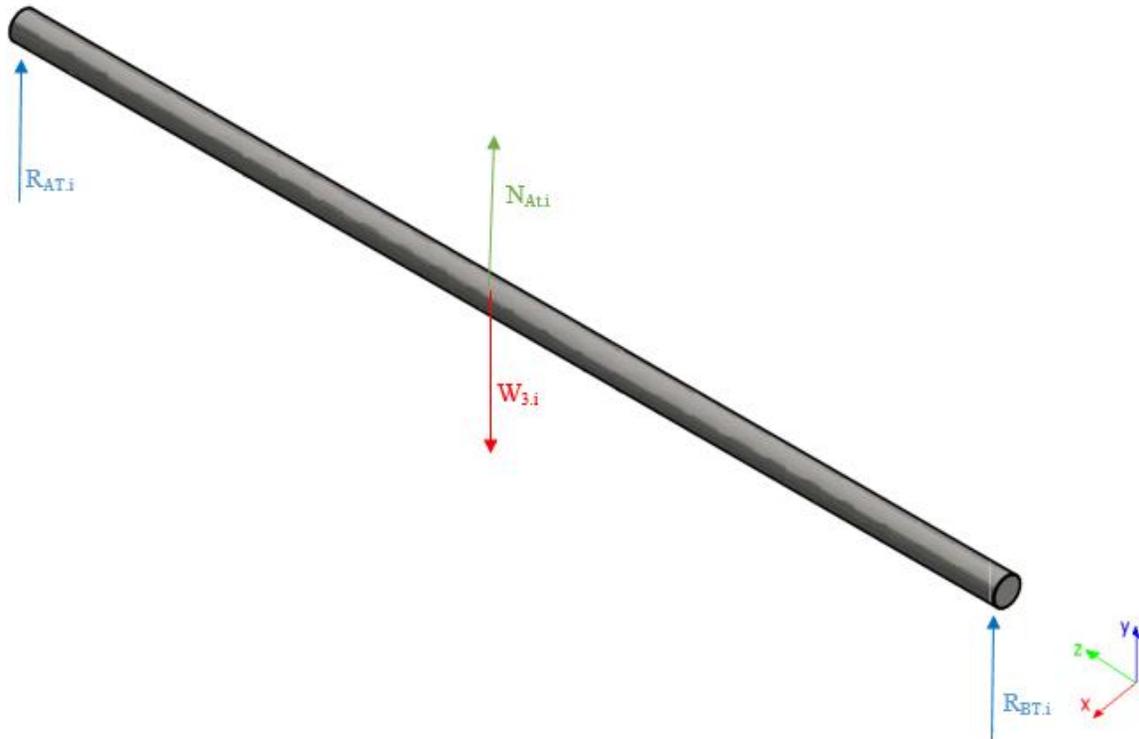


Figura 19. Diagrama cuerpo libre izquierdo

En donde:

$R_{AT.i}$ = Fuerza de reacción en el extremo izquierdo del eje transversal, [N].

$R_{BT.i}$ = Fuerza de reacción en el extremo izquierdo del eje transversal, [N].

$W_{3.i}$ = Peso del eje transversal derecho, [N].

$N_{AT.i}$ = Normal en eje trasversal izquierdo.

$$\begin{aligned} \sum F_y &= 0 \\ R_{AT.i} + R_{BT.i} - W_{3.d} &= 0 \\ R_{AT.i} + R_{BT.i} - 46.20 + N_{AT.i} &= 0 \\ N_{AT.i} &= 52.314 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (40)$$

A través del generador de componentes de inventor se obtiene la gráfica del momento flector, el mismo que se lo observa en la Figura 20, del cual se obtiene el momento flector máximo, que se necesitará a continuación para el análisis del eje.

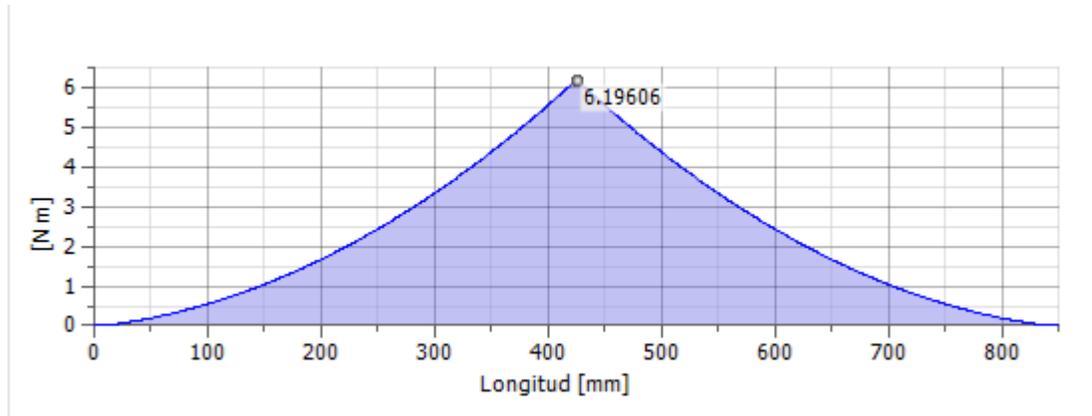


Figura 20. Gráfico momento Flector Eje transversal Izquierdo.

Se realiza el mismo procedimiento para el eje transversal derecho.

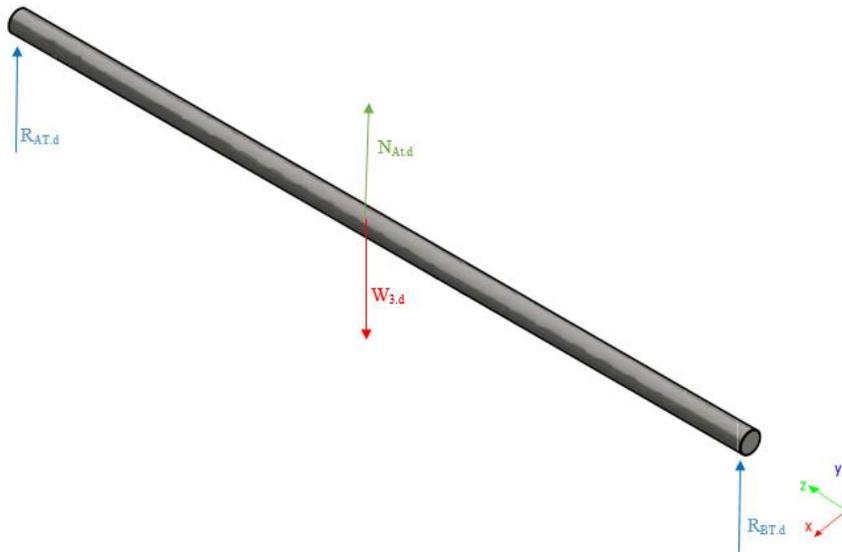


Figura 21. Diagrama de cuerpo libre derecho

En donde:

$R_{AT,d}$ = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje transversal, [N].

$R_{BT,d}$ = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje transversal, [N].

$W_{3.d}$ =Peso del eje transversal derecho, [N].

$N_{AT.d}$ = Normal en eje trasversal derecho.

$$\sum Fy = 0$$

$$R_{AT.d} + R_{BT.d} - W_{3.d} = 0$$

$$R_{AT.d} + R_{BT.d} - 46.20 + N_{AT.d} = 0$$

$$N_{AT.d} = -70.152 [N]$$
(41)

Así mismo del eje derecho se obtiene el gráfico del momento flector, mediante el generador de componentes de la plataforma Inventor el cual se lo aprecia en la Figura 22.

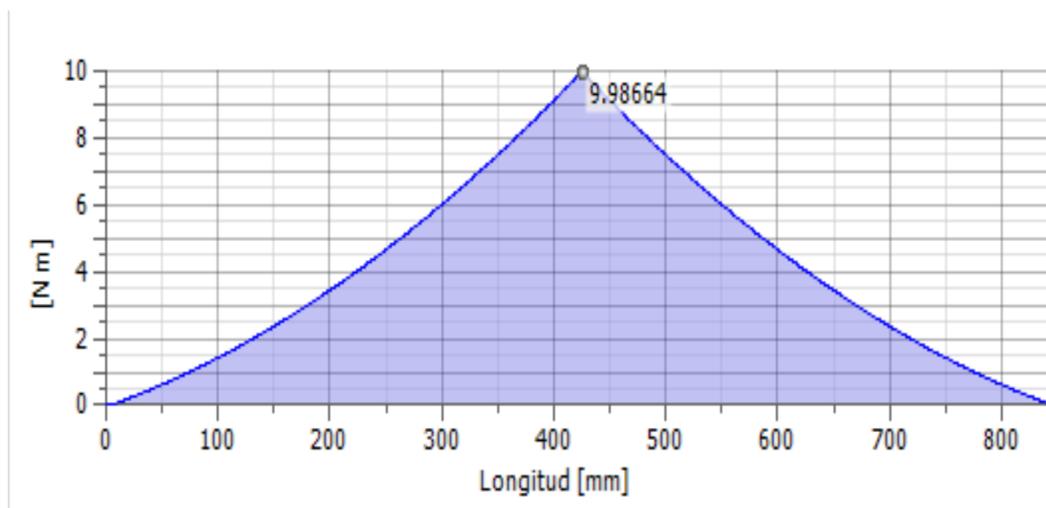


Figura 22. Gráfico momento Flector eje transversal derecho.

Diámetro del eje en la sección de los rodamientos lineales

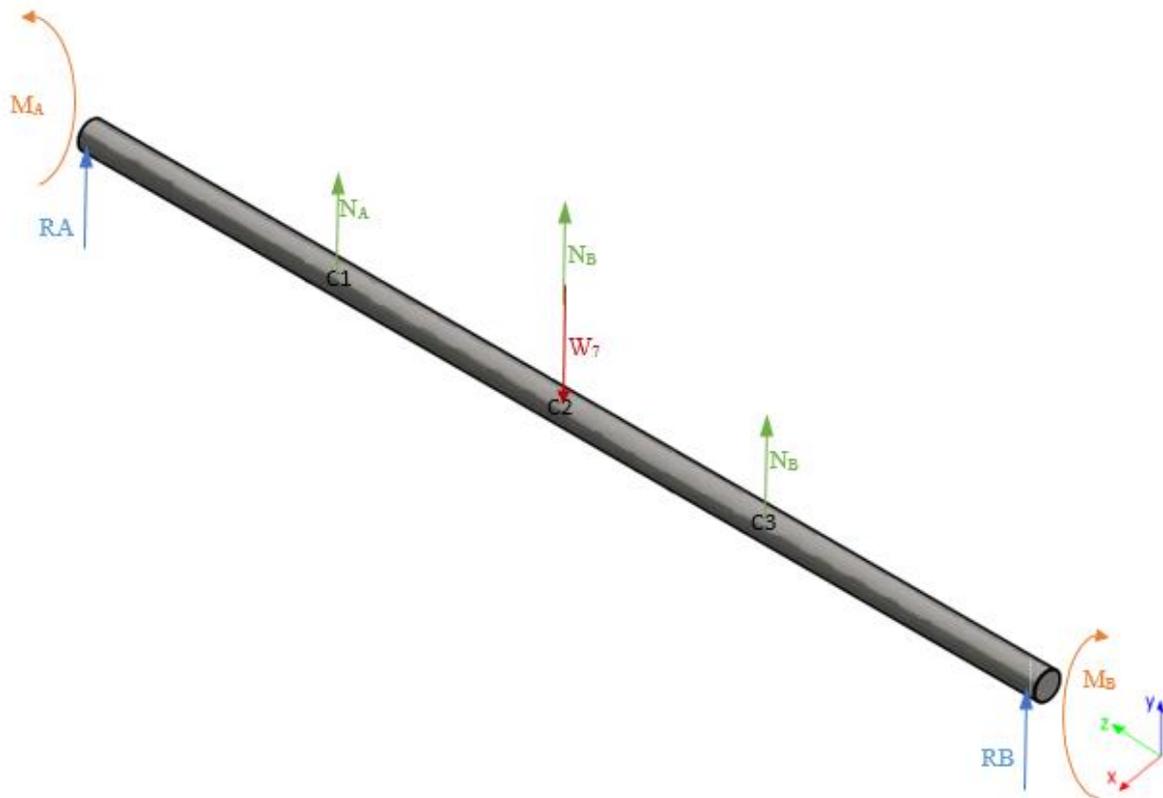


Figura 23. Diagrama del cuerpo libre del eje principal

Del análisis de la figura 23 se obtiene la siguiente notación:

R_A = Fuerza de reacción en el extremo izquierdo del eje principal, [N].

R_B = Fuerza de reacción en el extremo derecho del eje principal, [N].

N_A = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 1, [N].

N_B = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 2, [N].

N_C = Reacción de contacto normal entre el eje y el rodamiento lineal 3, [N].

W_7 = Peso del eje principal, [N]. M_B = Momento en el lado derecho del eje [N].

M_A = Momento en el lado Izquierdo del eje [N].

Los diagramas de cortante, momento flector, y deflexión se obtienen mediante el módulo de cálculo del generador de componentes de ejes del programa INVENTOR.



Figura 24. Diagrama de cortante para el eje principal

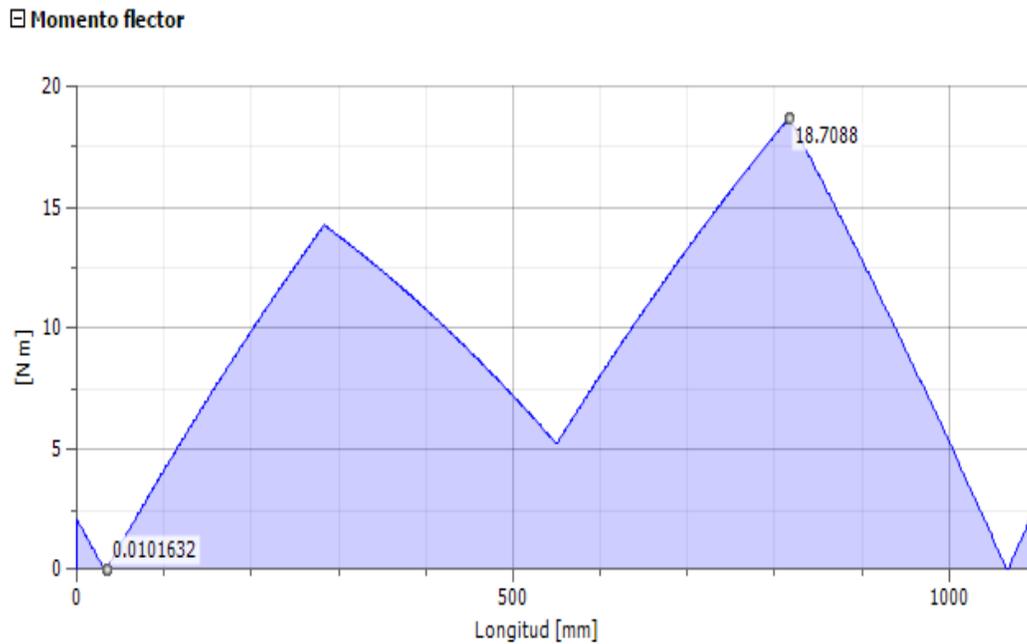


Figura 25. Diagrama de momento Flector para el eje principal

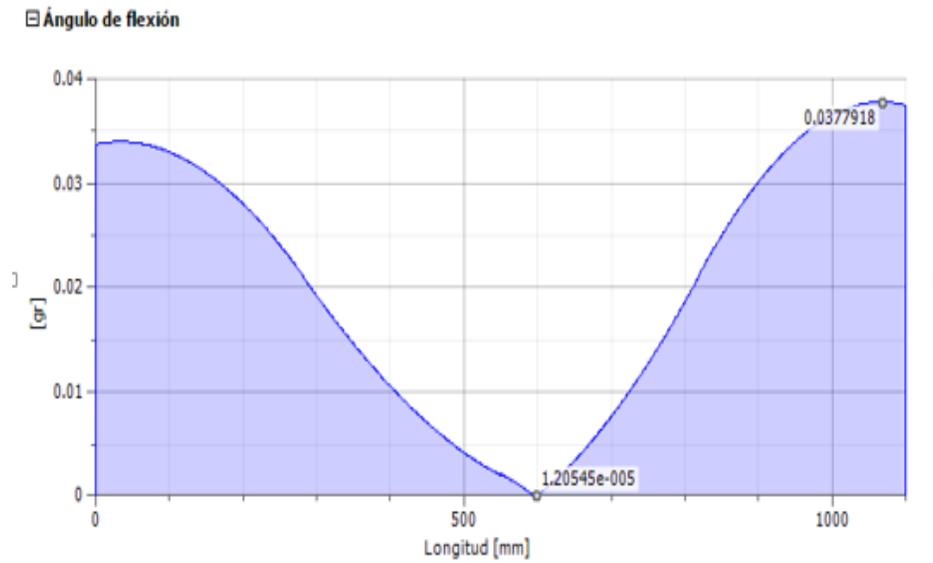


Figura 26. Diagrama del ángulo de flexión para el eje principal

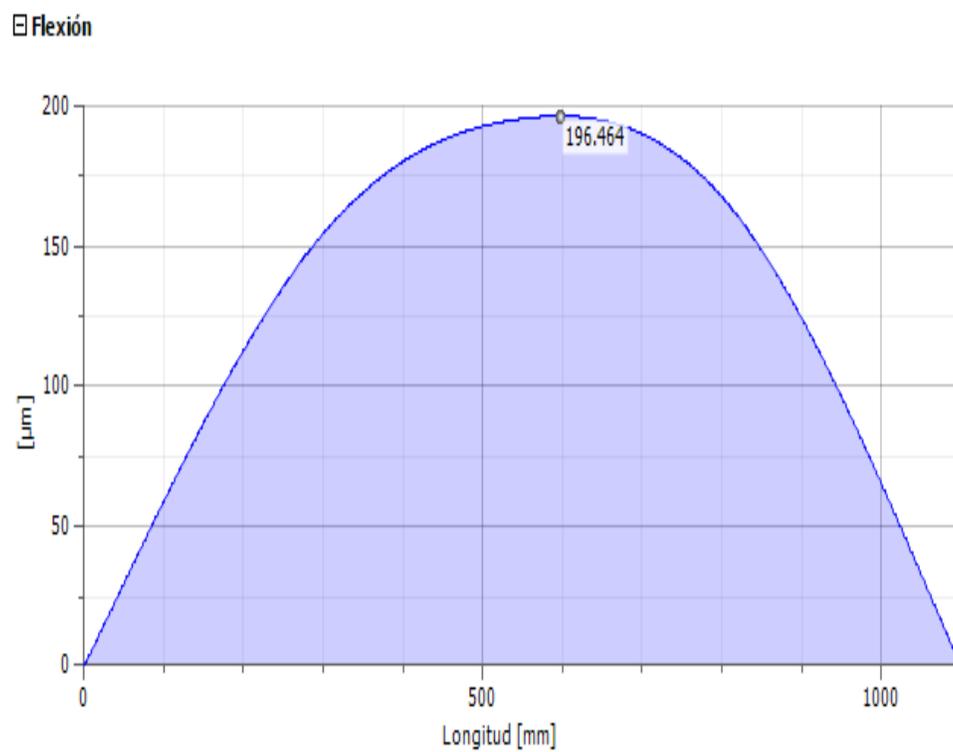


Figura 27. Diagrama de deflexión para el eje principal

Tabla 1

Resultados de cálculos para el eje principal

COMPONENTE	EJE SUPERIOR	
	SECCIÓN	TOTAL
FUERZA DE REACCIÓN EN LOS SOPORTES (R#) [N]	A	65.5701
	B	83.4086
MOMENTO MÁXIMO [Nm]	C3	18.7088
PENDIENTE MÁXIMA [rad]	B	0.0377918
	-----	-----
DEFLEXIÓN MÁXIMA [Um]	C3	196.464
	-----	-----
ESFUERZO MÁXIMO [MPa]	C3	7,058

Tabla 2

Dimensionamiento del eje principal

EJE PRINCIPAL		
SECCIÓN	DIÁMETRO [mm]	LONGITUD [mm]
A		
B		
C1	30	1100
C2		
C3		

Resultados

Evaluación de Los Principales Parámetros

A continuación se procede a evaluar y conceptualizar los datos obtenidos anteriormente, en busca de fallas en el diseño.

En el módulo de diseño de materialización se obtienen las principales cargas a las cuales la estructura estará sometida, en este módulo el de evaluación de parámetros se procede a analizar todos esos datos sobre la estructura en busca de fallas en la misma, lo cual conllevará a un rediseño de la misma.

Análisis de los Principales Elementos

Para el análisis de fallas en los elementos, el estudio se basa en 4 puntos concretos: ejes, rodamientos, estructura principal y los cordones de soldaduras de la misma.

El análisis se centra en estos elementos, debido a que son los que requirieron mayor atención el momento del diseño, ya que si alguna dimensión o selección del material no cumple con las exigencias del diseño al momento de soportar las cargas a las cuales serán sometidas, podría presentar una ruptura o falla en su funcionamiento. En cualquiera de los dos casos, eso será un problema para el diseñador.

Ejes

Para realizar el análisis de cargas sobre el eje principal, se utiliza la teoría de falla que es la de la energía de distorsión, la cual se presenta por medio de la siguiente fórmula para su cálculo:

$$\sigma' = \frac{S_y}{n}$$

En donde se conoce que la resistencia a la fluencia-acero laminado en caliente es $S_y=170$ MPa, y se asume un factor de seguridad $n=2$. (Richard G. Budynas, 2008)

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} = \sigma_m, \text{ Ya que } \tau \text{ y } \sigma_y \text{ son nulos}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_m} \quad (42)$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_m} \quad (43)$$

$$\sigma_m = \frac{170}{2} = 85 \text{ [MPa]}$$

Obtenido el esfuerzo máximo para un factor de seguridad igual a 2, se procede a realizar un análisis para el diámetro del eje utilizando el momento máximo que soporta el eje, formula que se obtiene de la flexión elástica.

El momento máximo se obtiene de la figura 25.

$$\sigma_m = \frac{M_c}{I} = \frac{32M}{\pi D^3} = \frac{32 * 18.70}{3.14 * D^3}$$

$$85 = \frac{598.4}{3.14 * D^3} \quad (44)$$

$$D = 13 \text{ [mm]}$$

No existen rodamientos con este diámetro interior, por lo que se asume un diámetro superior de 15 mm o el inferior de 10 mm.

Se obtiene un diámetro menor al que se eligió para el diseño, por lo que se entiende que con la medida de diámetro escogido que es igual a 30 mm se obtendrá un factor de seguridad mayor al deseado lo cual es un referente positivo y valido para el diseño realizado.

Para su comprobación a continuación se realizara el cálculo para un factor de seguridad con el valor de diámetro del diseño.

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{M * c}{I} = \frac{32M}{\pi D^3} = \frac{32 * 18.70}{3.14 * (0.03)^3} \\ \sigma_m &= 7054690.218 \\ n &= \frac{S_y}{\sigma_m} = \frac{170 * 10^6}{7.055 * 10^{-03}} \\ n &= 24.0974 [US]\end{aligned}\tag{45}$$

Este factor de seguridad representa que el eje utilizado para el diseño, soportará con satisfacción las cargas a las cuales estará sometido en el trabajo que se ejecuta con esta máquina. Se realiza el mismo procedimiento para obtener los factores de seguridad de los ejes transversales derecho e Izquierdo.

Factor de Seguridad para el Eje Transversal Izquierdo

El momento máximo del eje izquierdo se obtiene de la figura 20

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{M_C}{I} = \frac{32M}{\pi D^3} = \frac{32 * 6.19}{3.14 * (0.03)^3} \\ \sigma_m &= 2335215.63 \\ n &= \frac{S_y}{\sigma_m} = \frac{170 * 10^6}{2335215.63} \\ n &= 72.79 [US]\end{aligned}\tag{46}$$

Factor de Seguridad para el Eje Transversal Derecho

El momento máximo del eje derecho se obtiene de la figura 22

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{M_C}{I} = \frac{32M}{\pi D^3} = \frac{32 * 9.98}{3.14 * (0.03)^3} \\ \sigma_m &= 3765016.49 \\ n &= \frac{S_y}{\sigma_m} = \frac{170 * 10^6}{3765016.49} \\ n &= 45.15 [US]\end{aligned}\tag{47}$$

Rodamientos

Los rodamientos son analizados a través de su capacidad de carga estática, la cual se define en la norma ISO 76:2006, corresponde a una tensión de contacto calculada en el medio del elemento rodante y el camión de rodadura, la cual produce una deformación sobre el elemento rodante, que equivale aproximadamente a 0,0001 del diámetro del elemento rodante.

Mediante la información obtenida se procede a realizar un análisis sobre los valores que se tiene de los rodamientos y sus cargas

Para calcular la carga estática, se parte de la siguiente ecuación:

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (48)$$

(SKF, 2016)

En donde: S_0 = Factor de seguridad estática
 C_0 = Capacidad de carga estática básica. (KN)
 P_0 = Carga Estática Equivalente. (KN)

A través de esta ecuación se obtienen los resultados para los rodamientos, los cuales están expresados en la siguiente tabla:

Tabla 3

Evaluación de la preselección de rodamientos. Eje principal

RODAMIENTO	DESIGNACIÓN RODAMIENTOS	Po [N]	Co [N]	So
A	SKF – 2206 ETN9	-76.7611	5200	67.74
B	SKF – 2206 ETN9	98.9487	5200	52.55
C	SKF – 2206 ETN9	-111.23	5200	46.74

Tabla 4

Evaluación de la preselección de rodamientos. Ejes transversales.

Eje lado	Rodamiento	DESIGNACIÓN RODAMIENTOS	Po [N]	Co [N]	So
<u>Izquierdo</u>	A	SKF – 2206 ETN9	70.152	5200	74.12
<u>Derecho</u>	A	SKF – 2206 ETN9	52.314	5200	99.39

Realizados los cálculos respectivos, se puede ver que los rodamientos utilizados en el diseño y su factor de seguridad sobrepasan el rango aceptable según datos del fabricante, lo cual se puede apreciar en el Anexo C.

Si bien con los cálculos realizados anteriormente, se comprueba que los rodamientos son adecuados para el diseño, se debe realizar una comprobación más en la cual se observará si con el dato de la pendiente máxima que se obtiene de la figura 26, entra en los intervalos máximos establecidos para rodamientos de bola esférica autolineante.

El valor de la pendiente máxima es 0.0377918 rad y el intervalo establecido para rodamiento de bolas autolineantes es de 0.026 a 0.052 rad, lo cual indica que el valor de nuestro diseño cumple con lo establecido, como se observa en la Figura 4.2.

Tabla 7-2	Pendientes	
Intervalos máximos típicos de pendientes y deflexiones transversales	Rodillo ahusado	0.0005-0.0012 rad
	Rodillo cilíndrico	0.0008-0.0012 rad
	Bola con ranura profunda	0.001-0.003 rad
	Bola esférica	0.026-0.052 rad
	Bola autoalineante	0.026-0.052 rad
	Engrane recto sin corona	< 0.0005 rad
	Deflexiones transversales	
Engranés rectos con $P < 10$ dientes/pulg	0.010 pulg	
Engranés rectos con $11 < P < 19$	0.005 pulg	
Engranés rectos con $20 < P < 50$	0.003 pulg	

Figura 28. Intervalos máximos de pendientes y deflexiones transversales. (Richard G. Budynas, 2008)

Cargas sobre la estructura de soporte

Para el análisis de las cargas sobre las estructuras, se consideran las cargas que actúan de forma directa así como indirectamente sobre la misma.

Para lo cual se consideran dos clases de cargas sobre la estructura:

- Cargas de reacción, son las cargas en los soportes de los ejes, las cuales incluyen el peso de los elementos que soportan (Figura. 29)
- Cargas muertas, son los pesos de todos los elementos que se apoyan sobre la estructura, y cuya acción es permanente e inamovible.

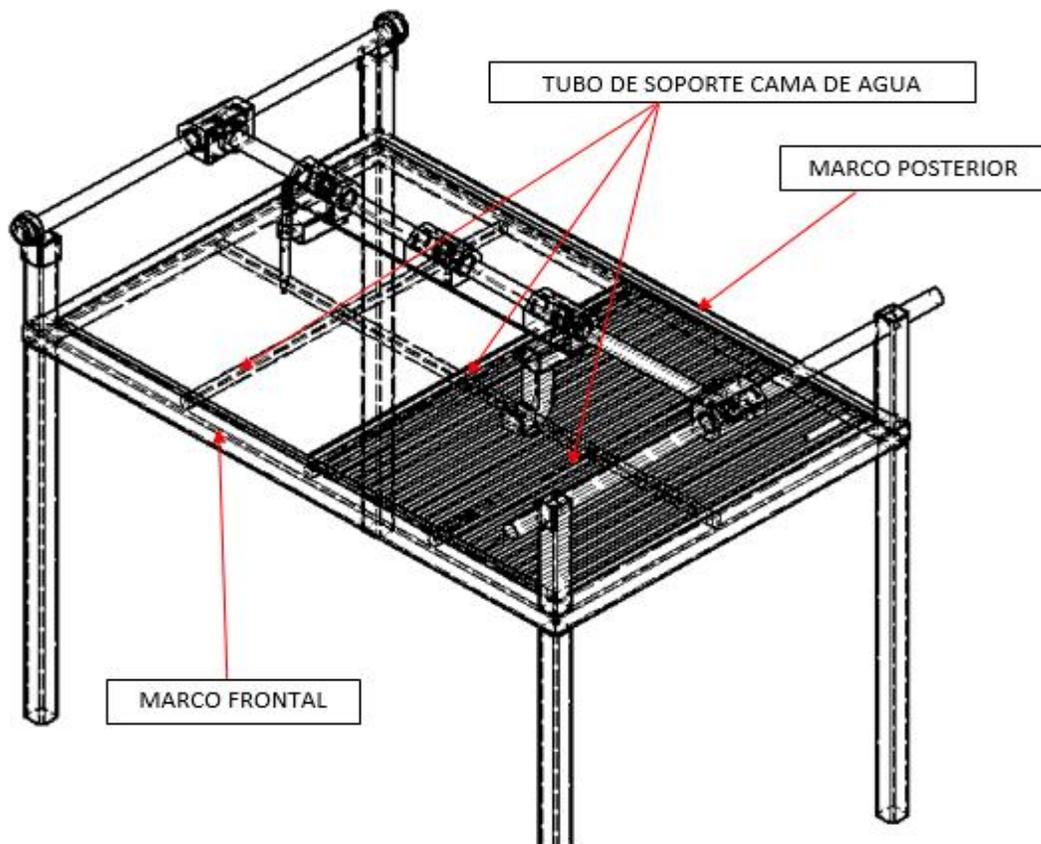


Figura 29. Identificación de soportes en la estructura

Para el estudio de las cargas sobre la estructura se determina que las únicas reacciones que se presentan son las que se obtiene en los extremos de los ejes laterales, las cuales se despejaron en la sección anterior y las tenemos representadas en la tabla 5.

Tabla 5

Reacción en los soportes de los ejes Transversales

COMPONENTES	MARCO FRONTAL		MARCO POSTERIOR	
	R _x [N]	R _y [N]	R _x [N]	R _y [N]
EJE TRANSVERSAL IZQUIERDO	0	5,707	0	5,707
EJE TRANSVERSAL DERECHO	0	14,626	0	14,626

La siguiente tabla representa las cargas muertas en correspondencia al marco estructural sobre el cual actúan.

Tabla 6

Cargas Muertas-Marco Estructural

COMPONENTE	CANTIDAD	PESO [N]	
		UNITARIO	TOTAL
CAMA DE AGUA	1	139,478	139,478
COJINETES EXCENRICOS EJE IZQUIERDO	2	0.333	0.667
COJINETES EXCENRICOS EJE DERECHO	2	0.333	0.667
PIEZA DE TRABAJO	2	30,819,096	616.38
TOTAL			<u>7,571,925</u>

La sumatoria de las cargas sobre la estructura está dada por la suma de las cargas de reacción y las cargas muertas.

Después de un análisis de la estructura y al no poder agrupar las cargas en un único punto de acción se las describen a cada una de ellas en su componente estructural, así como cada elemento soportado en cada componente descrito.

Los resultados son representados en la siguiente tabla:

Tabla 7

Cargas totales en la estructura de soporte.

COMPONENTE ESTRUCTURAL	COMPONENTES SOPORTADOS	CARGAS DE REACCIÓN		CARGAS MUERTAS	CARGAS TOTALES	
		R _x [N]	R _y [N]	R _y [N]	R _x [N]	R _y [N]
MARCO FRONTAL	EJE TRANSVERSAL	0	20,333	0.38205	0	2,071,505
MARCO POSTERIOR	EJE TRANSVERSAL	0	20,333	0.333	0	20,666
TUBO	CAMA DE AGUA	0	0	6046.70	0	6046.70

Simulación de Esfuerzos Asistido por Computadora

Se define para el diseño preliminar la utilización de los siguientes perfiles estructurales:

- Estructura de soporte en general: Tubo Cuadrado 40 x 40 x 2.9
- Tubo de soporte de la cama de agua: Tubo Cuadrado 20 x 20 x 2

El análisis de las cargas se realiza a través del módulo de tensión del software INVENTOR,² la descripción de la simulación paso a paso se la puede observar en el video de SIMULACION SOBRE LAS ESTRUCTURAS.

Para la simulación en el software se utiliza una malla tetraédrica preestablecida en el software que se mantiene en esta configuración, ya que con la misma se obtiene la convergencia más cercana a la requerida, como se puede apreciar en Figura 35.

La recopilación de la información obtenida de las Figuras 30, 31, 32, se la encuentra a continuación en la Tabla 8.

² El video **Simulación sobres la estructura** se encuentra como un archivo adjunto.

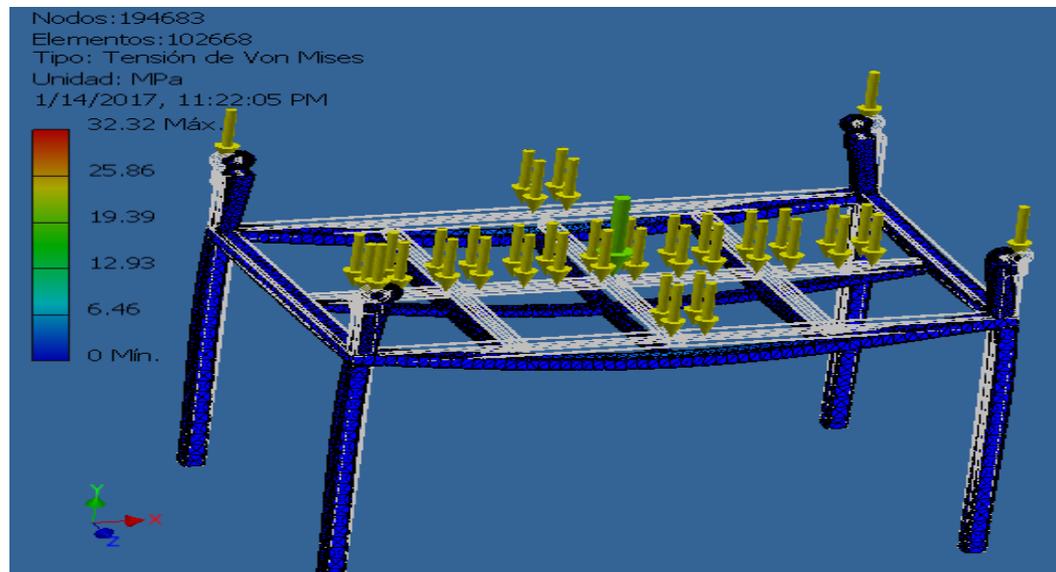


Figura 30. Análisis de tensión-Tensión de Von Mises

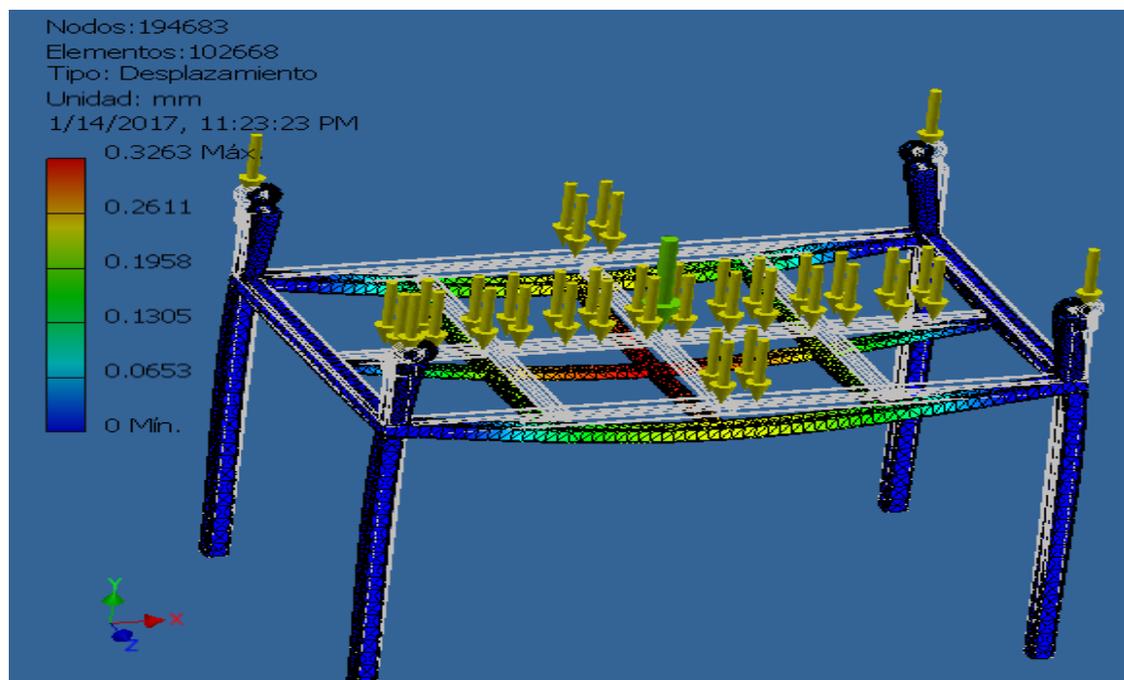


Figura 31. Análisis de tensión- Desplazamiento.

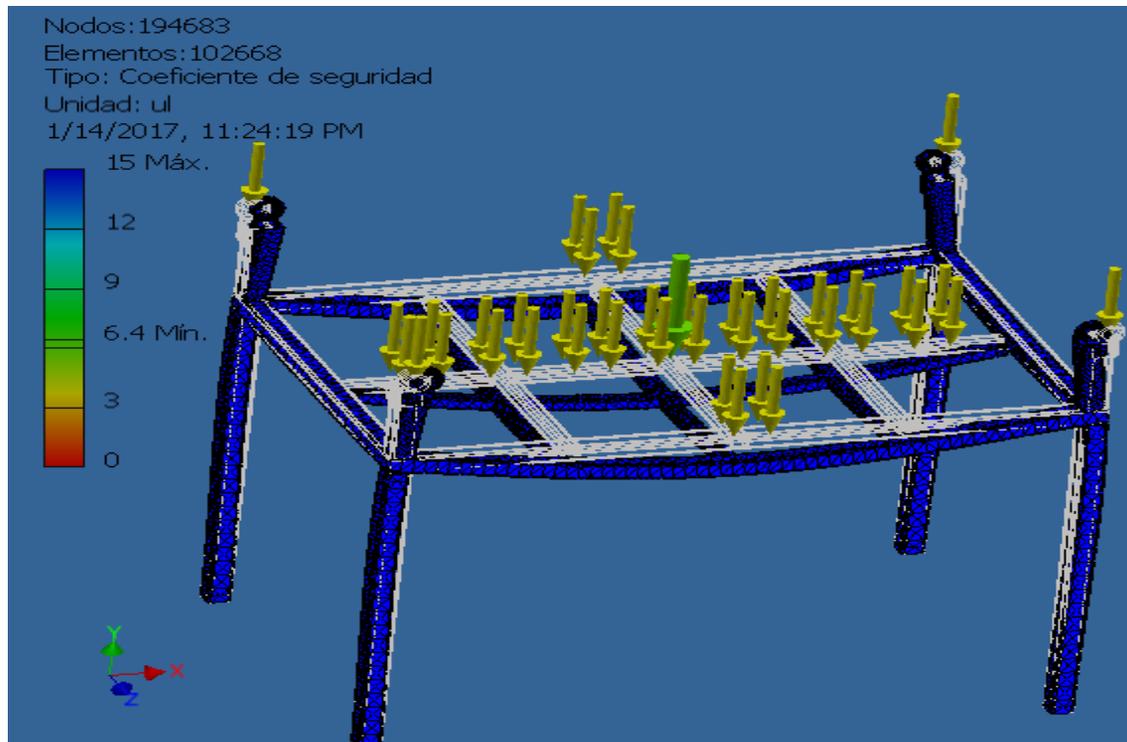


Figura 32. Análisis de tensión- Coeficiente de seguridad

Tabla 8

Análisis de tensión- Resumen de los resultados

DENOMINACIÓN	MÍNIMO	MÁXIMO
Volumen [mm ³]		427470
Masa [kg]		33,557
Tensión de Von Mises [MPa]	0.000735563	323,193
Primera tensión principal [MPa]	-733,923	298,111
Tercera tensión principal [MPa]	-348,027	126,948
Desplazamiento [mm]	0	0.3263
Coeficiente de seguridad [-]	6.4	15

A través del análisis de los gráficos obtenidos de la plataforma inventor podemos concluir que la estructura diseñada soporta las cargas a las que será sometida, con un factor de seguridad de 15, como se puede observar en la tabla 8.

Dimensiones de Uniones por Soldadura.

Para el dimensionamiento de las uniones por soldadura, se basa en el estudio en la NORMA AWS D1.1 que fue desarrollado específicamente para estructuras de acero al carbono o de baja aleación que se encuentren soldadas, con un espesor de 1/8 de pulgada o mayor.

Las uniones de soldadura en las estructuras de soporte, se identificarán según el tipo de unión que se presentan en la estructura, a partir de los cual se obtiene:

- Soldaduras a tope
- Soldaduras de filete

Para poder desarrollar un análisis de soldadura a través de la especificación del procedimiento de soldadura, WPS, el cual es un formato que detalla todas las variables que se necesitan conocer para poder realizar la soldadura. Estos datos brindan las pautas para el soldador al momento de realizar las soldaduras en la estructura para que ninguno de los aspectos quede a una libre interpretación. (Structural Welding Code Steel D1,1., 2000)

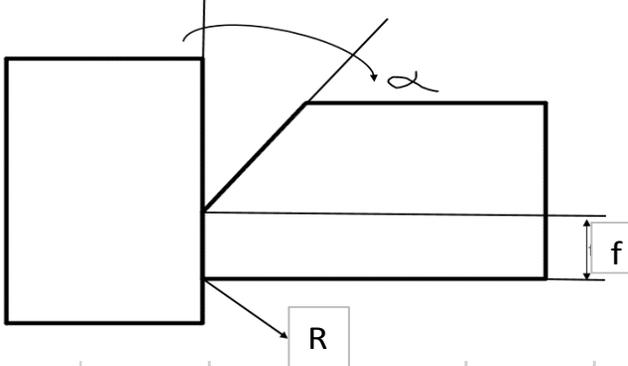
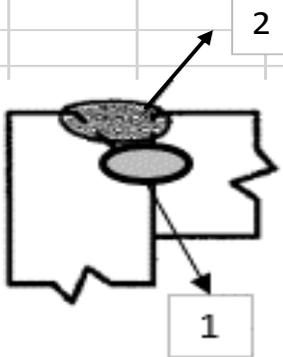
Para realizar las soldaduras sobre la estructura en cada uno de los segmentos, se decide utilizar el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido de la serie E6011, el cual como metal de aporte presenta las siguientes propiedades:

- Resistencia a la tensión: 427 [MPa]
- Resistencia a la fluencia: 345 [MPa]
- Elongación perceptual: 17 – 25 [-]

Por lo cual se procede a realizar el WPS de cada uno de los dos tipos de juntas en la estructura.

Tabla 9

Especificación del procedimiento de soldadura. (Junta a tope)

Nombre compañía: UISEK				No. Identificación: EPN. 001				
PQR No: xxxxxxxxxxxx				Fecha: 25/01/2017				
Según Norma: AWS D1.1				Realizado por: David Bravo P.				
ARTICULO I. Junta Utilizada				Articulo II Tenica de soldadura				
Tipo de Junta	Junta a tope			Proceso de soldadura		SMAW		
Abertura raiz (R) :	0 (+0.4, - 0.0 mm)			Tipo de soldadura:				
Talon(f) :	15 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)			Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Semiautomática	Automática <input type="checkbox"/>		
Angulo de Ranura	50° (+ 10°, - 10°)			Soldadura a:		Un lado <input checked="" type="checkbox"/> Dos lados <input type="checkbox"/>		
Placa de respaldo:	si <input type="checkbox"/>	no <input checked="" type="checkbox"/>		Cordon de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		
Preparar Bisel:	si <input checked="" type="checkbox"/>	no <input type="checkbox"/>		Limpieza:				
Metodo:	Oxicorte, amoladora							
Articulo III Metal Base				Pase de raiz:		Amoladora		
Especificacion:	A36			Pase siguientes:		Grata		
Espesor:	2.9 mm (0.114 in)							
Diametro:	40 mm			Artiruclo V.		Posicion de Soldadura		
Articulo IV Metal de Aporte				Posicion de soldadura:		6G		
Diametro:	1/8 in			Progresion:		Descendente		
Denominacion AWS:	E6011			Tecnica:		Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases: <input checked="" type="checkbox"/>		
Casa Comercial:	AGA			Articulo VI:		NOTAS		
Denominacion Comercial:	5p+			Verificar alineacion		Asegurar limpieza de las partes		
DETALLES DE LA JUNTA								
								
No de pases	Metal de Aporte		Corriente		Tension Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Tecnica de soldadura	
	Clase	Diametro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			Oscilado	Recto
1	E6011	4	DC+	105-120	22-27	127-211		x
2	E6011	4	DC+	155-170	30-35	251-305	x	

Esta tabla se realiza a través de las Figura 33 obtenida de la norma AWS D1.1, la cual limita los valores para el WPS.

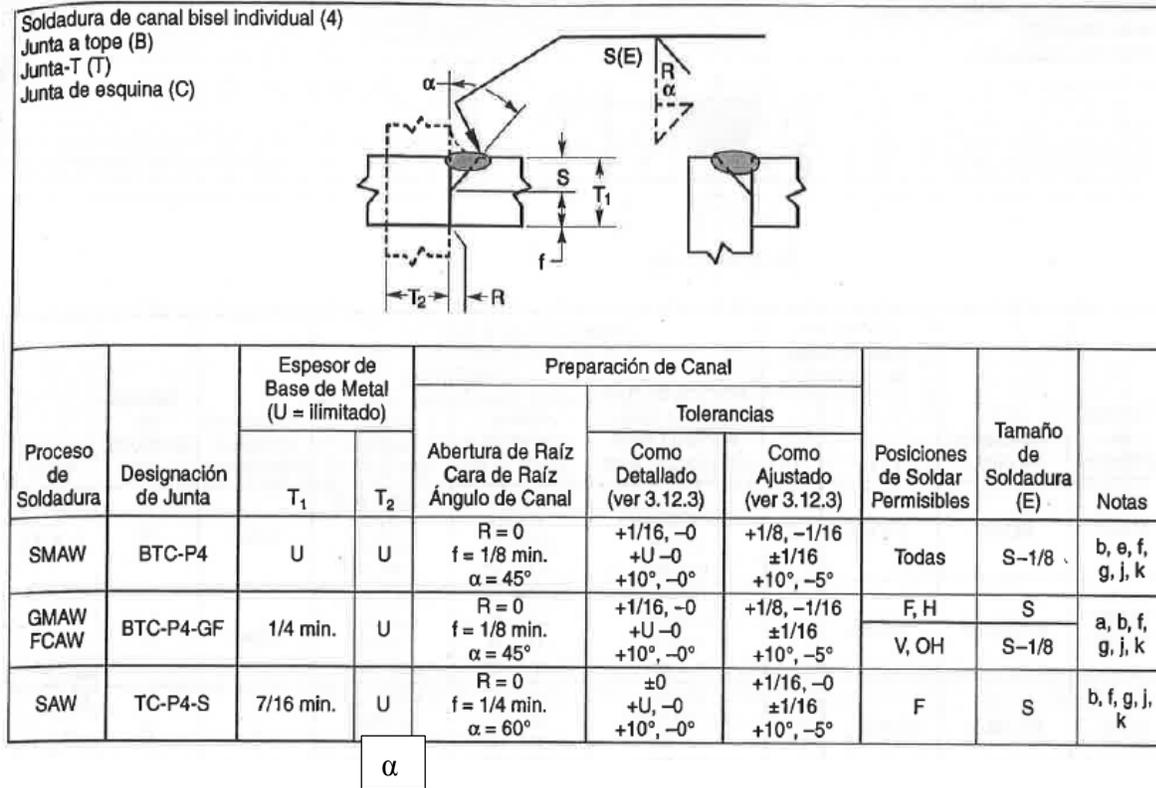
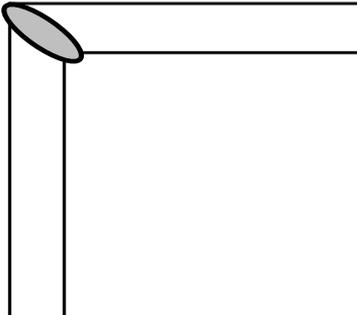


Figura 33. Detalles de juntas de canal soldadas. (Structural Welding Code Steel D1,1., 2000)

Así mismo, para las juntas de bisel se procede a realizar el mismo procedimiento en busca del WPS correcto.

Tabla 10

Especificación del procedimiento de soldadura. (Junta a Bisel)

Nombre compañía: UISEK				No. Identificación: EPN. 001				
PQR No: xxxxxxxxxxxx				Fecha: 25/01/2017				
Según Norma: AWS D1.1				Realizado por: David Bravo P.				
Según Norma: AWS D1.1				Organización: Universidad Internacional Sek				
ARTICULO I.		Junta Utilizada		Artículo II		Tenica de soldadura		
Tipo de Junta		Junta a bicel		Proceso de soldadura		SMAW		
Abertura raiz (R) :		0 (+0.4, - 0.0 mm)		Tipo de soldadura:				
Talon(f) :		0 mm (+ 0.5, - 0.5 mm)		Manual <input checked="" type="checkbox"/>		Semiautomática <input type="checkbox"/>		
Angulo de Ranura		0° (+ 10°, - 10°)		Soldadura a:		Un lado <input checked="" type="checkbox"/>		
Placa de respaldo:		si <input type="checkbox"/> no <input checked="" type="checkbox"/>		Cordon de respaldo:		Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>		
Preparar Bisel:		si <input checked="" type="checkbox"/> no <input type="checkbox"/>		Limpieza:				
Metodo:		Oxicorte, amoladora						
Artículo III		Metal Base		Pase de raiz:		Amoladora		
Especificación:		A36		Pase siguientes:		Grata		
Espesor:		2.9 mm (0.114 in)						
Diametro:		40 mm		Artículo V.		Posicion de Soldadura		
Artículo IV		Metal de Aporte		Posicion de soldadura:		6G		
Diametro:		1/8 in		Progresion:		Descendente		
Denominacion AWS:		E6011		Tecnica:		Un pase <input type="checkbox"/> Varios pases: <input checked="" type="checkbox"/>		
Casa Comercial:		AGA		Artículo VI:		NOTAS		
Denominacion Comercial:		5p+		Verificar alineacion		Asegurar limpieza de las partes		
DETALLES DE LA JUNTA								
								
No de pases	Metal de Aporte		Corriente		Tension Trabajo (Voltios)	Vel. De avance (mm/min)	Tecnica de soldadura	
	Clase	Diametro (mm)	Tipo y polaridad	Intensidad (Amperios)			Oscilado	Recto
1	E6011	4	DC+	105-120	22-27	127-211		x

El cual así mismo se desarrolló mediante la norma AWS D1.1, con la ayuda de la figura 34

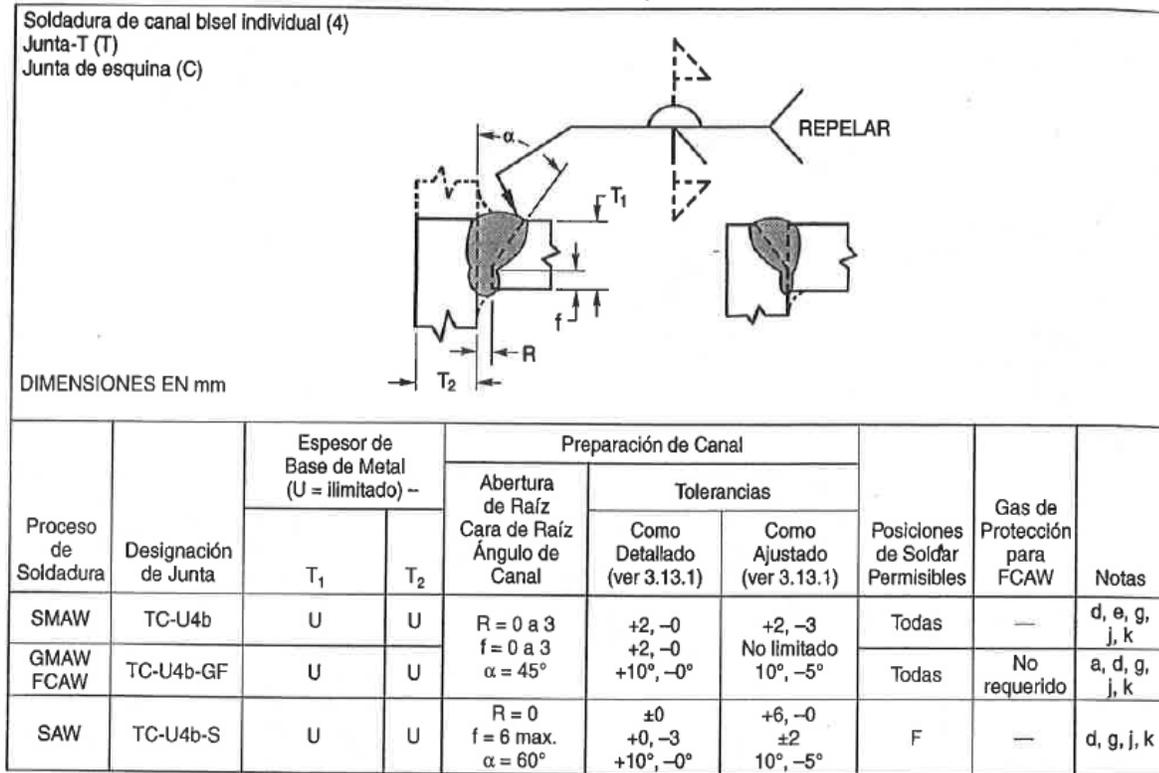


Figura 34. Soldadura de canal Bisel individual

Nodos y Malla

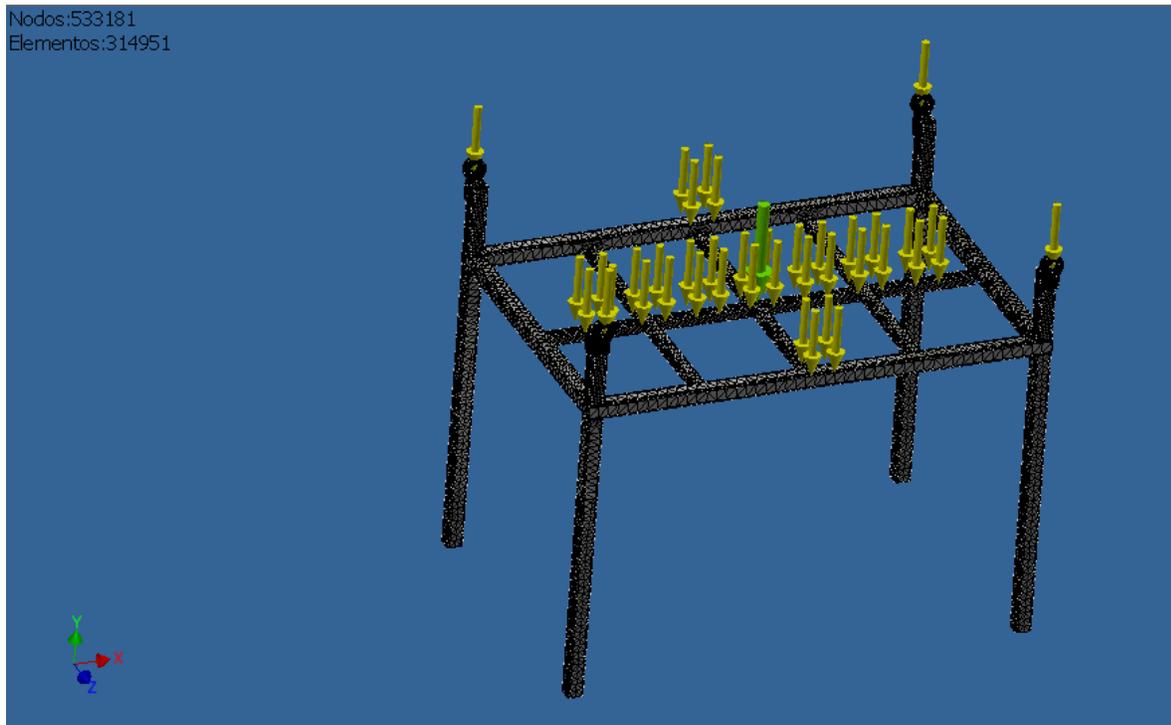


Figura 35. Configuración de Mallas y Nodos

Convergencia de la Simulación.

Se realiza una convergencia de la simulación para verificar que el error en el cálculo de la simulación sea el menor.

Para esto se configuran los valores de la convergencia, como el número de refinados que es el número de análisis de falla que se realiza en la simulación, además del porcentaje de parada y de los resultados a los que se quiere que este orientada la convergencia, en este caso se selecciona para la tensión de Von Mises.

Así se puede apreciar en la figura 36.

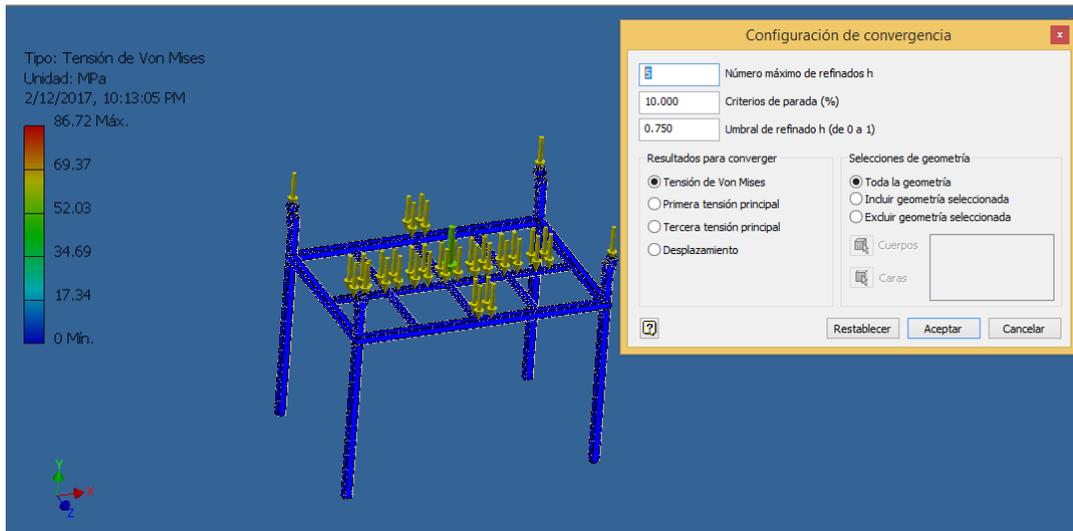


Figura 36. Configuración de Convergencia.

Después de realizar la configuración de los parámetros de la convergencia se corre la simulación y se obtiene la gráfica de convergencia para la tensión de Von Misses. En este caso, se obtiene una tasa de convergencia de 1.363% como se puede apreciar en la Figura 37.

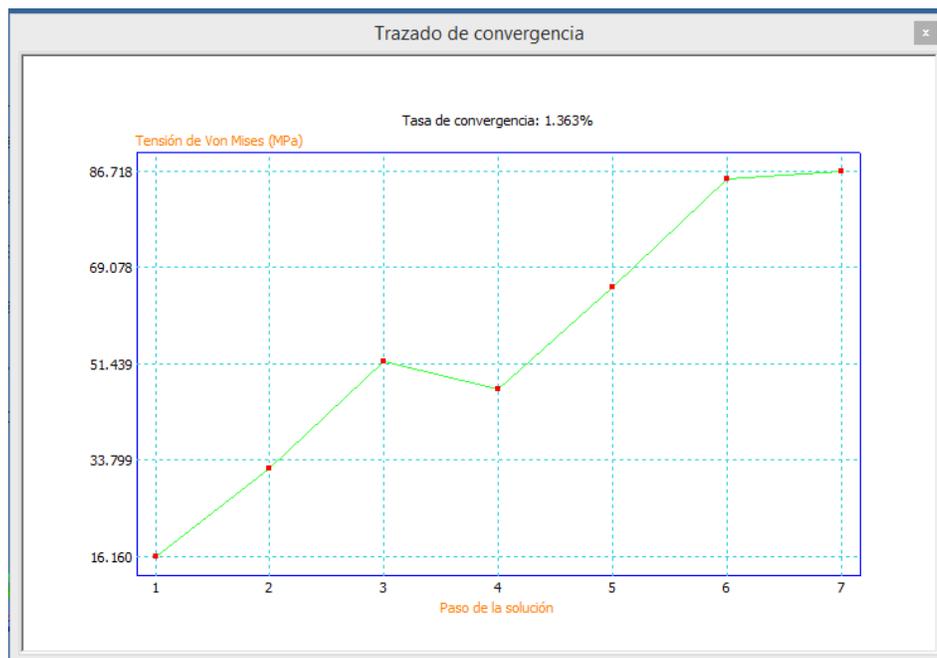


Figura 37. Trazado de convergencia.

Discusión

Evaluación de Diseño Preliminar

Obtenidos los resultados correspondientes que evalúan el diseño preliminar se procede al análisis del mismo, en busca de secciones que necesiten un rediseño por una falla en su comportamiento en el momento de ser sometidos a sus cargas de trabajo correspondientes.

Análisis de Diseño

A través de un análisis de los datos obtenidos en el módulo de evaluación de parámetros se verifica que ninguno de los segmentos de la máquina necesita un rediseño por falla de estructuras, ya que ninguno de los elementos presenta una falla estructural ni un factor de seguridad menor a 1, lo cual indica de tanto las dimensiones como las formas y la distribución de cargas es la correcta para esta máquina.

Ahora si bien, los valores de los cálculos indican que la máquina no requiere ningún tipo de rediseño esto no quiere decir que no se pueda realizar el rediseño de la misma, ya que muchos rediseños se realizan no por fallas sino más bien por apreciación del diseñador, estos cambios no pueden ser realizados en temas de dimensiones de materiales ya que influirían en el cambio de los datos obtenidos en los cálculos ya realizados, Estos cambios son en aspectos estéticos, tal vez más en busca de apariencia armónica en la máquina.

Rediseño del porta plasma.

En busca de estética se decide realizar un rediseño del porta Plasma el cual se puede apreciar en la Figura 38, en la cual se observa que el cuerpo del porta plasma está constituido por un cubo de metal, y esto representa además de un peso excesivo, la forma tosca y rudimentaria del mismo. Por esta razón, se decide realizar un rediseño en busca de una forma más armónica en la figura además de la eficiencia en el diseño, para lo cual se diseña un porta plasma con nuevas cualidades físicas, las mismas que se aprecian en la Figura 39.

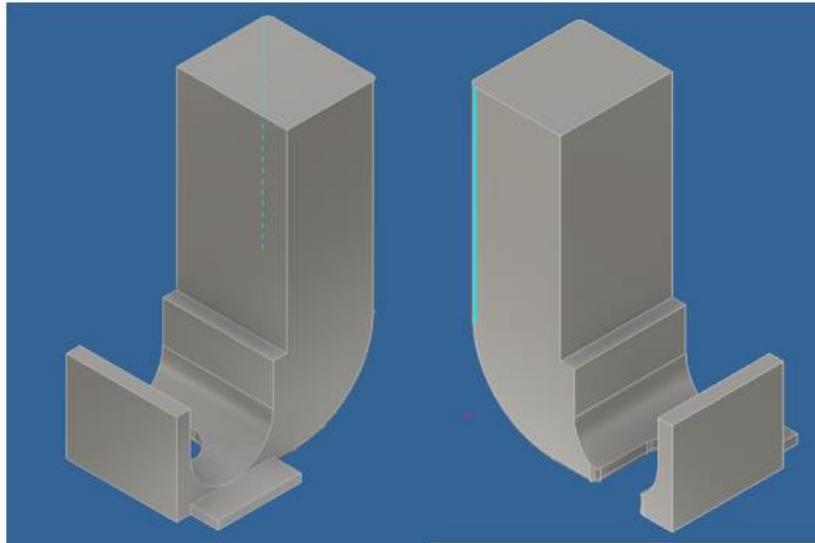


Figura 38. Diseño Preliminar del Porta Plasma.

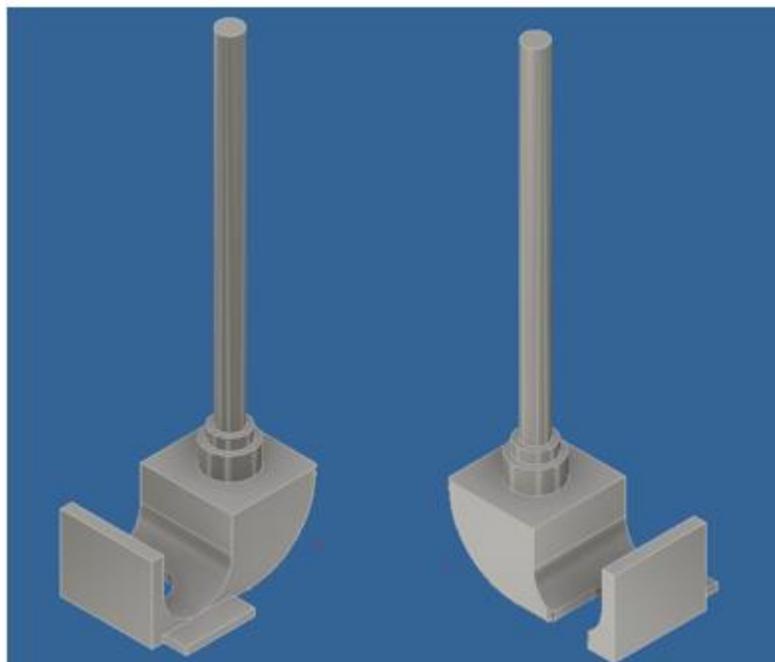


Figura 39. Rediseño final del Porta plasma.

Además de este rediseño no se realiza ningún cambio en el diseño Preliminar, ya que el mismo cumple con todos los estándares tanto en los términos estructurales como en el gusto del diseñador.

Evaluación de Valores

En este punto, se realiza una evaluación de todos los datos obtenidos en los cálculos realizados anteriormente. Así es como en la Tabla 11, se puede apreciar un resumen de todos los coeficientes de seguridad obtenidos en la máquina.

Tabla 11

Coeficientes de Seguridad.

COMPONENTE	FACTOR DE SEGURIDAD (SU)
Eje Principal	24.09
Eje transversal izquierdo	72.79
Eje transversal derecho	45.15
Rodamiento A	67.74
Rodamiento B	52.55
Rodamiento C	46.74
Rodamiento eje izquierdo	74.12
Rodamiento eje derecho	99.39
Estructura de Soporte	15
PROMEDIO FACTOR DE SEGURIDA	55.285

En la Tabla anterior, se aprecia que ninguno de los factores de seguridad obtenido representa una falla para el diseño. Ya que todos ellos son mayores a 1.

En la sección Análisis de Elementos, se realizan varios estudios en los cuales a través de cálculos se comparan las dimensiones y las cargas que soportan, en la misma se realiza un análisis del diámetro del eje principal para un factor de seguridad $n=2$, el cual como resultado da un eje de 13 mm como se observa en la ecuación 44, lo que en primer lugar representa un eje inexistente en el mercado, ya que si se desea utilizar un eje de este diámetro tocaría maquinar un eje de mayor diámetro al que se encuentra disponible en el mercado, con lo cual se elevaría el costo de producción; además si se analiza el eje físicamente (observar un eje de 13 mm de diámetro) no brindaría la suficiente confianza ni al constructor de la herramienta, peor aún si por algún motivo se decide comercializar dicha máquina. Por lo expuesto, se decide respetar los valores preestablecidos para este diseño.

Conclusiones

- El factor de seguridad contra falla estática constituye una medida subjetiva de la capacidad de un elemento mecánico para soportar las cargas de trabajo. El factor de seguridad no representa una propiedad del elemento mecánico, sino que depende de las condiciones de carga y esfuerzo. Un mayor factor de seguridad contra falla estática, provee cierta garantía en resguardo contra fallas dinámicas lo cual se presenta como una cualidad positiva en la maquina anteriormente diseñada.
- El estudio realizado muestra el diseño y la simulación de un pantógrafo a plasma, con la ayuda de un software Inventor, así como los cálculos de los esfuerzos que se presentan en dicho diseño, además se realizan simulaciones en el software mediante todos estos procesos se realiza la tabla 11 en la cual se aprecia el valor del factor de seguridad de cada uno de los elementos diseñados para la máquina, como se observa en la tabla 11 todos los factores de seguridad son mayores a 1 lo cual indica que todos estos elementos soportaran las cargas a las que serán sometidas en el trabajo diario de la máquina.
- En la ecuación 46, se observa que el factor de seguridad para el eje principal es igual a 24 SU lo cual sobrepasa el límite establecido de 2 SU, si bien esto se podría interpretar como un sobreprecio en el dimensionamientos de los elementos estructurales, pero mediante el análisis de costos que se realiza en el Anexo 1.6 en el cual se comparan los valores de los rodamientos lineales para un eje de 30 mm de diámetro para el cual se obtiene un factor de seguridad de 24 SU versus a rodamientos para ejes de 15 mm de diámetro para el cual se obtiene un factor de seguridad de 2, se observa que el costo de los rodamientos de menor diámetro es mayor al de los rodamientos de mayor diámetro, lo cual indica que la selección inicial de la dimensiones son las correctas ya que los rodamientos son los elementos de mayor valor que se requerirá para la construcción de la máquina, lo cual se concluye que si el elemento que representa la mayor inversión

está correctamente seleccionado los otros valores no significaran ninguna amenaza para la construcción de la máquina.

- La definición de condiciones críticas para la máquina, como el asegurar el paralelismo de los ejes laterales para la correcta traslación del carro portaherramientas con respecto a las piezas de trabajo, rige el proceso de diseño por aproximación, y validación iterativa. La validación iterativa retroalimenta el ciclo de diseño, con la aceptación de los resultados obtenidos por la evaluación de parámetros.
- El uso de herramientas de diseño 3D asistido por computadora, como es el software INVENTOR, permite validar el diseño de elementos de máquina en base a análisis estructurales y de tensión por métodos de elementos finitos. Los resultados generados por los módulos de cálculo y simulación del software INVENTOR, deben ser interpretados y fundamentados. La verificación de la convergencia de la simulación, en el caso del análisis de esfuerzos para la estructura de la máquina, provee una medida del error de cálculo en la simulación. A medida que la tasa de convergencia es mayor, los resultados generados por la simulación son más exactos, como se puede apreciar en la figura 37 se tiene una tasa de convergencia de 1.363 en el séptimo paso de la convergencia

Recomendaciones

- Si por decisiones personales se decide modificar algún aspecto del diseño, se recomienda que los cambios no se alejen del diseño original en especial en las dimensiones principales como son los diámetros de los ejes, ya que estos están calculados para soportar las cargas a las que estará sometida la máquina, como se aprecia en las simulaciones y cálculos anteriormente realizados.
- Si se realiza la construcción en base al diseño anteriormente elaborado se recomienda que se analice con mucha atención la sección de especificaciones técnicas del pantógrafo a plasma, ya que en las anexos Ay B se declara los parámetros bajo los cuales se realiza el diseño de la misma, por lo que esto servirá de guía para analizar si esta máquina cumplirá con las necesidades particulares de cada industria.
- En el diseño de la máquina Como se explica en la sección de “cargas críticas sobre los rodamientos lineales” se escogen rodamientos SKF por su fiabilidad y calidad, pero si por temas de costos no se desea utilizar este tipo de rodamiento como los encargados de la movilidad en los ejes X, Y, se recomienda que se analicen opciones de movilidad que puedan sustituir este tipo de rodamientos lineales.
- La opción de construir la máquina diseñada debe evaluarse en función del cumplimiento de requerimientos para un cliente o usuario específico. En dicho caso, puede ser necesario redimensionar la máquina, si el tamaño requerido de las piezas de trabajo sobrepasa los valores definidos en la especificación de diseño. Adicionalmente, el cumplimiento de los requerimientos de diseño detallados en el documento de especificación debe verificarse en función de un protocolo de pruebas que sirva como guía de control de calidad y validación de producto.

Referencias

Bibliografía

- blogspot*. (2013, enero 19). Retrieved from <http://filosofiasegununestudiante.blogspot.com/2013/01/rene-descartes.html>
- Bragulla, P. (n.d.). *ehowenespanol*. Retrieved from http://www.ehowenespanol.com/descripcion-maquina-corte-plasma-cnc-hechos_264707/
- DaNiTa. (n.d.). *cnc-ipm.blogspot.com*. Retrieved from <http://cnc-ipm.blogspot.com/2009/07/ventajas-y-desventajas.html>
- De Maquina y Herramientas*. (2011, Enero 27). Retrieved from <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/centro-mecanizado>
- Electric, L. (2002). *Lincon Electric*. Retrieved from <http://www.lincolnelectric.com/es-es/support/welding-how-to/Pages/plasma-cutting-basics-detail.aspx>
- interempresas*. (n.d.). Retrieved from <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/>
- internet archive Wayback Machine*. (n.d.). Retrieved from http://web.archive.org/web/20130928113648/http://www.hermesperez.com/_html/plasma_corte.html?
- Kevin Daniel Mirallas Secaira, P. J. (n.d.). "*Diseño de una Máquina Cortadora por Plasma CNC*". ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, GUAYAQUIL - ECUADOR .
- Mirallas, K., & Portes, D. (2015).
- Mullen, C. (n.d.). *ehowenespanol.com*. Retrieved from http://www.ehowenespanol.com/tipos-maquinas-cnc-sobre_437802/
- Richard G. Budynas, J. K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de shigley. In *Diseño en ingeniería mecánica de shigley* (p. 67). Mexico: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Romeva, C. R. (2002). *Diseño Concurrente*.
- Serrano, S. E. (2015, Febrero 25). *Avances de Tecnológicos*. Retrieved from <http://avancesdelatecnologia2015.blogspot.com/2015/02/procesos-de-manufactura.html>

SKF. (2016, 02 5). Retrieved from www.SKF.com: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/principles/selecting-bearing-size/bearing-life/load-ratings/index.html>

(2000).*Structural Welding Code Steel D1,1*.

Anexos

Anexo A. Especificaciones Técnicas.

EMPRESA		Fecha	12/14/201
CONSTRUCTOR	PRODUCTO	Inicial:	6
A		Última	
David Bravo P.	Pantógrafo a Plasma.	Revisión:	
		Página:	01 de 01

ESPECIFICACIONES

CONCEPTO	FECHA	PROPON E	R/D	DESCRIPCIÓN
Función	12/14/2016	D + C	R	Reproducir piezas de metal a partir de un modelo.
	12/14/2016	D	R	Realizar cortes de piezas de metal sin ningún molde
Dimensiones	12/14/2016	D	D	Reproducción de piezas de metal largo= 460 [mm], ancho= 580 [mm]
	12/14/2016	D+C	R	Área local promedio 5x5 [m]
Movimientos	12/14/2016	D	R	Desplazamiento horizontal y transversal
	12/14/2016	D	R	Posicionamiento y seguimiento vertical.
Energías	12/14/2016	D+C	R	Operación manual
	12/14/2016	R	R	Conexión eléctrica para la herramienta de trabajo: 220 V.
Materiales	12/14/2016	D	R	Materiales de construcción existentes en el mercado
	12/14/2016	D+C	R	Piezas modelo: material deslizante
Seguridad y Ergonomía	12/14/2016	D+C	D	Piezas de trabajo: Principalmente metales
	12/14/2016	D+C	R	Consideración de altura promedio del operador: 1,65 m.
	12/14/2016	D+C	R	Intercambiabilidad de componentes para operario diestro o zurdo

Impacto Ambiental 12/14/2016 D+C+M D Posibilidad de adaptación de dispositivo de aspirado de virutas

SIMBOLOGÍA

PROPONE R/D D=Diseño; M=Marketing; C= Cliente
 R=Requerimiento; MR= Modificación de requerimiento; NR= Nuevo requerimiento
 D=Deseo; MD= Modificación de Requerimiento; NR= Nuevo requerimiento.

Anexo B. Referencias de especificación.

CONCEPTO	DETERMINACIONES
Función	Principal: Reproducir piezas de metal a partir de un modelo. Ocasional: realizar cortes de piezas de metal sin ningún molde
Dimensiones	Reproducción de piezas de metal largo= 460 [mm], ancho= 580 [mm] Área local promedio 5x5 [m]
Movimientos	Desplazamiento horizontal y transversal Posicionamiento y seguimiento vertical.
Energías	Operación manual Conexión eléctrica para la herramienta de trabajo: 220 V.
Materiales	Materiales de construcción existentes en el mercado Piezas modelo: material deslizante Piezas de trabajo: Principalmente metales
Seguridad y Ergonomía	Consideración de altura promedio del operador: 1,65 m. Intercambiabilidad de componentes para operario diestro o zurdo
Impacto Ambiental	Posibilidad de adaptación de dispositivo de aspirado de virutas

Anexo C. Valores guía para factor de seguridad estático (SKF, 2016)

table - Guideline values for the static safety factor s_0

Type of operation	Rotating bearing						Non-rotating bearing	
	Requirements regarding quiet running							
	unimportant		normal		high		Ball bearings	Roller bearings
Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings	Ball bearings	Roller bearings			
Smooth, vibration-free	0,5	1	1	1,5	2	3	0,4	0,8
Normal	0,5	1	1	1,5	2	3,5	0,5	1
Pronounced shock loads ¹⁾	≥1,5	≥2,5	≥1,5	≥3	≥2	≥4	≥1	≥2

For spherical roller thrust bearings it is advisable to use $s_0 \geq 4$, for full complement tapered roller bearings (screw-down bearings) $s_0 \geq 2,5$, and for cylindrical and tapered roller bearings with steel, pin-type cages $s_0 \geq 2$.

1) Where the magnitude of the shock load is not known values of s_0 which are at least as large as those quoted above should be used. If the magnitude of the shock loads is exactly known, smaller values of s_0 can be applied.

Anexo D. Requerimientos básicos para el correcto funcionamiento Software Inventor 2016

System Requirements for Autodesk Inventor 2016 Windows	
Operating System	<p>Recommended: 64-bit Microsoft® Windows® 7 with Service Pack 1 or Windows 8.1 ¹ or Microsoft Windows 10 (desktop OS) ¹</p> <p>Minimum: 64-bit Microsoft Windows 7 with Service Pack 1</p>
CPU Type	<p>Recommended: Intel® Xeon® E3 or Core i7 or equivalent, 3.0 GHz or greater ²</p> <p>Minimum: 64-bit Intel® or AMD, 2 GHz or faster ²</p>
Memory	<p>Recommended: 16 GB RAM ³ or more</p> <p>Minimum: 8 GB RAM for less than 500 part assemblies ³</p>
Disk Space	<p>Recommended: 250 GB free disk space or more ³</p> <p>Minimum: 100 GB free disk space ³</p>

Anexo E. Análisis y comparación de Costos.

Graphics	<p>Recommended: Microsoft® Direct3D 11® or capable graphics card or higher ⁴</p> <p>Minimum: Microsoft® Direct3D 10® capable graphics card or higher ⁴</p>
Other	<ul style="list-style-type: none"> • DVD-ROM ⁵ • 1,280 x 1,024 or higher screen resolution • Internet connection for Autodesk® 360 functionality, web downloads, and Subscription Aware access • Adobe® Flash® Player 15 ⁶ • Microsoft® Internet Explorer® 8 or higher • Full local install of Microsoft® Excel 2007, 2010 or 2013 for iFeatures, iParts, iAssemblies, thread related commands, clearance/threaded hole creation, Global BOM, Parts Lists, Revision Tables, spreadsheet-driven designs and Studio animation of Positional Representations. Excel Starter®, Online Office 365® and OpenOffice® are not supported. • 64-bit Microsoft Office is required to export Access 2007, dBase IV, Text and CSV formats. • Microsoft .NET Framework 4.5 ⁷