

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA DETERMINAR RIGIDEZ EN LLANTAS NEUMÁTICAS

Pablo Rodrigo Orozco Orozco
Manuel de Jesús Fabela Gallegos
Miguel Martínez Madrid

**Publicación No. 239
Sanfandila, Qro. 2004**

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Diseño conceptual de un banco
de pruebas para determinar
rigidez en llantas neumáticas**

**Publicación Técnica No. 239
Sanfandila, Qro, 2004**

Créditos y agradecimientos

Este documento fue elaborado por el Ing. Pablo Rodrigo Orozco Orozco, el Dr. Manuel de Jesús Fabela Gallegos y el Dr. Miguel Martínez Madrid, investigadores y coordinador, respectivamente, de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte. Se agradecen los comentarios y sugerencias del M. C. David Vázquez Vega y del M. C. José Ricardo Hernández Jiménez, investigadores de la misma Coordinación.

Índice

	Página
Resumen	V
Abstract	VII
Resumen Ejecutivo	IX
Introducción	1
1 Las llantas en los vehículos de transporte terrestre	5
1.1 Los vehículos terrestres	5
1.2 La llanta neumática	6
1.2.1 Definición	6
1.2.2 Invención de la llanta y su aplicación al automóvil	7
1.3 Influencia de las llantas en el comportamiento mecánico del vehículo ..	8
1.4 Características de las llantas	13
1.4.1 Funciones básicas de los neumáticos	13
1.4.2 Materiales utilizados en la elaboración de los neumáticos	14
1.5 Estructura y tipos de neumáticos	15
1.5.1 Estructura de los neumáticos	15
1.5.2 Tipos de neumáticos	15
1.6 Nomenclatura de los neumáticos	18
2 Requerimientos de diseño del banco	23
2.1 Etapas generales de diseño	23
2.2 Propiedades mecánicas de las llantas. Enfoque experimental	23
2.3 Normas	24
2.4 Tipos de carga	25
2.4.1 Fuerzas y momentos	26
2.4.2 Factores de influencia en el comportamiento de las llantas	27
2.5 Tipo de movimiento	28
2.5.1 Sistema coordinado según ISO 8855	28
2.6 Capacidades del banco	29

3 Diseño conceptual	31
3.1 Generación de ideas	31
3.2 Conceptos básicos	32
3.2.1 Mecanismo de avance de la llanta	32
3.2.2 Mecanismos de aplicación de movimiento vertical y lateral	35
3.2.3 Aplicación de carga	38
3.3 Evaluación de alternativas y selección de configuraciones factibles	42
4 Propuesta de banco de pruebas	45
4.1 Descripción general	45
4.1.1 Sistema 1. Marco estructural	46
4.1.2 Sistema 2. Soporte y carga de la llanta	47
4.1.3 Sistema 3. Sistema de rodamiento	49
4.1.4 Cimentación	50
4.1.5 Materiales principales	51
4.2 Compatibilidad funcional (accionamientos e interferencias)	53
4.3 Dimensiones Generales	54
4.3.1 Banco global	54
4.3.2 Sistema 1	56
4.3.3 Sistema 2	57
4.3.4 Sistema 3	60
4.4 Ejemplo de cálculo de componentes	62
4.5 Generalidades de la instrumentación (propuestas)	66
4.6 Conceptualización virtual	67
4.7. Otras aplicaciones posibles	69
Conclusiones y recomendaciones	71
Referencias	73
Anexos	76

Resumen

Uno de los principales componentes de los vehículos carreteros con gran influencia en su comportamiento dinámico, son las llantas. Entre las diversas funciones que las llantas desempeñan están, las de soportar el peso del vehículo, proporcionar amortiguamiento, control direccional y tracción para producir y controlar el desplazamiento. Estas funciones son desarrolladas gracias a sus características geométricas y mecánicas, siendo la rigidez una de las propiedades mecánicas de mayor participación en la definición de su desempeño. En el presente trabajo se describe el desarrollo del diseño conceptual de un dispositivo prototipo para medir parámetros que permitan estimar los valores de la rigidez de las llantas neumáticas utilizadas en vehículos ligeros y pesados. El diseño se basa en la simulación de las condiciones normales de operación de una llanta de este tipo, pudiéndose manipular las cargas que soporta la llanta así como su velocidad, giro direccional y desplazamiento lateral. Las características funcionales y de diseño del dispositivo o banco permiten que sus capacidades puedan ser extendidas a la determinación de otros parámetros que intervienen en el desempeño mecánico de las llantas. Sin embargo, el diseño propuesto es susceptible de posibles mejoras, tanto de índole mecánica como de funcionamiento y operación, lo cual debe ser considerado en alternativas de diseños futuros.

Abstract

Tires are a main component of road vehicles. They support vehicle's weight, provide damping, directional control and traction, among other roles. However, tires behavior depends of their geometrical and mechanical properties, mainly stiffness. The development of a test rig prototype conceptual design to determine light and heavy truck tires' stiffness is described in this work. Prototype design is based upon the simulation of tires normal operational conditions, controlling tire supported load, apparent forward velocity, steering turn and lateral displacement. The resultant characteristics of the prototype conceptual design, allow its capacities be extended to the determination of other parameters involved in tires mechanical behavior. However, some improvements can be considered in future designs of this kind of devices.

Resumen Ejecutivo

Uno de los principales componentes de los vehículos carreteros con gran influencia en su comportamiento dinámico, son las llantas. Este componente ha evolucionado a la par de los vehículos mismos, asociado inherentemente a los procesos de desarrollo de la movilidad, “confort”, manejabilidad, estabilidad y capacidad de carga, entre otros. Además de actuar como elementos de interacción directa entre el camino y el vehículo y de soportar el peso del mismo, las llantas neumáticas proporcionan amortiguamiento, control direccional y tracción para producir y controlar el desplazamiento. Estas funciones son desarrolladas por las llantas gracias a sus propiedades geométricas y mecánicas.

La llanta neumática es un toroide fabricado de un material compuesto, con matriz sólida elástica y reforzado con fibras, montado sobre una estructura anular rígida que, en conjunto, encierran un volumen presurizado de aire. Su rigidez es una de las propiedades mecánicas con mayor participación en la definición de su desempeño. Debido a su compleja geometría y construcción, la rigidez de esta, depende de la dirección de orientación con respecto a la forma de la llanta y a la aplicación de las cargas. Sin embargo, los análisis de su comportamiento se ven limitados tanto por la carencia de información técnica como las dificultades inherentes a la consecución de ésta y otras propiedades de las llantas, debido, en gran medida, al contexto comercial en el que están involucrados su desarrollo, sus materiales y su fabricación.

Una alternativa para conocer las propiedades mecánicas de las llantas es a través de la aplicación de esquemas de medición experimental. En este trabajo se propone un diseño conceptual para la generación de un prototipo de banco de pruebas, cuya función sea la de proporcionar la información necesaria para determinar la rigidez de las llantas neumáticas.

Entre las características del diseño del banco propuesto están sus capacidades proyectadas para aplicarse a la determinación de la rigidez de un intervalo de tipos de llantas, que van desde aquéllas empleadas en automóviles hasta las empleadas en vehículos de carga pesada. Además, el banco permite simular mecánicamente las condiciones de operación de la llanta, aplicándole diversos movimientos y fuerzas en distintas direcciones, cuyas mediciones proporcionen datos suficientes que permitan calcular la rigidez radial, la rigidez transversal y la rigidez tangencial de la llanta bajo prueba.

Mecánicamente, el diseño se ajusta a requisitos de operación de 50 KN de aplicación de carga vertical, desplazamientos laterales de 0,08 m, giro direccional de 20° hacia ambos lados, con velocidad máxima aparente de desplazamiento de 10 km/h. Además, el banco puede emplearse para pruebas con llantas desde 0,5 a 1,0 m de diámetro y de 0,15 a 0,30 m de ancho. En general, el banco se divide en tres sistemas principales relacionados con el soporte, con la aplicación de carga y con la generación del movimiento. El sistema de soporte se compone por

un marco estructural para contener los mecanismos operativos del banco, el sistema de aplicación de la carga sustenta la llanta y el dispositivo de carga vertical, además del mecanismo de giro direccional, mientras que el sistema de generación del movimiento emula la superficie de contacto con la llanta y le proporciona el movimiento aparente de avance a través de una banda. Se presentan, además, los planos técnicos de estos sistemas, así como un ejemplo de cálculo estructural de uno de los componentes principales, aplicando un programa comercial con base en el método de elementos finitos.

El trabajo concluye con la exposición de algunos comentarios relacionados con el desarrollo del mismo, con la funcionalidad y aplicabilidad del diseño propuesto. Las características funcionales y de diseño aplicadas sobre el banco, permiten que sus capacidades puedan ser extendidas a la determinación de otros parámetros que intervienen en el desempeño mecánico de las llantas, así como del comportamiento dinámico de los vehículos. Sin embargo, el diseño propuesto es susceptible de posibles mejoras, tanto de índole mecánica como de funcionamiento y operación, lo cual debe ser considerado en alternativas de diseños futuros.

Introducción

En México, como en muchos otros países, el transporte de carga y de pasajeros en los cuales son empleados vehículos terrestres, ha sido parte esencial para su desarrollo. La industria del transporte terrestre se ha ido desarrollando a través de los años, hasta llegar a ser el principal modo de transporte de carga y pasajeros. Debido a esto, resulta de gran importancia conocer los factores y características que afectan el desempeño de los vehículos terrestres, ya sea por su diseño, su construcción, su operación o su comportamiento en general.

De manera general, la respuesta que un vehículo pueda ofrecer durante su operación, depende de la combinación de las diversas propiedades individuales de los elementos que lo componen. Uno de los principales, con gran influencia en el comportamiento de los vehículos de carretera, son las llantas. Además de actuar como elementos de interacción directa entre el camino y el vehículo y de soportar el peso del mismo, las llantas neumáticas proporcionan amortiguamiento, control direccional y tracción para producir el desplazamiento.

A pesar de que la llanta neumática se originó como consecuencia del mejoramiento del “confort” de un triciclo infantil en 1888 y su aplicación rudimentaria se extendió al automóvil en los años siguientes, ésta ha sufrido modificaciones importantes de forma, estructura, construcción y materiales de manera continua hasta la época actual. La evolución de la llanta se ha llevado a cabo a la par del desarrollo del vehículo, cuya participación en la mecánica de su desempeño ha sido tal, que la movilidad, el “confort”, la manejabilidad, el control direccional y la estabilidad de éste dependen en gran medida de las propiedades geométricas y mecánicas de la llanta.

La llanta neumática es un toroide fabricado de un material compuesto, con matriz sólida elástica y reforzado con fibras, montado sobre una estructura anular rígida (metálica) que, en conjunto, encierran un volumen de aire. Maniobras de conducción comunes de un vehículo, tales como producir su desplazamiento o dar un giro para rodear un obstáculo, requieren de un comportamiento de la llanta congruente con las condiciones del vehículo y su entorno. Este comportamiento se traduce en una respuesta mecánica, en la que la llanta se desplaza y se deforma atendiendo a los requerimientos de la maniobra y de acuerdo a sus capacidades, las cuales dependen de las propiedades mecánicas de la misma.

La rigidez de la llanta es una de las características más importantes y representativa en la definición de su comportamiento, desde el punto de vista mecánico. La rigidez, que es una medida de la resistencia que ofrece a deformarse cuando es sujeta a la acción de una fuerza o un par, depende de la dirección de medición, conformándose por distintos valores de acuerdo a la orientación respecto a la forma de la llanta. Normalmente, la información que se puede obtener sobre las características mecánicas de las llantas se reduce a datos sobre las dimensiones, el tipo de construcción, la capacidad de carga y la

velocidad máxima de operación, obtenida esta última con base en el máximo esfuerzo soportable producido por la rotación.

La carencia de información técnica sobre el comportamiento de las llantas, así como las dificultades inherentes a la consecución directa de la misma, se deben principalmente al contexto comercial en el que están involucrados su desarrollo, sus materiales y su fabricación. Debido a la compleja composición y diversidad de las llantas, no existe un modelo único que proporcione la información necesaria para estimar o determinar la rigidez en cada una de las direcciones principales de su forma. Por ello, una alternativa para determinar estos valores es aplicando un esquema de medición experimental, que proporcione los datos necesarios para determinar las principales propiedades mecánicas de las llantas. Por ello, el enfoque de este trabajo se dirige hacia el diseño y generación de un prototipo de banco de pruebas, que proporcione la información necesaria conducente a la determinación de los valores de rigidez de las llantas neumáticas.

El banco que se propone, es aplicable para la determinación de la rigidez tanto de llantas empleadas en automóviles como de vehículos de autotransporte de carga pesada. Así mismo, las capacidades consideradas permiten simular mecánicamente las condiciones de operación de la llanta, aplicándole movimiento y carga a la vez. Con base en esas condiciones de operación, las mediciones que se realicen en este banco deben proporcionar los datos suficientes para calcular la rigidez radial, la rigidez transversal y la rigidez tangencial de la llanta bajo prueba.

En el mercado se encuentran algunos instrumentos que permiten obtener los datos que se pretenden obtener mediante el uso de este banco. Surge entonces la pregunta de porque entonces diseñar y construir este banco. Una de las respuestas a dicha pregunta es el costo, ya que este tipo de bancos, presentan comercialmente un alto costo, además de ser de procedencia extranjera, lo cual implica estar atados a los servicios de calibración y mantenimiento que deben de ser proporcionadas por las empresas que los comercializan, elevando con esto aun más el costo. Además, de contar con un dispositivo que permita obtener los parámetros necesarios para caracterizar las llantas neumáticas, a un menor costo y de una manera mas apegada a la realidad mexicana (vehículos, llantas y tipos de camino). Se contempla que el costo de manufactura como de mantenimiento del banco diseñado sea del orden del 25% del valor de un banco comercial con características similares.

Los distintos capítulos que componen este trabajo comprenden la exposición de una breve historia de la llanta neumática y su importancia en el desarrollo de vehículos de transporte terrestre, las principales características constructivas, sus propiedades mecánicas y las funciones que realiza en un vehículo, así como la nomenclatura utilizada para la denominación de cada tipo de llanta. Consecuentemente, de acuerdo al comportamiento de las llantas, se presentan las principales características físicas y mecánicas que contempla el diseño de un banco de pruebas, con base en las propiedades de rigidez de las llantas, así como las características de las normas actuales aplicadas a pruebas de llantas

neumáticas. Posteriormente, se exponen las principales ideas concebidas en el proceso de diseño de la configuración propuesta del banco de pruebas al igual que el esquema que da origen al diseño de detalle del banco propuesto, considerando la funcionalidad de acuerdo con los requisitos preestablecidos. En la parte final se presentan los planos y la descripción de los principales componentes del banco, así como sugerencias sobre la instrumentación necesaria para la determinación de las propiedades mecánicas de las llantas, objeto de este diseño. Este trabajo concluye con la exposición de algunos comentarios relacionados con el desarrollo del mismo, con la funcionalidad y aplicabilidad del diseño propuesto, además se identifican posibles mejoras que pueden considerarse en diseños alternativos futuros.

1 Las llantas en los vehículos de transporte terrestre

En este capítulo se presentan los antecedentes históricos general de la llanta neumática, sus orígenes, la influencia en el proceso de desarrollo de los vehículos de transporte terrestre y su comportamiento dinámico. También, se describen las principales características constructivas, sus propiedades mecánicas y las funciones que realiza en el vehículo, así como la nomenclatura utilizada para la denominación de cada tipo de llanta.

1.1 Los Vehículos Terrestres

Un vehículo es un medio de locomoción, empleado para transportar bienes o personas. Los vehículos terrestres se desplazan sobre la superficie de la tierra, manteniendo los medios motrices en contacto con el piso (suelo), en contraste, los vehículos aéreos y los marítimos operan soportados por un fluido, aire y agua, respectivamente. Los vehículos terrestres pueden ser clasificados en guiados y no guiados, estando los primeros restringidos en su movimiento a lo largo de una guía, como pueden ser rieles, mientras que los no guiados poseen autonomía direccional, moviéndose sobre caminos o fuera de ellos. La mayoría de los vehículos terrestres no guiados utilizan llantas neumáticas (como la mostrada en la Figura 1.1) las cuales, forman parte de sus sistemas de soporte, de desplazamiento y de dirección.



Figura 1.1 Configuración actual de rin y llanta

El comportamiento de un vehículo terrestre es el resultado de la interacción entre el conductor, el vehículo y el medio. Con excepción de las fuerzas gravitacionales y aerodinámicas, las fuerzas y momentos que se aplican al vehículo las cuales afectan su movimiento, son generadas o transmitidas a través del contacto entre la llanta y el camino. Es por esto, que las llantas se constituyen en uno de los elementos más importantes del esquema funcional y operativo de los vehículos de este tipo.

En general, las características de un vehículo terrestre pueden ser descritas en términos de su funcionamiento mecánico, de la calidad de su manejo y de su “confort”. Las características de funcionamiento incluyen la habilidad del vehículo para acelerar, evadir obstáculos y frenar, atendiendo la forma en que se transmite la potencia desde la fuente a los mecanismos de transmisión; la manejabilidad se refiere a la respuesta del vehículo a las acciones del conductor y las características de estabilidad durante su movimiento, mientras que el “confort” está relacionado con la calidad de viaje, atendiendo las vibraciones que experimentan tanto el vehículo como el conductor, los pasajeros y la carga transportada. En todas características anteriores, las llantas neumáticas tienen una participación importante.

1.2 La Llanta Neumática

1.2.1 Definición

Descriptivamente, se considera que la llanta neumática es un toroide hecho de un compuesto sólido deformable elásticamente, montado sobre una estructura anular rígida (normalmente metálica) que, en conjunto, encierran un volumen de aire. Sin embargo, es común confundir lo que es una llanta, un neumático y una rueda, existiendo distintas definiciones, como *llanta*, descrita como el cerco metálico de las ruedas de los vehículos, el neumático o la cubierta de caucho de una rueda; *neumático* es la cubierta deformable y elástica que se monta en la llanta de las ruedas de ciertos vehículos, y que sirve de envoltura protectora a una cámara de aire que puede ser independiente o no, y *rueda* es una pieza de forma circular que gira alrededor de un eje^[1].

Según la Norma NMX-T-004-SCFI-2000^[2], *llanta* es un objeto mecánico, con forma de anillo circular, sólido o hueco, fabricado de hule o sustancias químicas y reforzado comúnmente con materiales textiles, acero u otros, el cual es montado en un rin. En esta misma norma se establece que *llanta neumática* es una llanta hueca, que contiene en su interior un fluido compresible; el cual a su vez, puede estar en contacto directo con la llanta cuando tiene una capa hermética integrada a la misma o dentro de una cámara. Aunque las definiciones son en lo esencial muy semejantes, en el contexto del transporte se aplica esta última definición.

El material base utilizado en la construcción de una llanta es el caucho, el cual es reforzado con fibras de otros materiales para mantener la resistencia y la flexibilidad.

Tanto la forma como la combinación de los materiales empleados en su fabricación y las condiciones de operación, ocasionan que el comportamiento de la llanta sea complejo y difícil de modelar, debido a que las propiedades geométricas de los materiales no son lineales.

1.2.2 Invención de la llanta y su aplicación al automóvil

El principal material utilizado en las llantas neumáticas es el caucho. Debido a su cualidad de volverse pegajoso al calentarse y rígido al enfriarse, en sus inicios el caucho se consideraba un material inestable, por lo que su uso estaba limitado a la confección tradicional de gomas de borrar. Investigando sobre sus posibles usos combinándolo con otros materiales, en 1839 Charles Goodyear ^[3,4] derramó accidentalmente una mezcla de goma de caucho, azufre y albayal de carbonato de plomo sobre una estufa encendida. El compuesto se extendió, crepitó por un instante y enseguida se amalgamó en una torta de caucho flexible y resistente que, al enfriarse, conservaba las mismas propiedades. En honor al Dios Vulcano, Goodyear denominó a este proceso como "vulcanizado". Algunos años después, Thomas Hancock ^[5,6,7], uno de los precursores en la fabricación de objetos de hule, desarrolló y patentó una técnica que llevó el nombre de vulcanización.

John Boyd Dunlop ^[8,9], un veterinario Escocés, inventó en 1888 el primer neumático en la búsqueda de mejorar la conducción y el "confort" del triciclo de su hijo. En 1894 aparece en París, Francia, el primer neumático para coche de caballos, apreciado por los parisinos por su silencio y "confort", comparado con la rueda tradicional, la cual empleaba un aro metálico.

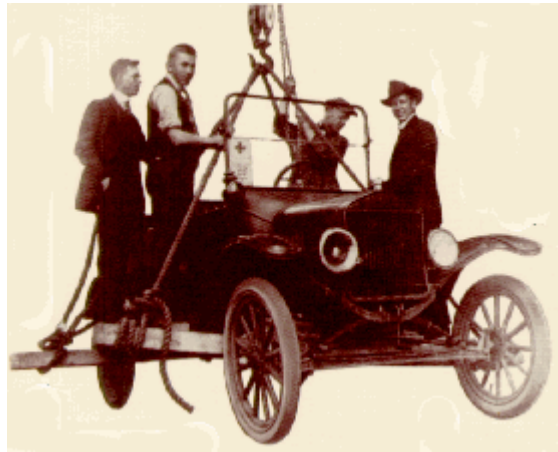


Figura 1.2 Automóvil de principios del siglo XX que presenta las principales características con las que cuenta el automóvil actual.

Aunque el primer vehículo terrestre autopropulsado se inventó en 1769, el automóvil, con las principales características físicas y geométricas del automóvil actual (Figura 1.2), se fabricó en 1895 ^[10,11]. Sin embargo, una de sus principales desventajas era el uso de llantas sólidas (Figura 1.3), las cuales no proporcionaban una adecuada protección mecánica a las ruedas, ocasionando rupturas frecuentes.

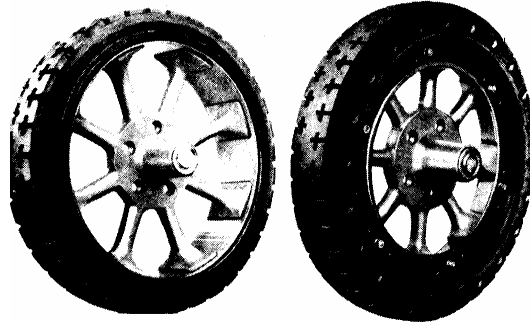


Figura 1.3. Llanta típica (llantas sólidas) de 1928.

El primer automóvil equipado con llantas neumáticas fue "L'Éclair" ^[12,13] (El Relámpago, llamado así por su tendencia a zigzaguear, Figura 1.4), un Peugeot con motor Daimler de 4 caballos, equipado con llantas neumáticas provistas por los hermanos Michelin en 1895. Con este equipamiento, "L'Éclair" participo en una carrera organizada para estos vehículos cuyo trayecto fue Paris-Bordeaux-Paris, terminando con un tiempo respetable. A partir de ese momento, el automóvil y las llantas neumáticas se convirtieron en compañeros inseparables



Figura 1.4. Los hermanos Michelin y el L'Éclair.

1.3 Influencia de las Llantas en el Comportamiento Mecánico del Vehículo

Exceptuando las fuerzas aerodinámicas, todas las fuerzas presentes en un vehículo se transmiten a través de las llantas, ya que son los elementos que se encuentran en interacción directa con el camino. Este hecho influye no sólo en la dinámica del comportamiento del vehículo, sino también en otros aspectos como el daño producido en su estructura, en el "confort" de los pasajeros y/o el maltrato en la carga. Estos aspectos dependen de las características de la llanta, entre las que se encuentra la rigidez vertical y otros parámetros físicos relativos a la operación de la misma, como pueden ser, la temperatura, la condición de la superficie de rodadura de la llanta, la presión de inflado, etc.

Además de soportar el peso del vehículo, las llantas proporcionan amortiguamiento, tracción para producir el desplazamiento del vehículo y el control direccional de éste. La capacidad para que el vehículo describa una trayectoria curva depende en gran parte de las propiedades de rigidez del neumático, que no es otra cosa más que su capacidad para deformarse.

Debido a la gran variedad de funciones que la llanta cumple como parte fundamental del desempeño de un vehículo, es importante conocer y comprender su comportamiento y la influencia que tiene dentro de todo el conjunto (vehículo).

El rendimiento del neumático y la seguridad están determinados en gran parte por estos parámetros. Por ejemplo, una disminución en la presión adecuada mantiene en contacto con el camino los extremos de la banda de rodamiento, originándose con esto una disminución en su capacidad de carga, un desgaste prematuro en las paredes del mismo e incremento en la temperatura del cuerpo del neumático debido a una flexión excesiva, lo que puede ocasionar que las capas o cinturones se desprendan o fallen. Un exceso de presión incrementa la rigidez de la llanta y disminuye la zona de contacto con el camino solamente al centro de rodado, lo que ocasiona una menor estabilidad. En consecuencia, las paredes del neumático no flexionan de un modo adecuado, lo cual evita que el neumático absorba elásticamente las irregularidades del camino, con efectos negativos en el “confort”, la seguridad y consumo de combustible.

Las llantas han evolucionado a través de los años para poder satisfacer las demandas que los distintos tipos de vehículos les han ido exigiendo. Su evolución ha implicado modificaciones en sus características, con el propósito de obtener mejores propiedades y un mejor desempeño en capacidad de carga, en la maniobrabilidad, en el manejo y en el “confort”, en correspondencia a los distintos tipos de vehículos que han ido surgiendo desde los inicios del automóvil (La evolución de los vehículos Figuras 1.5 a la 1.8, vehículos de carga pesada de principios del siglo XX y XXI).^[14]

Históricamente, la ingeniería de las llantas dependía de su respuesta bajo diversas cargas aplicadas de manera estática, comparando los distintos tipos de construcción. Sin embargo, posteriormente un mayor refinamiento en los análisis involucró el efecto de fuerzas y pares dinámicos que experimentan los neumáticos, lo que ha llevado a sofisticar y desarrollar más y mejores herramientas de modelado.

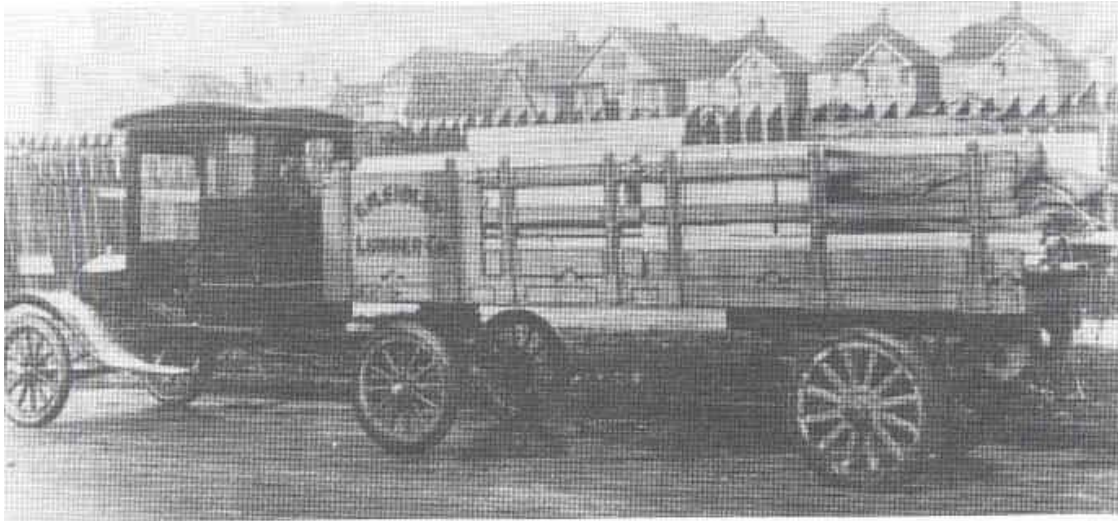


Figura 1.5. Tractor con semiremolque de 1911 equipado con rines de madera y llantas sólidas.

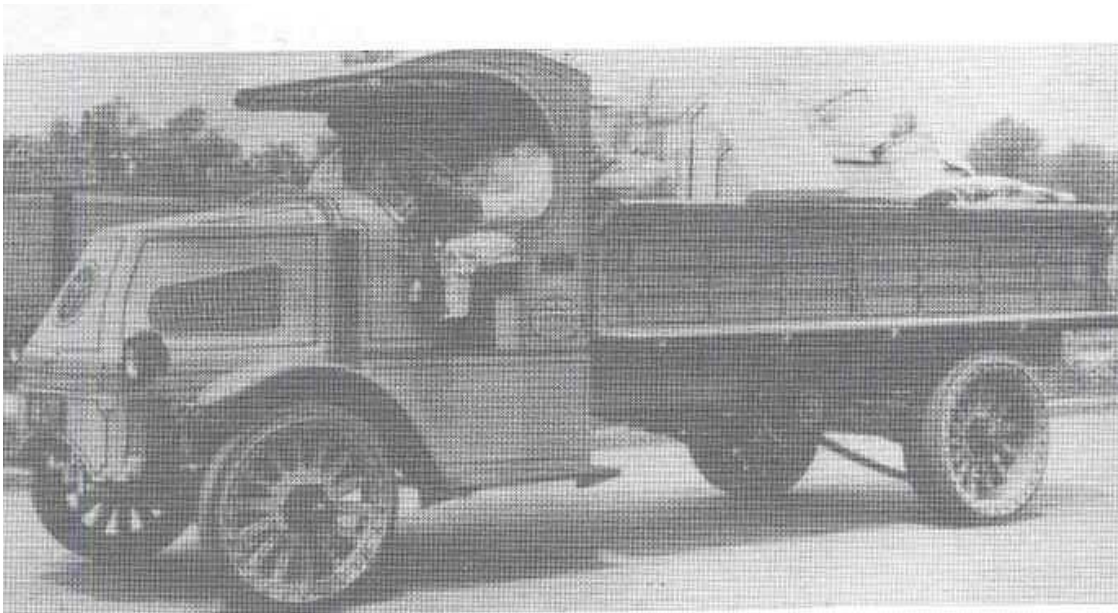


Figura 1.6. Camión de carga de 1916 equipado con llantas sólidas.

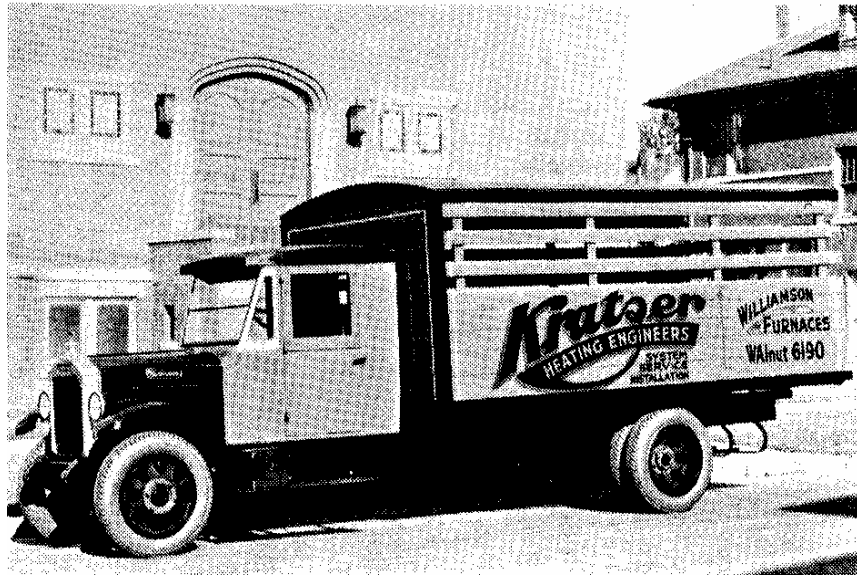


Figura 1.7 Camión de los años 20's con rines de placa de acero y llantas neumáticas.



Figura 1.8 Tractocamión del siglo XXI.

Para poder describir el comportamiento mecánico de las llantas, SAE (Society Automotive Engineers) establece, en la recomendación práctica 670e ^[15], un sistema de ejes coordinados dextrógiro, el cual se muestra en la Figura 1.9.

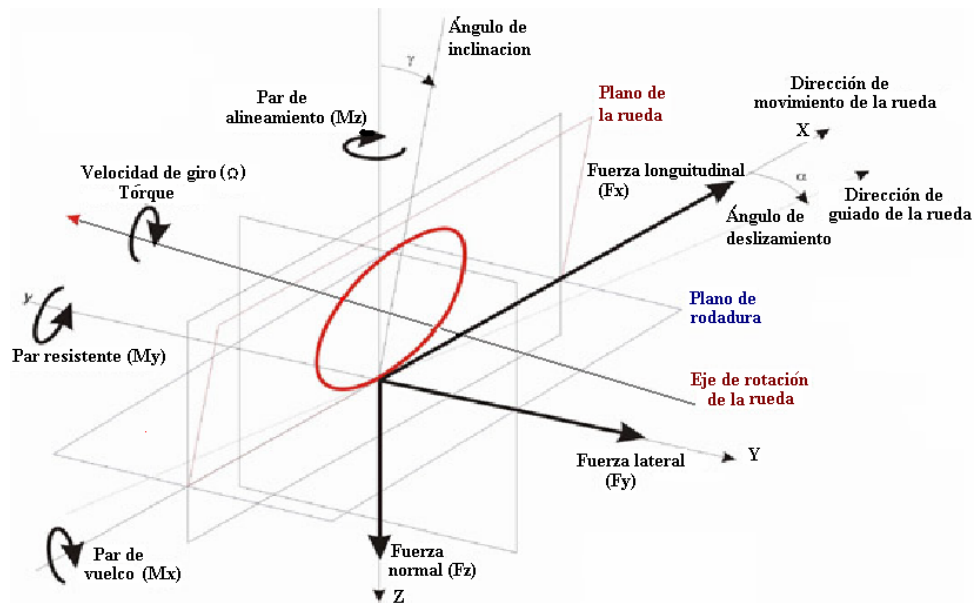


Figura. 1.9 Fuerzas, momentos y grados de libertad de una llanta.

Este sistema de referencia tiene su origen al centro del área de contacto de la llanta con la superficie de rodadura. El eje X , formado con la intersección del plano del rin y el plano del camino, se orienta positivamente en el sentido de avance. El eje z , vertical y perpendicular al plano del camino, es positivo hacia abajo. El eje Y se encuentra contenido en el plano del camino, cuyo sentido positivo resulta de acuerdo a un sistema ortogonal dextrógiro.

En la misma figura se indican también las fuerzas y momentos a los que pudiera estar sujeto el neumático de un vehículo en movimiento, atendiendo no sólo a la rotación de la llanta, sino considerando también los desplazamientos en el espacio. Así, se pueden identificar desplazamientos en la dirección de viaje, x , en la dirección transversal, y , y verticales, z . Estas fuerzas (F 's) y momentos (M 's y T), como usualmente se describen en la dinámica de la llanta, son resultado de la interacción de la misma con el medio circundante, tanto para producir su movimiento, como las que ofrecen resistencia al mismo. Además de estas acciones, en la figura se describen ángulos y planos necesarios para describir el movimiento de la llanta. Estos son:

Plano de la rueda o rin. - Plano central de la rueda, normal al eje de giro.

Ángulo de inclinación (γ). – Ángulo formado entre el eje Z y el plano de la rueda.

Ángulo de deslizamiento (α). – Ángulo que se forma entre el eje X y la dirección de viaje del centro de contacto de la llanta.

Estas fuerzas y momentos producen que la llanta se deforme, lo cual refleja el efecto de sus propiedades mecánicas que repercuten en el movimiento resultante.

Un parámetro importante en el comportamiento de la llanta, es el ángulo de deslizamiento, α , el cual se debe a la deformación que sufre debido a la elasticidad lateral del material, representado en la Figura 1.10.

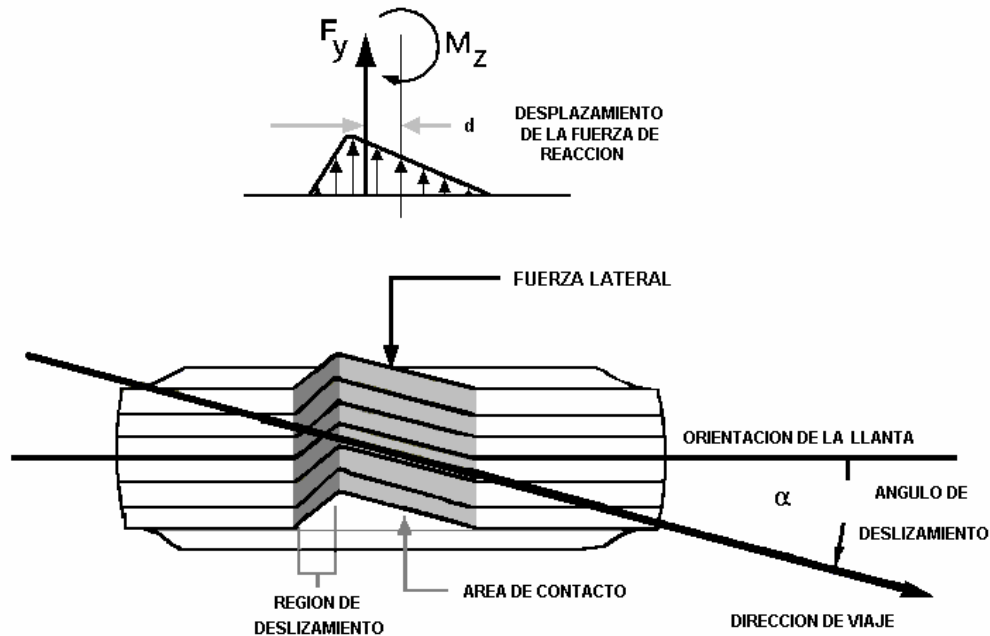


Figura. 1.10 Ángulo de deslizamiento y área de contacto de la llanta.

De este ángulo, producto de la capacidad de deformación elástica de la llanta, se derivan una variedad de características mecánicas, que proporcionan a la llanta propiedades únicas para su empleo en los vehículos terrestres, rigiendo su comportamiento dinámico.

1.4 Características de las Llantas

1.4.1 Funciones básicas de los neumáticos

Para comprender la relación entre las llantas, las condiciones de operación, las fuerzas resultantes y momentos desarrollados en las áreas de contacto con la superficie de rodamiento, es esencial considerar el contexto del funcionamiento y desempeño de un vehículo. Las funciones básicas que la llanta realiza son:

1. - Sostener el peso del vehículo y soportar todas las cargas verticales que se le apliquen a éste.
2. - Asegurar la transmisión de la fuerza del motor, para generar el movimiento del vehículo (Tracción).
3. - Proveer el adecuado control de mando y estabilidad direccional.

4. - Colaborar activamente en el frenado.

Además de estas funciones, la llanta participa en acciones que repercuten en la estabilidad global del vehículo, así como un elemento adicional del sistema de suspensión, atenuando vibraciones originadas por la rugosidad del camino.

Una llanta o neumático es un toroide viscoelástico lleno de aire, que con el refinamiento moderno y la aplicación de técnicas de optimización, ha llevado a la generación de un sistema muy complejo de características particulares, comúnmente de tipo no lineal, cuyas propiedades en la práctica resultan difíciles de cuantificar de una manera sencilla. Desde su invención hasta la época actual, se han desarrollado numerosos modelos de distintos niveles de complejidad, utilizados para obtener información que ayuden a comprender su comportamiento y a entender cuál es su papel en la dinámica de los vehículos. Otra alternativa se apoya en la observación práctica para obtener datos empíricos de las propiedades esenciales.

1.4.2 Materiales utilizados en la elaboración de los neumáticos

Aunque los materiales involucrados en la construcción de las llantas neumáticas son diversos, los principales y sus porcentajes de participación típicos son los siguientes.^[16]

1. *Caucho*. Aproximadamente el 50% de la composición de la llanta, corresponde al caucho. Este material puede ser natural, sintético o una mezcla de ambos. El natural procede del árbol del hule conocido como Hevea, mientras que el sintético se obtiene a partir del petróleo.
2. *Negro de humo*. Representa de un 20 a un 25 % de la composición de la llanta. Este es un producto residual obtenido de la combustión de hidrocarburos líquidos, que se utiliza como agente de relleno y de refuerzo en el caucho. Este material brinda propiedades de resistencia y de dureza al caucho.
3. *Fibras o cuerdas de acero o textiles*. Forman de un 15 a un 20 % de la masa total de la llanta, utilizadas principalmente en el armazón o carcasa de la llanta.
4. *Productos químicos*. Representan alrededor del 8% de la llanta, siendo utilizados más de 200 compuestos químicos adicionales. Estos compuestos dependen del fabricante y del tipo de llanta, siendo empleados como estabilizadores, endurecedores, catalizadores y aditivos especiales.

Así mismo, durante el proceso de fabricación de los neumáticos, se utilizan otros materiales que facilitan su construcción, teniendo participación como refuerzos estructurales.

1.5 Estructura y Tipos de Neumáticos

1.5.1 Estructura de los neumáticos

El elemento más importante de la estructura mecánica de la llanta es la carcasa, la cual se forma por un gran número de capas de fibras o cuerdas flexibles que poseen alto módulo de elasticidad, estas están embebidas en una matriz de hule o caucho de bajo módulo de elasticidad.

1.5.2 Tipos de neumáticos

Existen dos estructuras básicas que se utilizan en la construcción de los neumáticos. En estos diseños las direcciones de las cuerdas juegan un papel importante en el comportamiento de las propiedades mecánicas, usualmente definidas por el ángulo de corona. Este es el ángulo que se forma entre la cuerda y la línea circunferencial central de la llanta.

Los principales tipos de llantas neumáticas que se derivan de las estructuras básicas son las denominadas “diagonales” (*bias-ply*) y las “radiales”. Las llantas diagonales fueron las comúnmente usadas desde los primeros años de la industria automotriz norteamericana, hasta la década de los 60's, cuando aparecen las llantas radiales, que fueron desarrolladas en Europa. En las siguientes décadas, los neumáticos radiales fueron desplazando a los “bias-ply” en los automóviles de pasajeros, siendo actualmente las más utilizadas. Sin embargo, el uso de llantas radiales en vehículos de carga y de transporte de pasajeros ha sido aceptado de manera paulatina, pero en la actualidad se puede observar una ligera preferencia de éstas sobre las llantas diagonales.

Llantas “Bias-ply”

La carcasa utilizada en la estructura de los neumáticos “bias-ply”, se forma por dos o más capas de cuerdas (o fibras), con ángulos de corona de entre 35 a 40° respecto a la circunferencia, alternando las direcciones de recorrido de las fibras en cada capa para formar dicho ángulo entre fibras, como se muestra en la Figura 1.11. Debido a estas características constructivas, un mayor ángulo de corona proporciona una mayor flexibilidad en el costado de la llanta pero poca estabilidad direccional, lo que resulta opuesto para ángulos menores.

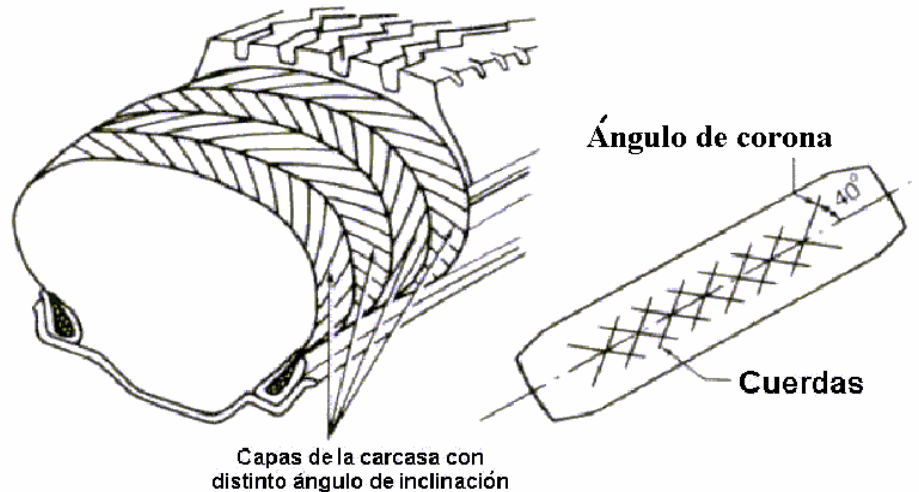


Figura. 1.11 Estructura de las llantas diagonales (Bias-ply).

Llantas radiales

La construcción de los neumáticos radiales se caracteriza por recorridos paralelos de capas "engomadas" reforzadas con fibras de nylon, poliéster o fibras de vidrio, a lo largo de toda la estructura. Las cuerdas que forman la carcasa están dispuestas radialmente, con un ángulo de corona de 90° como se aprecia en la Figura 1.12. Debido a que este arreglo de fibras brinda poca rigidez y pequeña o nula estabilidad direccional, la estructura se complementa con cinturones formados por tejidos de cuerdas con un alto módulo de elasticidad, que corren circunferencialmente en el neumático, entre la carcasa y la banda de rodadura. Estos cinturones proporcionan la estabilidad direccional, mientras que el arreglo de fibras radiales proporciona suavidad en la marcha.

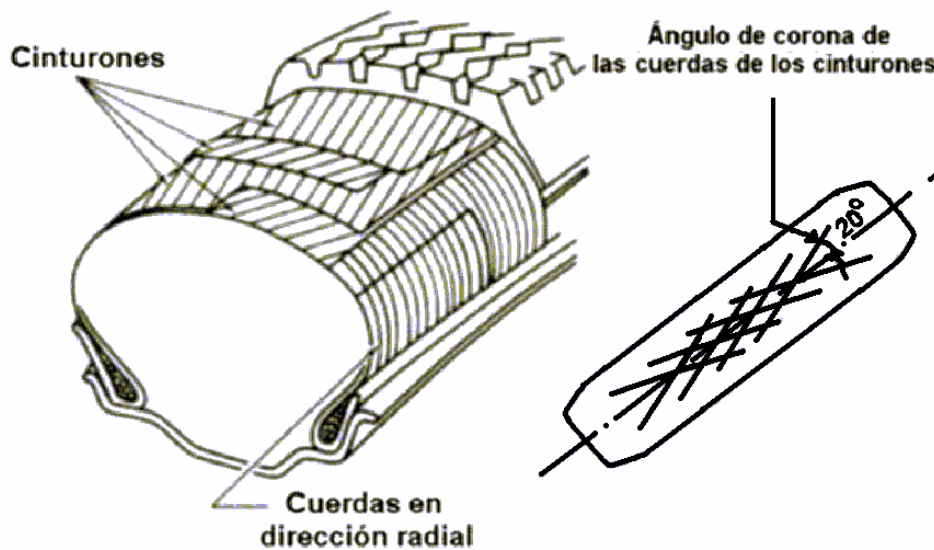


Figura. 1.12 Estructura de las llantas radiales.

Las cuerdas en los cinturones están dispuestas en capas alternadas, formando un ángulo de aproximadamente 20° entre las cuerdas de una capa y las de la adyacente (Figura 1.12). Además, las llantas radiales cuentan con dos o más capas (o telas) angostas de acero llamadas estabilizadores o protectores (Figura 1.13), cuyas cuerdas se cruzan en el centro formando un ángulo de entre 70° a 80° con respecto a las cuerdas radiales.

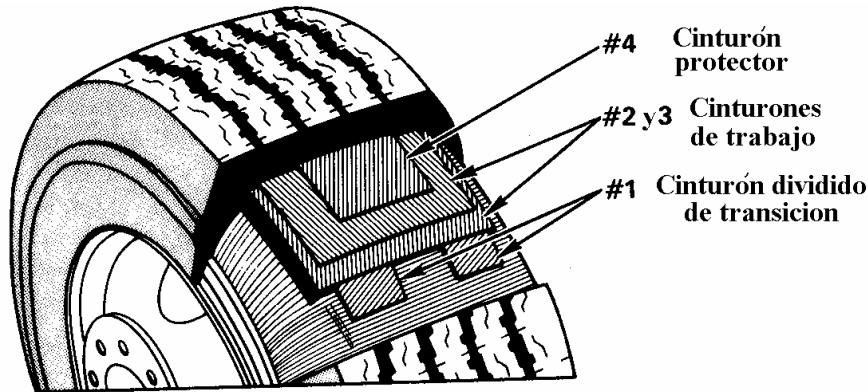


Figura 1.13 Configuración de una llanta radial de cuatro cinturones para vehículo pesado.

Los cinturones ayudan a estabilizar la banda de rodamiento, ayudan a la rigidez lateral manteniendo la superficie de rodamiento sobre el camino a pesar de las deflexiones laterales que sufra la llanta. Sin estos cinturones, al inflarse las llantas desarrollarían una serie de corvaduras o hebillas, debido a los espacios existentes entre los cordones.

Debido al tipo de construcción, las llantas diagonales son más rígidas que las radiales, impidiendo la deformación del neumático pero provocando que gran parte de la carga se aplique en las cejas exteriores, con una consecuente distorsión en el área de contacto. Las llantas radiales presentan mayor uniformidad en los esfuerzos debidos a la presión de inflado, lo que reduce la fatiga de la carcasa. Además, estas llantas proporcionan mayor economía en el combustible por reducir la resistencia a la rodadura, la cual representa aproximadamente el 20% del consumo de combustible del vehículo ^[17,18].

Las ventajas de los neumáticos radiales incluyen ^[17,18]:

1. - Cubierta más flexible para un mayor "confort".
2. - Bajo calentamiento en operación.
3. - Alta capacidad de carga.
4. - Excelente reparabilidad.
5. - Menos ruidosas.
6. - Presentan menor resistencia a la rodadura.
7. - Mejor tracción debido a que la estructura del neumático se acopla mejor al camino (agarre).

8. - Reduce el desgaste por la eliminación de torceduras durante el rodamiento de la llanta.

1.6. Nomenclatura de los Neumáticos

Independientemente de la marca los neumáticos, estos se identifican por una serie de números y letras, que proporcionan fundamentalmente características dimensionales y de aplicación. Los códigos utilizados para su identificación, toman en cuenta las siguientes características, normalmente en el orden indicado:

1. Ancho de la sección.
2. Relación de aspecto (relación altura/anchura de la sección)
3. Tipo de estructura (R, radial; D, bias ply o diagonal B- diagonal acinturonada)
4. Diámetro del rin.
5. Índice de carga.
6. Índice de velocidad.

Las dimensiones involucradas en la identificación de una llanta se muestran en el esquema de la Figura 1.14.

En algunos de los códigos de identificación de las llantas se utiliza el índice de carga, que indica la capacidad de soporte vertical que tiene la llanta. También, se utiliza el índice de velocidad, que se refiere a la velocidad máxima que la llanta puede soportar debido a los esfuerzos ocasionados por su rotación. Un resumen de estos índices se muestra en las tablas 1.1 y 1.2 ^[19].

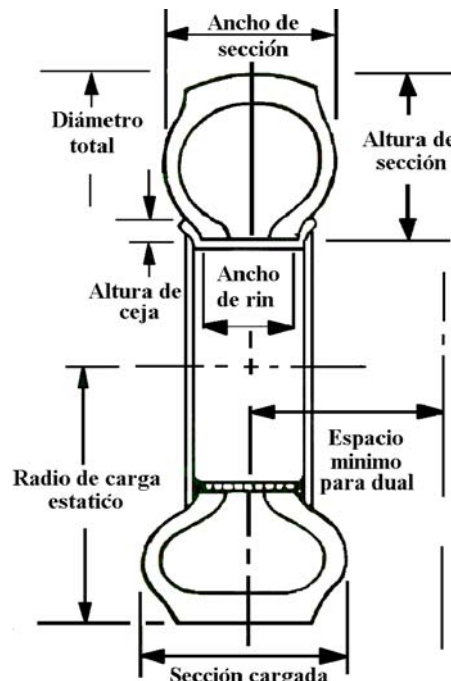


Figura. 1.14 Partes del neumático.

Tabla 1.1
Equivalencia de algunos índices de carga.

Índice	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	200
Carga (kg)	250	335	450	600	800	1060	1400	1900	2500	3350	14000

Tabla 1.2. Ejemplo de algunos índices de velocidad.

Símbolo	B	C	D	E	F	G	J	K	L	M	N
Velocidad (km/h)	50	60	65	70	80	90	100	110	120	130	140
Símbolo	P	Q	R	S	T	U	H	V	Z	W	
Velocidad (km/h)	150	160	170	180	190	200	210	240	>240	>240	

De acuerdo a lo explicado anteriormente, el código 195/70R13 86 H, mostrado en el costado de la llanta de la Figura 1.15, significa:



1. - 195: Ancho de sección, 195 mm.
2. - 70: Relación altura/ancho de sección, 70%.
3. - R: Tipo de estructura, radial.
4. - 13: Diámetro del rin, 13 in (pulgadas).
5. - 86: Índice de carga, 86 (530 kg).
6. - H: Índice de velocidad, H (210 km/h).

Figura 1.15 Ejemplo de un tipo de nomenclatura utilizada en la identificación de las llantas neumáticas.

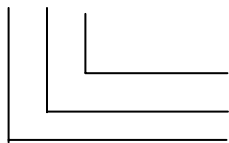
Para el caso particular de las llantas empleadas por los vehículos de carga pesada, existen tres formas típicas para su designación y clasificación, las cuales utilizan una combinación de números y caracteres con el siguiente significado ^[20, 21, 22].

- R - Construcción radial.
- (-) ó D - Construcción diagonal (Bias).
- HC - Llanta de uso pesado para rines de 15 grados.
- TR - Llanta de uso pesado, para rin de 5 grados de diámetros pequeños.
- ML - Para uso de minería y construcción (maquinaria pesada).

A continuación, se describen algunos ejemplos aplicando las tres formas típicas para la designación de llantas para servicio pesado:

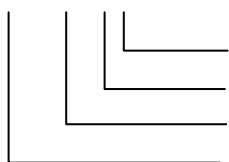
1. - Medida convencional de llantas utilizadas en rines planos.

10.00-20



Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción diagonal (bias).
Sección nominal en pulgadas.

7.050R15TR



Para uso en rines TR.
Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción radial.
Sección nominal en pulgadas.

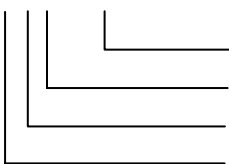
2. - Medida convencional de llantas utilizadas en rines de 15 grados (sin cámara).

11R22.5



Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción radial.
Sección nominal en pulgadas.

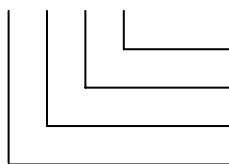
11-24.5ML



Aplicación de minería y/o construcción.
Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción diagonal (Bias).
Sección nominal en pulgadas.

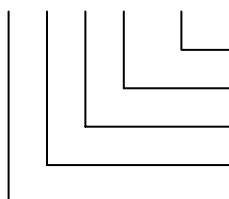
3. - Medida métrica utilizada en rines de 15 grados (sin cámara).

295/75R22.5



Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción radial.
Relación altura anchura de sección.
Sección nominal en milímetros.

275/65R17.5HC



Para uso en rin HC.
Diámetro del rin en pulgadas.
Construcción radial.
Relación altura anchura de sección.
Sección nominal en milímetros.

Aunque no todos los tipos de nomenclatura incluyen la proporción entre el ancho y la altura de la sección transversal de la llanta (conocida como relación de aspecto), es común que para los valores no indicados explícitamente, esta proporción sea de 92% aproximadamente, para llantas normales esto es que no tengan el ancho de sección con decimales, p.ej. 7.0R14 y del 82% para las llantas de bajo perfil, esto es las que presentan decimales en el ancho de sección p.ej. 7.75R14. ^[23, 24, 25]

Aunque utilizar una nomenclatura de designación brinda información sobre las características geométricas de las llantas, e incluso indirectamente sobre propiedades de resistencia, esta información no es suficiente. Las características de su desempeño cuando el vehículo está operando, son difícilmente disponibles, por lo que es necesario obtenerlas, ya sea con el empleo de modelos teóricos para tener una aproximación, o a partir de esquemas experimentales, que proporcionen valores reales de su comportamiento.

2 Requerimientos de diseño del banco

El presente capítulo describe los principales grupos de características físicas y mecánicas de las llantas que deben ser consideradas para el diseño del banco de pruebas. Se enfatizan también las propiedades de rigidez de las llantas, como base para la definición de los requerimientos de diseño del banco y sus condiciones de operación.

2.1 Etapas Generales de Diseño

El proceso general de diseño involucra diversas etapas secuenciales e interrelacionadas que llevan a convertir una necesidad en un plan funcional y significativo ^[26,27,28], es decir, en un producto que satisfaga una serie de requerimientos identificados como parte esencial de la necesidad.

El esquema general de diseño ^[29,30] propone etapas como el reconocimiento de una necesidad, el establecimiento de especificaciones y requisitos, síntesis de diseño creativo (generación de ideas), diseño preliminar y desarrollo, que concluyen con la elaboración del diseño de detalle. Naturalmente, el proceso global incluye, posterior a estas etapas, la construcción de prototipos y la ejecución de pruebas de desempeño, que finalmente dan lugar al diseño final para producción, si es el caso.

2.2 Propiedades mecánicas de las llantas. Enfoque experimental

Como se ha mencionado con anterioridad, las llantas son uno de los componentes de un vehículo que influyen significativamente en su comportamiento dinámico. Esta influencia se debe a que son los elementos de interacción directa entre el vehículo y el camino, además de soportar la carga, de atenuar el movimiento, de brindar control direccional y la tracción requerida para que el vehículo se desplace sobre el camino.

La funcionalidad de la llanta, que ofrece una respuesta ante las condiciones a las que se expone en su uso, depende principalmente de sus propiedades mecánicas. Con el propósito de predecir el comportamiento de una llanta ante condiciones específicas de operación, es necesario conocer y cuantificar sus propiedades, con las cuales se pueden determinar los límites de su desempeño.

Debido a la complejidad tanto de su estructura como de los materiales que la componen, no existe un modelo único que pueda proporcionar la información necesaria de sus características a partir de cálculos teóricos. Además, aunado a la falta de información por parte de los fabricantes, resulta necesario utilizar un método alterno para obtener sus propiedades. Uno de estos métodos puede ser a

través de un proceso de investigación experimental, aunque esta alternativa requiere de contar con dispositivos que permitan medir directa o indirectamente los parámetros que conduzcan al conocimiento de las propiedades necesarias. En estos argumentos se refleja la importancia de contar con un banco de pruebas que tenga la capacidad de brindar información, ya sea de manera directa o a través de otras variables físicas que sean factibles de medición, que conduzca al conocimiento de las propiedades mecánicas de las llantas neumáticas. De esta manera, un banco de pruebas puede ser la herramienta aplicable para la determinación de las propiedades requeridas.

Para establecer los principales requerimientos para el diseño de un banco de ese tipo, es ineludible recurrir a información de diversas fuentes. Una fuente la constituyen normas y métodos de prueba existentes, así como los órdenes de operación de las llantas en los vehículos actuales. Con base en estos, se establecen características funcionales y de desempeño de las llantas, de acuerdo a su tipo de aplicación. Sin embargo, debido a la situación y al uso no regulado de llantas en los vehículos que circulan por el país, no existe un control de la información sobre las propiedades y características que afecten la estabilidad de los vehículos. Por otro lado, se cuenta con algunas normas que brindan información general de clasificación e identificación, definiciones generales, métodos de prueba de capacidades de tipo estático o de resistencia al desgaste, entre otras. En este contexto, no existen normas que hagan referencia a métodos de prueba para la completa caracterización de las llantas neumáticas, con respecto a su comportamiento como parte integral de un vehículo en operación. A pesar de no regular en su totalidad los parámetros funcionales de una llanta, estas normas dan origen al tipo de llantas de uso generalizado en México, que sirve de base para establecer algunos de los requerimientos del banco.

2.3 Normas

Son pocas las normas nacionales que tratan sobre especificaciones y conceptos utilizados en la elaboración de llantas neumáticas. Las principales se indican en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Principales normas mexicanas relativas a características de llantas.

Designación	Título
NMX-T-004-SCFI-2000	–Industria Hulera – Llantas, Cámaras y Accesorios– Definiciones.
NOM-016-SCT-2-1996	–Industria Hulera – Llantas para Camión– Especificaciones y Métodos de prueba.
NOM-086-SCFI-1995	–Industria Hulera – Llantas para Automóvil– Especificaciones de Seguridad y Métodos de Prueba.
NOM-086/1-SCFI-2001	–Industria Hulera – Llantas para Camión– Especificaciones de seguridad y Métodos de Prueba.
NOM-008-SCFI-1993	–Sistema General de Unidades de Medida.
NMX-D-050-1974	–Nomenclatura de Términos Técnicos Empleados en la Industria Automotriz.

Además de las normas anteriores, a falta de otras de mayores especificaciones, es común encontrar normas regionales y, en menor grado, normas internacionales, como las emitidas por la SAE (Society of Automotive Engineers), o por ISO (International Organization of Standardization), Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Ejemplo de normas SAE e ISO, relativas a llantas neumáticas.

Designación	Título
SAE J670e	–Vehicle Dynamics Terminology.
SAEJ1315	–Off-Road Tire and rim Selection and Application.
SAE J918c	–Passenger Car Tire Performance Requirements and Test Procedures.
SAE J1269 MAR87	–Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires.
ISO 8855:1991 (E/F)	–Road vehicles – Vehicle Dynamics and Road-holding ability – Vocabulary.

Para el caso de las normas mexicanas, en ellas se establecen especificaciones de seguridad y métodos de prueba sobre desgaste y resistencia, que deben cumplir las llantas nuevas a utilizar en México. Además, hacen referencia al Sistema General de Unidades de Medida, el cual debe ser empleado como base para expresar adecuadamente las magnitudes físicas involucradas. Algunas hacen referencia a la nomenclatura de los términos técnicos utilizados en la industria automotriz, como un intento de darle uniformidad al lenguaje técnico en el área de llantas y otros componentes automotrices. Así mismo, definen algunos conceptos aplicables en el contexto del área, como los referentes a llantas, cámaras, válvulas, rueda, rin, entre otros, así como clasificación, identificación y tipos de llantas, partes que las componen, tipos de estructura, etc.

Por otro lado, dentro de las normas regionales e internacionales sobresalen la SAE J670e, así como la ISO 8855, ambas relativas a la terminología empleada en la dinámica de los vehículos. Estas normas son utilizadas en gran medida por los analistas e investigadores de llantas. Debido a que el principal desarrollo de las llantas ha sido en países como Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y Alemania, su implementación ha tomado como base este tipo de normas. Es notorio además, que la elaboración de las normas empleadas en México se ha basado en gran medida en las normas regionales e internacionales, sin tener una completa cobertura de las normas base.

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, las acciones y los efectos a los que se expone una llanta son definidos de acuerdo a estas normas (ver Figura 1.1 capítulo 1). De esta manera, se uniformizan los conceptos técnicos asociados al comportamiento y uso de las llantas neumáticas.

2.4 Tipos de Carga

Conforme a lo que se ha mencionado con anterioridad, es necesario establecer los tipos de carga que experimenta una llanta en condiciones reales de operación, los cuales sirven de referencia para definir los límites de carga que el banco debe proporcionar a la llanta bajo prueba. Además de basarse en las normas que se

mencionaron anteriormente, se ponen en práctica las recomendaciones que los fabricantes proporcionan para el uso adecuado de llantas en vehículos ligeros y pesados.

Para definir las cargas requeridas, es necesario identificar el tipo de cargas que deben ser aplicadas a través del banco para determinar las propiedades de las llantas. Bajo esta consideración, debe tomarse en cuenta que los neumáticos soportan distintos tipos de carga durante su operación. Estas cargas (fuerzas y pares) pueden presentarse de manera individual o combinada, como son: cargas verticales (debidas al peso y a movimientos verticales), cargas laterales (debidas a los cambios de dirección y al entorno ambiental) y cargas longitudinales (debidas a la tracción y resistencia al rodamiento) ^[31, 32]. En este sentido, es necesario que el banco sea capaz de simular bajo control, el entorno al que estaría expuesta la llanta, en condiciones de operación en un vehículo, suficientes para determinar sus características. Así, el banco debe de proporcionar a la llanta un movimiento en cada una las tres direcciones principales convencionalmente utilizadas (definidas en SAE J670e e ISO 8855), así como aplicarle una carga vertical simulando el peso del vehículo y una fuerza lateral de empuje.

2.4.1 Fuerzas y momentos

El estado de fuerzas y momentos más importante, es cuando la llanta es sujeta a un cambio de dirección, mientras ésta es cargada verticalmente. Estos cambios se llevan a cabo por efecto de las fuerzas laterales que se generan en la misma que, por efecto del movimiento, dan lugar a un par de autoalineamiento (Figura 2.1). El control direccional, incluyendo el vehículo, se realiza mediante el volante de dirección.

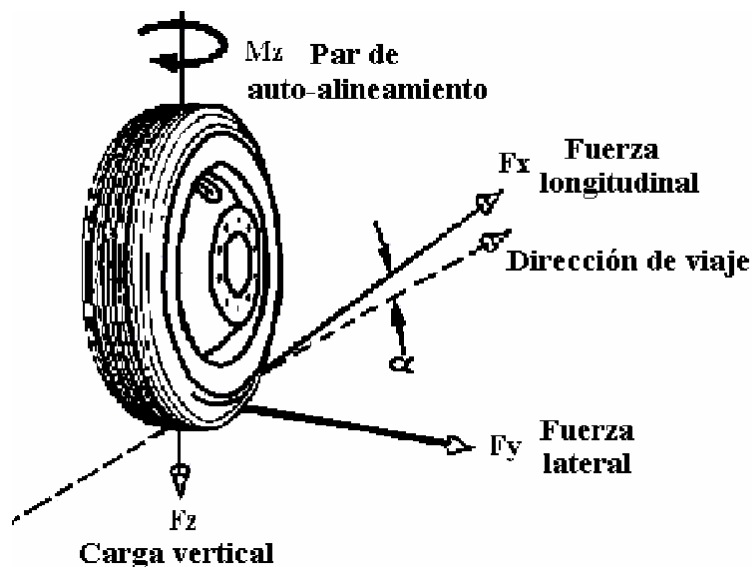


Figura. 2.1 Par de auto-alineamiento y fuerzas que actúan en las llantas

El efecto de la fuerza lateral es un fenómeno complejo, el cual no está solamente en función de la fricción entre el piso y la llanta, sino también con otros factores dependientes de la geometría, estructura, materiales y condiciones de operación de cada neumático. Esta fuerza lateral (F_y), actúa transversalmente al plano que contiene a la llanta, la cual se desarrolla durante el cambio de dirección de la llanta, denominado en inglés como “cornering”. Esta fuerza tiene una estrecha relación con el denominado ángulo de deslizamiento, siendo función de la carga vertical y de la presión de inflado del neumático, de acuerdo a la estructura de la llanta. El par de auto-alineamiento (M_z) es la reacción que se produce ante estos cambios de dirección y que trata de reorientar la llanta longitudinalmente, contrarrestando el desplazamiento angular que deforma transversalmente a la llanta, tendiendo a recuperar su condición de desplazamiento transversal neutral al realizar una maniobra. La fuerza longitudinal (F_x) considera la tracción y las fuerzas generadas durante el frenado y la aceleración de la llanta. Cuando la llanta cambia de dirección, esta fuerza se refiere a la resultante en la dirección del plano del rin y no necesariamente a la dirección del movimiento. Entre los factores que participan en el comportamiento de la fuerza longitudinal de la llanta se encuentran las condiciones del camino, la construcción de la llanta y la operación del vehículo.

2.4.2 Factores que influyen en el comportamiento de las llantas en los vehículos

Existen distintos factores que afectan a la fuerza tractiva entre la banda de rodadura de la llanta y la superficie de rodado (entre llanta y camino) los cuales se deben tener presentes durante el proceso de diseño. Dentro de estos factores se encuentran los asociados al camino, al neumático y al vehículo.

Los factores del camino involucran la superficie de rodamiento, así como las condiciones de compatibilidad entre la llanta y la superficie. Por tanto, son importantes su rugosidad y los materiales que constituyen el camino, así como factores ambientales como la humedad y la temperatura de la superficie.

Con respecto a los factores del neumático, como ya se ha mencionado, son las características propias de las llantas que resultan del diseño (radial, diagonal), tanto geométricas como de componentes. Intervienen también las condiciones de trabajo a las que está sometida la llanta, como cargas que soporta, presión de inflado, estado de desgaste y velocidad de operación.

El vehículo tiene también una influencia en el desempeño de la llanta, ya que la llanta reaccionará, dentro de sus capacidades, a las demandas de éste. Por ello, es importante considerar el tipo de vehículo, función de la llanta en el mismo, condiciones de operación y maniobras de conducción (aceleración, frenado, cambios de trayectoria, etc.). Dentro de estos factores se encuentran también involucrados aspectos del sistema de suspensión, de los frenos y de otros componentes estructurales.

2.5 Tipos de Movimiento

Los neumáticos están sujetos a distintos tipos de movimiento, como se aprecia en la Figura 2.2. Dentro de los movimientos que se presentan se encuentran el de rotación sobre el eje horizontal, el giro alrededor del eje vertical y el desplazamiento lateral. De acuerdo a ellos, el banco debe simular estos tres movimientos principales, constituyendo la base para su diseño. El banco debe proporcionar, entonces, un movimiento de rotación alrededor del eje horizontal, simulando el giro del neumático; un movimiento lateral (de empuje), que representa las fuerzas y desplazamientos laterales; además de proveer de un giro alrededor del eje vertical.

Los movimientos generales de la llanta se definen convencionalmente en distintas normas, como es el caso de la ISO 8855, que coinciden en su mayoría con la SAE J670e. Estos documentos proponen un sistema coordenado ortogonal tridimensional de referencia base, siendo comúnmente adoptado por los analistas de llantas.

2.5.1 Sistema coordenado según ISO 8855

El sistema de referencia que establecen tanto la norma ISO 8855 como la SAE J670e, es un sistema coordenado dextrógiro. El origen de este sistema se encuentra ubicado en el centro del área de contacto que se da entre el neumático y la superficie de rodamiento, cuando la llanta se encuentra en equilibrio estático, como se muestra en la Figura 2.2.

Retomando algunos puntos ya comentados, el eje X de este sistema se forma con la intersección del plano de la rueda y el plano del camino, cuya dirección positiva es hacia adelante. El eje Z es perpendicular al plano del camino, con la dirección positiva descendente. De esta manera, la fuerza normal ejercida por el neumático es positiva hacia abajo y la reacción de la carga vertical, con la que el camino empuja al neumático, se considera negativa. El eje Y se encuentra en el plano de la superficie de rodamiento y la dirección resulta de completar el sistema dextrógiro.

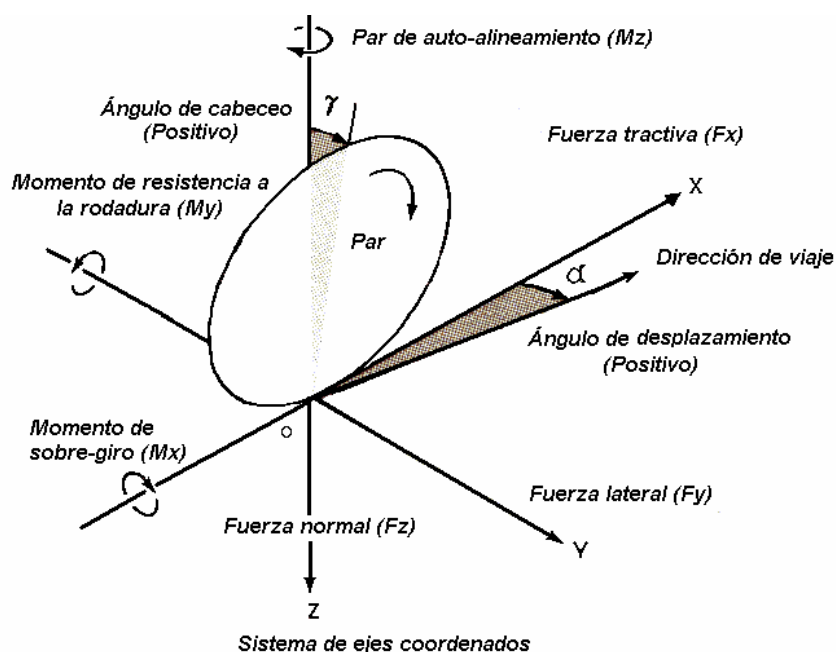


Figura. 2.2 Sistema de ejes coordenados, fuerzas y momentos que actúan sobre el neumático.

2.6 Capacidades del banco

Como primer requisito que debe cumplir el banco propuesto, es que debe ser aplicable tanto a llantas empleadas por vehículos ligeros como a llantas utilizadas en vehículos de carga. Este requerimiento implica manejar tamaños de llanta desde alrededor de 500 mm de diámetro, hasta de poco más de 1000 mm, con anchos que van cerca de 150 mm hasta prácticamente el doble de este ancho. Excepcionalmente debe tener la posibilidad de adaptar dispositivos para llantas de ancho mayor.

Considerando los aspectos mencionados previamente, el banco de pruebas debe tener las capacidades que representen la operación de la llanta de una manera controlada, proporcionando los movimientos necesarios para tal efecto. Además, debe estar acondicionado para permitir la medición de variables que conlleven al conocimiento de las propiedades de rigidez y su dependencia con la carga vertical soportada y la deformación angular producida (ángulo de deslizamiento).

Considerando la magnitud de las posibles dimensiones del banco, una primera e importante condición se refiere a la restricción de movimientos de traslación longitudinal de la llanta. Por ello, el mecanismo que proporcione el accionamiento de la llanta debe aplicarle un movimiento de rotación y simular su movimiento de avance. La velocidad de rotación de la llanta debe ser la mínima necesaria para producir el estado de deformación lateral representativo de la operación en el vehículo. Además, esta condición permite tener un mejor control sobre los dispositivos, demandando la menor potencia posible para el movimiento de la rueda. Es común encontrar como parte de resultados de investigaciones sobre el

tema, datos referentes a valores de propiedades de llantas obtenidos a velocidades de prueba de 10 km/h ^[33,34]. Así mismo, en ese tipo de investigaciones se indican intervalos de estudio de ángulos de deslizamiento de 0° a 8° en llantas de vehículos ligeros y de 0° a 15° para llantas de vehículos pesados ^[35,36,37,38]. Estos intervalos se seleccionan debido a que a mayores ángulos es probable alcanzar la condición de deslizamiento de la llanta sobre el piso, lo cual no es deseable para este tipo de estudios. Por otro lado, en situaciones de operación normal, la llanta trabaja en el intervalo lineal del comportamiento del ángulo de deslizamiento, el cual es típico se encuentre de 0° hasta los 7°, para llantas de vehículos ligeros, y en casos excepcionales hasta los 12° en algunos tipos especiales de llantas de vehículos pesados. Por esta razón, se estima que produciendo un ángulo de orientación de la llanta de 20° puedan alcanzarse esos valores del ángulo de deslizamiento, lo cual se refuerza con la carga lateral que se aplicará también a la llanta.

De acuerdo a esta última condición, el banco deberá contar con un dispositivo que aplique una fuerza lateral, generando un desplazamiento extremo de hasta 8 cm, que es la deflexión máxima sufrida por un neumático al aplicar una carga lateral, de acuerdo a lo reportado en la literatura.

Complementariamente, la llanta debe estar de forma combinada operando bajo una carga vertical, que la obliga a tener el contacto con el piso. Por lo tanto, el banco debe aplicar una fuerza vertical de opresión de la llanta con el piso a través de su eje de soporte, simulando la carga o el peso del vehículo. Con base en la norma NOM 086/1 SCFI 2001, así como otras publicaciones, se establece que la carga vertical máxima que soporta una llanta en un vehículo pesado se encuentra alrededor de los 40000 N; en el caso del dispositivo de prueba, se define el valor nominal de carga vertical en 50000 N.

Estas características se resumen en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características de operación necesarias en el diseño del banco de pruebas

Característica	Valor
Tamaño de llantas	De 0,5 a 1,0 m
Ancho de llantas	De 0,15 a 0,30 m
Ángulo máximo de dirección	20°
Desplazamiento lateral máximo	0,08 m
Carga vertical máxima	50 kN
Velocidad de operación	10 km/h (2,78 m/s)

A partir de estas especificaciones, el siguiente paso es proponer diversas configuraciones que cumplan con ellas, lo cual se muestra en el siguiente capítulo.

3 Diseño conceptual

En el presente capítulo se exponen algunas de las principales ideas generadas, como parte del proceso de diseño, sobre la posible configuración funcional del banco de pruebas, al igual que el esquema del banco seleccionado para un diseño de mayor detalle. Lo anterior, considerando los requerimientos ya definidos en el capítulo anterior.

Como primer paso se realizó un modelo genérico, buscando con esto obtener una concepción general del conjunto y cumplir con las especificaciones ya mencionadas. Dicho modelo sirvió de base para identificar cada una de las partes principales que debe incluir el banco, definiendo los conceptos de los diversos dispositivos que definen la aplicabilidad propuesta del mismo. Estos dispositivos corresponden a un marco estructural principal que soporte los elementos del banco, a los medios de aplicación de una carga vertical a la llanta, a la superficie de apoyo que representa la superficie de rodamiento y que constituye el contacto de la llanta con el piso, así como a los mecanismos para proporcionarle movimiento lateral y giro alrededor de un eje vertical.

Para generar el diseño conceptual final, se analizan diversas configuraciones mecánicas para lograr la funcionalidad de los aspectos anteriores, estableciendo las principales ventajas y desventajas. Lo anterior se realizó mediante un proceso reiterativo de diseño, tratando de obtener mejoras progresivas y la compatibilidad de los distintos esquemas y sistemas dentro del banco. Cada alternativa presentada y analizada, constituyó un modelo básico, utilizado en la generación tanto de las configuraciones factibles, como del modelo final.

3.1 Generación de Ideas

Una vez establecidos los requisitos mínimos con que debe contar, así como la identificación de los probables sistemas que conformarán el banco de pruebas, se propusieron posibles esquemas que cumpliesen con tales especificaciones. Las ideas generadas contemplaron, además de estas características generales de operación, la factibilidad de aplicación práctica y de fabricación.

Las principales ideas generadas consideran básicamente el empleo de un marco de soporte para la llanta, la aplicación de las cargas en las distintas direcciones especificadas, así como los mecanismos de accionamiento que simulan la movilidad de la llanta. Estos aspectos, en conjunto, conceptualizan la configuración general del banco, tomando en cuenta la integración de los tres movimientos básicos y la aplicación de la carga. Lo anterior implica una completa compatibilidad de operación de estos movimientos, de manera que no se presenten interferencias entre componentes cuando varios movimientos se realicen de manera simultánea. Esto permite identificar condiciones críticas, para desarrollar alternativas dentro del concepto principal.

Aunque se identificaron tres conceptos básicos correspondientes a los movimientos requeridos, se analizaron algunas variantes, de las cuales se seleccionaron aquellas con mejores características para integrarlas en el concepto final. En dicho concepto se aplica un desarrollo de mayor detalle, que involucra la selección general de materiales, de componentes, de mecanismos y dispositivos de apoyo como soportes y actuadores mecánicos.

3.2 Conceptos Básicos

3.2.1 Mecanismo de avance de la llanta

Uno de los principales aspectos para el funcionamiento del banco, es el relativo al movimiento de avance de la llanta, cuando ésta rueda sobre el piso. Puesto que las dimensiones del banco limitan el avance continuo de la llanta, se analizaron diversas alternativas con las cuales se sustituyera el desplazamiento de traslación longitudinal de la llanta, proporcionando medios alternos para simular dicha situación. Sobre el particular se esquematizaron tres conceptos generales que simulan la rotación de la llanta sobre su eje y la traslación debida a la rodadura.

Variante 1. Placa deslizante

Partiendo de la condición de mantener fijo el eje de rotación de la llanta, el primer concepto consideró la aplicación de una superficie deslizante bajo la misma, que además, constituye el piso o superficie de rodamiento, como se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Rotación de la llanta sobre una superficie deslizante.

Como se aprecia en la figura, la configuración consta de un dispositivo de sujeción de la llanta que aplica la carga vertical sobre el eje de ésta, que le permite girar alrededor de su propio eje y del eje vertical. Como elemento de apoyo para producir la rotación de la llanta, se presenta una superficie plana que desliza sobre una superficie horizontal, simulando el desplazamiento de avance de la llanta. Esta “cama” soporta el peso de la llanta y la carga vertical aplicada a la misma.

Aunque esta configuración presenta conceptualmente las características operativas requeridas, también deja de manifiesto una desventaja operacional, ya que de la carrera longitudinal de esta cama dependerá alcanzar un estado de condición estable de la llanta. Esta configuración podría presentar problemas en la continuidad de la medición, ya que puede no alcanzarse la velocidad que permita mantener el estado de deformación requerido de la llanta, resultando de un recorrido demasiado corto. Esta configuración sería de utilidad si se buscara medir las propiedades de la llanta de una manera estática y no simulando condiciones reales de operación.

Variante 2. Tambor rotatorio

El concepto de esta variante es introducir una superficie para rotación continua de la llanta, con el mecanismo de soporte y aplicación de carga a la llanta similar al esquema anterior. El elemento primordial en esta variante, consiste de un tambor cilíndrico giratorio en cuya superficie se apoya la llanta para su rotación, constituyendo además una superficie de rodamiento continua.

La inclusión de esta variante presenta, a su vez, dos subvariantes, como se muestra en la Figura 3.2. El esquema (a) muestra la superficie exterior del cilindro para que la llanta ruede, mientras que el esquema (b) muestra como superficie de rodadura la parte interna del tambor giratorio.

Aunque con esta variante se elimina el problema de una superficie de rodadura de longitud finita, presenta el inconveniente de que el área de contacto entre la llanta y la superficie del cilindro depende del diámetro de éste, afectando además la planicidad del contacto. Esta desviación en la planicidad produce, consecuentemente, que la distribución de la presión de contacto de la llanta no se presente de igual manera como en una superficie plana uniforme. Para subsanar este aspecto, se debería contar con un tambor de gran diámetro, disminuyendo con esto la curvatura del área de contacto. Sin embargo, un diámetro importante implica mayores dimensiones en la estructura de soporte general y por lo tanto, el banco requerirá de mayor superficie y espacio para su instalación. Aunado a lo anterior, puede involucrar masas considerables que requieran de motores con la capacidad suficiente para producir su movimiento, con sus efectos inerciales en el arranque, en cambios de velocidad y en el frenado.

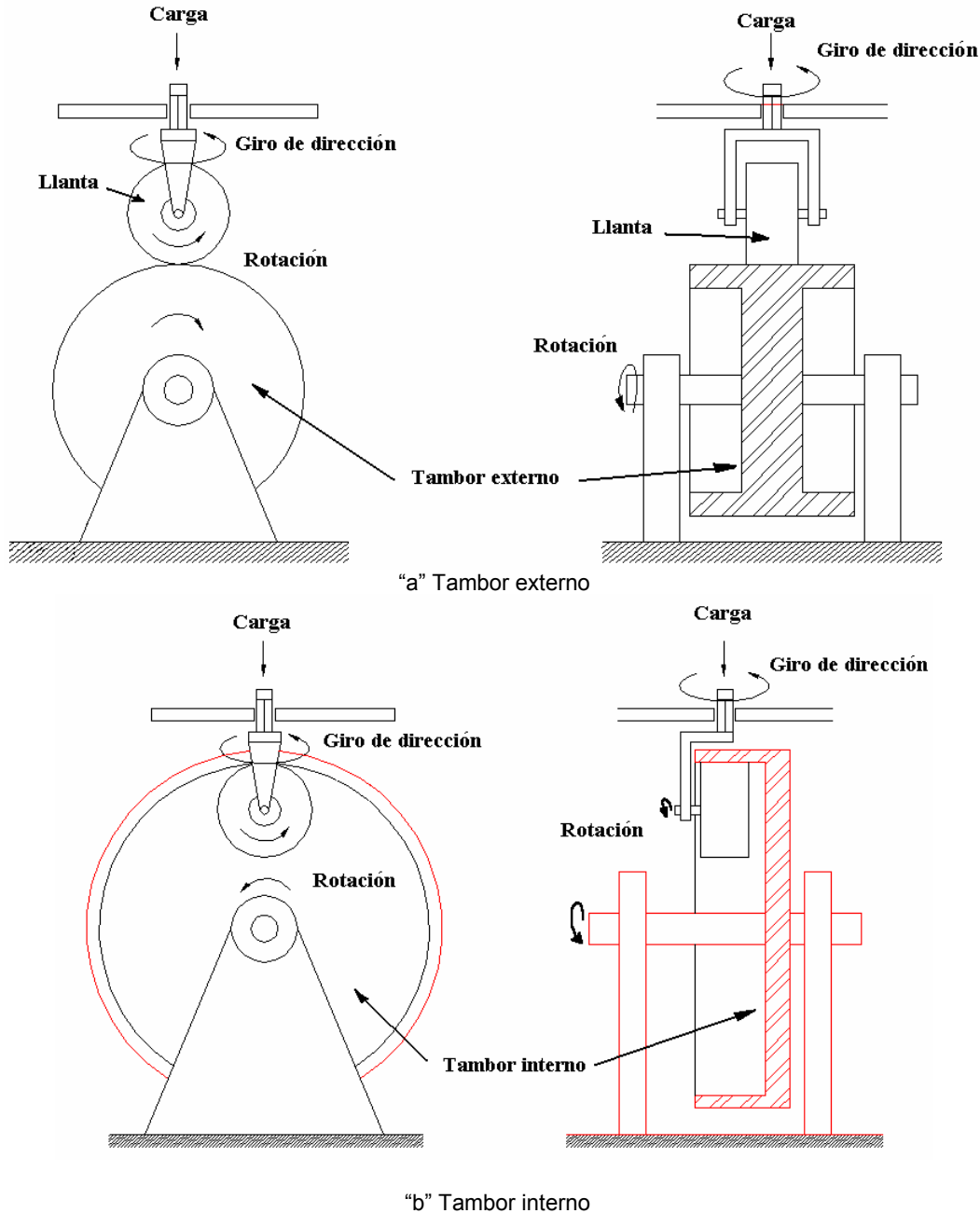


Figura 3.2 Rotación de la llanta en la superficie de un tambor.

Con respecto a la alternativa mostrada en la configuración 3.2b, se presentan, además de los mencionados de la configuración 3.2a, el inconveniente de que al colocar la llanta dentro del cilindro sería necesario cambiar la estructura de soporte. Esto significa que debe evitarse la interferencia entre el soporte del cilindro y el soporte de la llanta. Así mismo, la posición de la llanta requiere considerar además el peso de la misma y su soporte para la aplicación de la carga. Aunque esto podría resolverse colocando la llanta en la parte inferior, el problema de la compatibilidad de la estructura del tambor y del soporte de la llanta permanecería.

Variante 3. Banda plana

Una tercera configuración, surge de la combinación de las dos anteriores, manteniendo la estructura de sujeción de la llanta. Los movimientos rotatorios y de orientación se proporcionan de igual manera como en las configuraciones anteriores, mientras que la superficie utilizada para rodar la llanta se genera por el desplazamiento de una banda plana. Este concepto se obtiene de la conjunción de la superficie plana deslizante de la primera configuración, con la superficie giratoria del tambor de la segunda, dando la ventaja de contar con una superficie plana de longitud "infinita". Esta forma presenta la capacidad de poder simular un camino plano de una manera continua, como se aprecia en la Figura 3.3. Los desplazamientos laterales y verticales se aplican de la misma manera que en los casos anteriores.

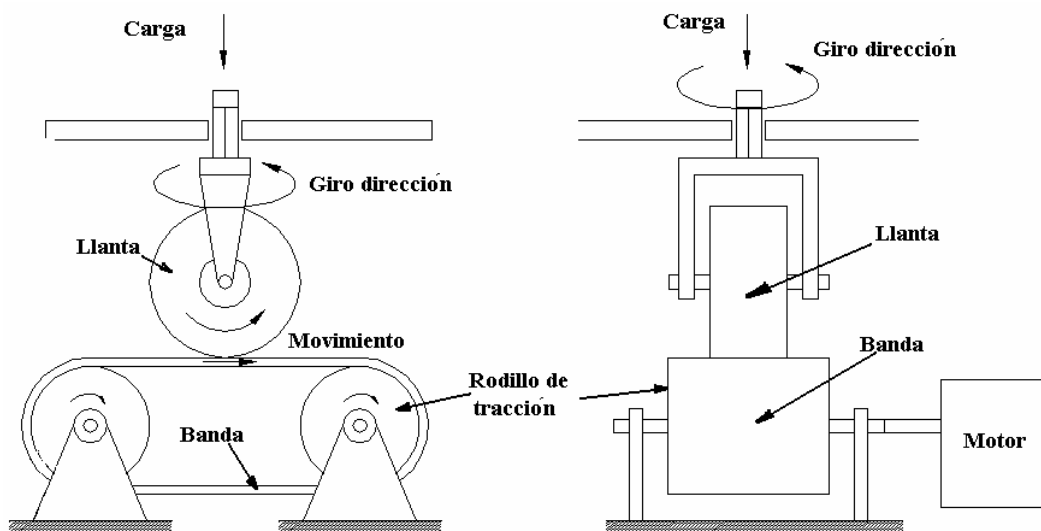


Figura 3.3 Uso de una banda plana como superficie de rodadura.

Como en el caso del tambor, el arreglo de la banda ofrece la ventaja de generar un mayor intervalo de velocidades, velocidad que se puede controlar mediante uno de los rodillos de la banda, evitando el uso de motores sobre el eje de la llanta. Las características de este esquema permiten tener una configuración de los elementos más compacta.

Comparando las configuraciones presentadas, de acuerdo a las características operativas de cada una de ellas, esta última configuración presenta mayores ventajas.

3.2.2 Mecanismos de aplicación de movimiento vertical y lateral

Una vez definidas las características generales de la superficie que permita simular el desplazamiento lineal debido a la rodadura de la llanta, otro aspecto

importante esencial en el proceso de diseño del banco es el concerniente a los desplazamientos. Los desplazamientos necesarios, como se ha comentado previamente, corresponden a los movimientos para la orientación angular de la llanta, a los relativos a la traslación lateral y vertical. Por ese motivo, se avocó a la tarea de desarrollar diversas ideas que pudieran generar los movimientos requeridos, de las cuales se presentan dos, consideradas de mayor factibilidad.

Variante 1. Columna vertical giratoria

Una primera configuración consta de una columna vertical de soporte, sobre la cual se desplaza un mecanismo que soporta al eje de la llanta y que aloja, a su vez, el mecanismo de empuje para el desplazamiento lateral. La carga vertical se aplica sobre el brazo de empuje, transmitiendo esta carga a la llanta y presionándola sobre el piso de prueba. Además, la columna donde se encuentra soportado dicho brazo tiene la posibilidad de girar sobre su propio eje, que gracias a su geometría transversal, transmite a la llanta de prueba el movimiento de giro sobre el eje vertical para orientarla angularmente. Este movimiento angular corresponde a la simulación del giro direccional, como se aprecia en la Figura 3.4.

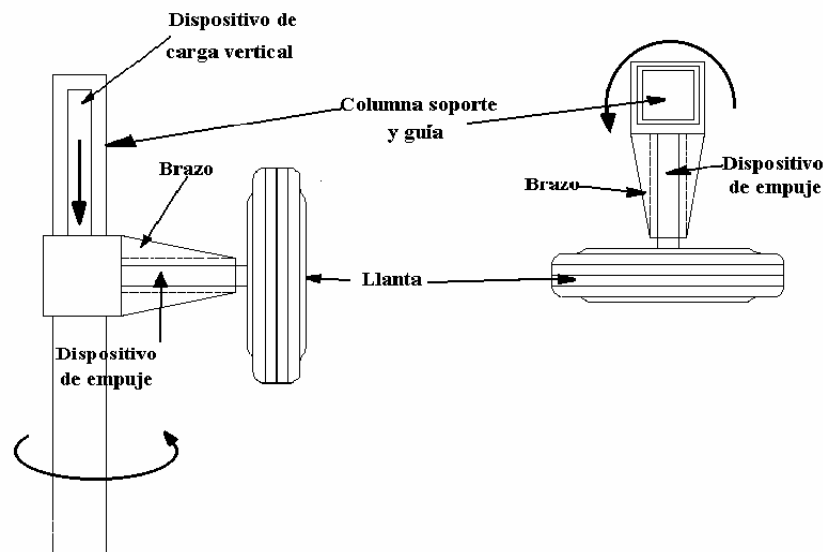


Figura 3.4 Mecanismos de desplazamiento vertical y lateral.

La posible dificultad en este arreglo, es que el mecanismo para proporcionar el movimiento lateral de la llanta puede verse supeditado axialmente al espacio disponible entre la columna y los elementos de sujeción de la llanta. Adicionalmente, al requerirse una mayor longitud se incrementaría el brazo de palanca de la fuerza vertical aplicada, lo que repercutiría sobre la alineación vertical de la llanta.

Variante 2. Brazo curvo

Una segunda alternativa referente a la aplicación del movimiento y de la carga vertical, se muestra en la Figura 3.5, en la que el eje de desplazamiento vertical contiene el plano de la llanta. Esto se logra con la inclusión de un elemento cuya geometría permita la sujeción de la llanta en ese plano, ilustrado en la figura como el brazo curvo. Bajo esta configuración, el par sobre el eje de carga vertical se reduce significativamente, lo que requiere de un mecanismo compatible con el desplazamiento lateral de la llanta.

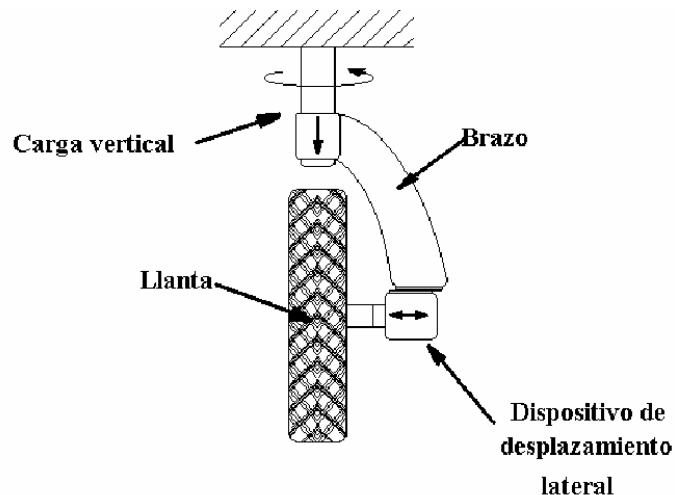


Figura 3.5 Configuración de brazo transmisor.

Como se observa, se pueden aplicar los movimientos requeridos de manera similar al arreglo anterior, cuya operación resulta semejante. Sin embargo, una de las diferencias importantes consiste en que en este arreglo no se cuenta con una columna de soporte, sino que el brazo es directamente soportado por una estructura rígida, permitiéndole libertad de movimiento vertical y rotatorio.

Para el caso del movimiento lateral requerido, éste puede ser proporcionado por un mecanismo de tipo piñón-cremallera, cuyo accionamiento inicial se consideró fuera realizado con precisión, como es el caso de un motor de pasos para el desplazamiento del eje de la llanta. Sin embargo, considerando que la magnitud de la carga puede demandar mecanismos robustos, se analizaron mecanismos alternos para efectuar este movimiento, como el descrito en el arreglo que se muestra en la Figura 3.6. Dicho movimiento es proporcionado por un dispositivo con base en un par prismático ubicado en la parte de unión del eje con el brazo, movimiento que puede ser realizado a través de un cilindro hidráulico.

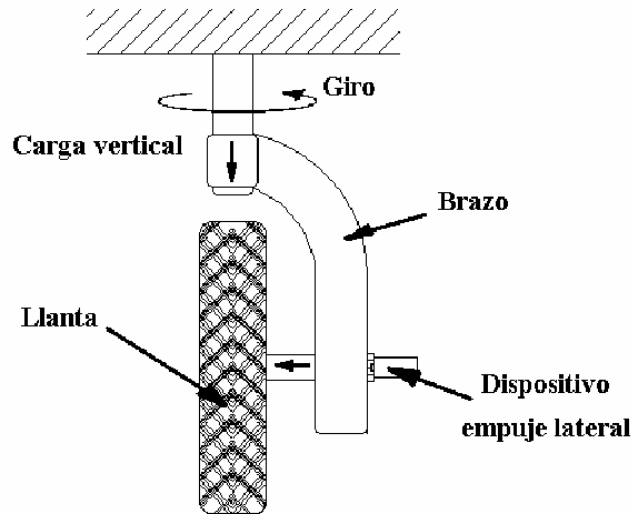


Figura 3.6 Variante de la configuración del brazo transmisor.

Este tipo de dispositivos hidráulicos brindan además ventajas de control de flujo y presión, lo cual puede proporcionar un medio para controlar su operación.

3.2.3 Aplicación de carga

Como se desprende de la sección anterior, los mecanismos de generación del movimiento y de aplicación de las cargas están estrechamente relacionados. Consecuentemente, los mecanismos utilizados para producir los desplazamientos vertical y lateral pueden aplicar conjuntamente las cargas vertical y lateral requeridas. Para llevar a cabo la aplicación de estas cargas y, por consiguiente, los movimientos tanto lineales como angulares, se idearon dispositivos capaces de producir dicho efecto.

Tomando en cuenta que las magnitudes de las fuerzas lateral y vertical aplicadas a la llanta de prueba pueden ser altas (del orden de varios kilonewtons) y que los desplazamientos asociados son relativamente pequeños (de unos cuantos centímetros), una forma de efectuar dicho movimiento podría ser por medios hidráulicos. Los cilindros hidráulicos proporcionan un desplazamiento lineal y una fuerza de empuje considerable y de manera uniforme, controlando el gasto de alimentación de los mismos. Por otra parte, este tipo de dispositivos presenta una operación relativamente simple y la ventaja de conocer y controlar los valores de la carga a través de la presión del fluido de trabajo.

Después de analizar diversos mecanismos como el de piñón-corona para realizar el desplazamiento angular que simule el giro direccional, se convino en utilizar un sistema hidráulico. Ya que al igual que en los dispositivos de carga, este tipo de sistema presenta, facilidad de instalación, mantenimiento y operación, así como una carga uniforme.

El utilizar sistemas de un solo tipo conlleva a obtener una operación integrada y sencilla de los mecanismos durante el accionamiento del banco. Además, pueden lograrse reducciones en costos de fabricación y mantenimiento del conjunto aplicando mecanismos de accionamiento similar. Para cada una de las variantes presentadas relativas a los movimientos que debe experimentar la llanta, se especificó la forma en que se llevarían a cabo tales movimientos y la aplicación de las cargas correspondientes.

Variante 1. Columna circular

Para la generación de movimientos de acuerdo a la primer configuración presentada, se introducen 5 cilindros hidráulicos. Dos de ellos, colocados sobre la columna principal, proporcionan la carga y el desplazamiento vertical; uno más, colocado dentro del bazo horizontal, produce el desplazamiento y la carga laterales, mientras que los dos restantes se conectan a los costados del brazo horizontal para proporcionar la orientación de la llanta, como se muestra en la Figura 3.7.

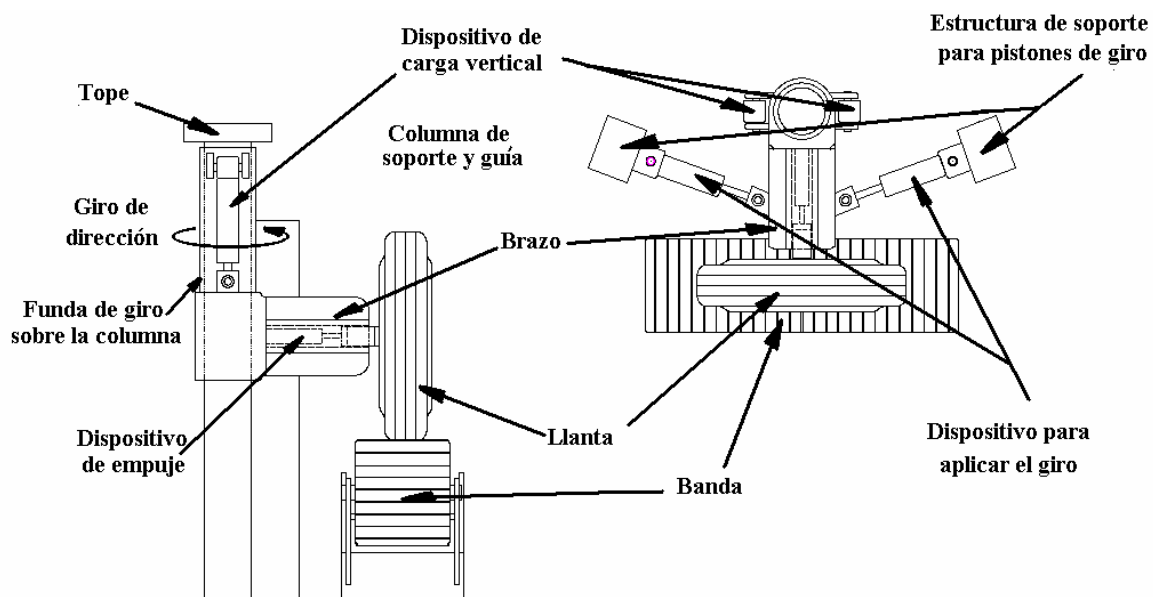


Figura 3.7 Ubicación de los cilindros para producir los desplazamientos de la llanta en el banco.

Se aprecia de la figura que el movimiento de giro (orientación de la llanta) se facilita por el deslizamiento del conjunto (funda) de elementos de soporte de la llanta sobre la columna, la cual es circular. La ventaja que presenta esta configuración radica en que la columna permanece fija y solo se debe girar la funda y sus componentes para la rotación del brazo.

Variante 2. Brazo curvo

Para la variante presentada en la Figura 3.6, se propuso la utilización de 4 cilindros, uno de ellos ubicado en la parte baja del brazo transmisor, el cual proporciona el empuje necesario para generar el desplazamiento lateral requerido. Este cilindro se encuentra acoplado al eje al cual se acopla que brinda soporte a la llanta, como se muestra en la Figura 3.8.

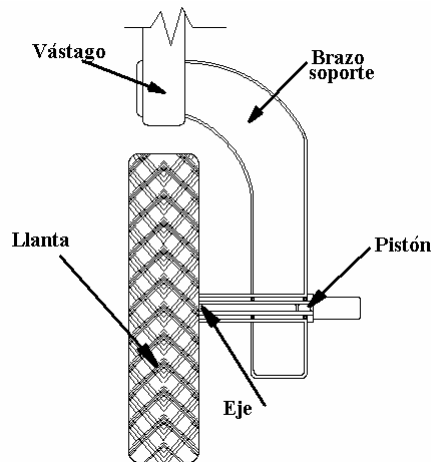


Figura 3.8 Corte parcial del brazo y pistón de empuje lateral.

Otros dos de los cilindros se encuentran acoplados al sistema que proporciona el giro de dirección que se realiza al convertir el desplazamiento lineal de los pistones a un movimiento rotatorio. El conjunto se encuentra alojado dentro de una estructura que brinda soporte a todo el conjunto del brazo. El giro de dirección se lleva a cabo a través del mecanismo dentado del que forma parte el vástago, el cual tiene libertad de movimiento vertical y que se acopla el brazo.

Como se muestra en la Figura 3.9, los cilindros para producir el giro se ubican uno opuesto al otro, que en forma simultánea al extenderse o contraerse, producen un par de fuerzas que conllevan a la rotación de la funda y del vástago alrededor de su eje vertical.

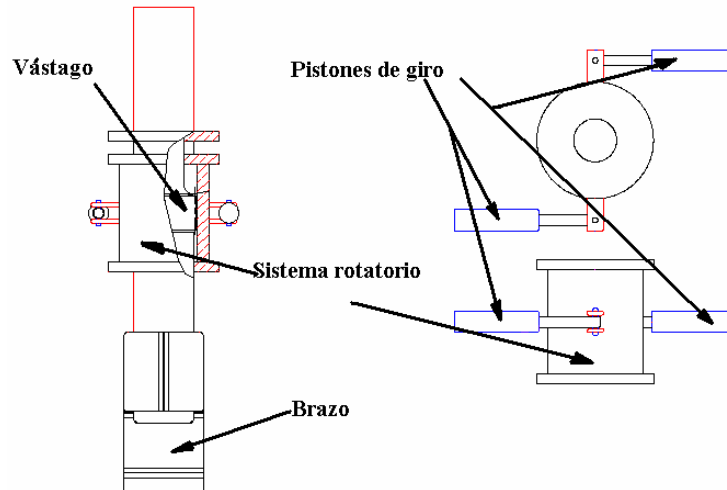


Figura 3.9 Sistema para el giro.

El elemento denominado vástago, además de sujetar el brazo transmisor, forma parte del sistema de carga vertical. Al vástago se encuentra acoplado el cuarto actuador, mismo que proporciona tanto el desplazamiento como la carga en dirección vertical. Este se encuentra en la parte superior de todo el conjunto como se muestra en la Figura 3.10.

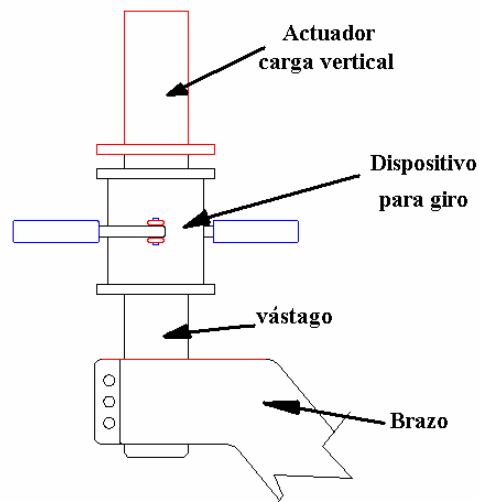


Figura 3.10 Actuador para carga vertical

Como se observa en la Figura 3.10, al introducir este dispositivo para el giro se reducen las ventajas que el arreglo pudiese proporcionar respecto a otras, debido a la cantidad de actuadores necesarios para realizar los movimientos. Esto conlleva a la eliminación de estructuras complementarias para la fijación y colocación de los cilindros para efectuar el giro direccional. Estos argumentos representan las bases para que el desarrollo de configuraciones factibles se orientara a los arreglos con marco de soporte, como la configuración mostrada en la Figura 3.8, con los diversos componentes presentados en las figuras 3.9 y 3.10.

3.3 Evaluación de Alternativas y Selección de Configuraciones Factibles

Buscando cumplir con la totalidad de los requisitos especificados en un principio, se generaron, de manera paralela diversas configuraciones, mediante la combinación de todos los conceptos anteriormente mencionados, las cuales combinan las mejores características funcionales. Con base en una valoración técnica de estas configuraciones y los mecanismos mostrados, se analizó la factibilidad de aplicación de las alternativas propuestas para el diseño del banco. Los resultados del análisis permitieron preseleccionar aquellos arreglos que presentan, bajo ciertos criterios, menores dificultades para una posible aplicación práctica de acuerdo a las ventajas y beneficios asociados. La selección consistió en conservar todas aquellas propuestas de configuración que pudieran ser de mayor utilidad y que cumplieran de una mejor manera los requerimientos previamente especificados. Entre las características consideradas están la funcionalidad, facilidad de operación, factibilidad de construcción, costo y, aunque no de manera detallada, la probable instrumentación que el banco requiere para el registro de datos.

Para producir el avance de la llanta y por tanto, su rotación, sobresale el uso de una banda, que proporciona continuidad del movimiento y la posibilidad de manejar diversas velocidades de prueba y rotación. Aunque implica un mecanismo complejo que puede representar un costo significativo, comparado con el empleo de un tambor rotatorio y con una placa deslizante, cumple con mayor precisión el requisito establecido.

Respecto a la aplicación de las cargas vertical y horizontal (desplazamiento lateral), así como la correspondiente al giro de dirección, resalta la utilización de cilindros de acción hidráulica. Estos cilindros permiten generar una carga uniforme, además de proporcionar un control sencillo y facilidad para la medición de la fuerza a través de la presión hidráulica. Este tipo de arreglo representa menores costos relativos de construcción, siendo de simple operación y mantenimiento, comparados con mecanismos que involucran otros tipos de accionamiento, como motores, engranes y cremalleras. Por otra parte, para la generación del giro de dirección, el sistema de vástago dentado presenta la ventaja de transmitir un par aplicado por dos cilindros hidráulicos accionados en sentidos opuestos.

El análisis para cada uno de los requisitos de carga y movimiento de la llanta, de las variantes correspondientes, se resume en la Tabla 3.1. En ella se muestran las características de los mecanismos tentativos, los cuales presentan mayores ventajas y con los que debe contar el diseño. Así, una representación general del diseño tendría un aspecto semejante al mostrado en la Figura 3.11.

Tabla 3.1 Resumen de características de las variantes consideradas.

Operación	Variantes	Ventaja principal	Desventaja principal	Factible
Rotación	Placa deslizante	Contacto plano	Longitud insuficiente No permite simular altas velocidades	No
	Cilindro rotatorio	Longitud infinita	Gran volumen y peso No hay contacto plano entre la superficie y la llanta Dificultad para el movimiento rotatorio	No
	Banda plana	Longitud "infinita" Continuidad de movimiento Posibilidad de desarrollar altas velocidades		Si
Carga vertical	Columna	Más robusta	Mayor momento sobre el brazo Dos cilindros para generar la carga Posibilidad de carga no uniforme	No
	Vástago	Un solo cilindro Carga uniforme Menor momento en el brazo		Si
Desplazamiento lateral	Piñón cremallera	Movimientos precisos	Mecanismo complejo Necesidad de mayor control	No
	Cilindro hidráulico	Presión uniforme Mayor facilidad de control Simplicidad de instrumento		Si
Giro de dirección	Cilindros simples	No requiere mecanismo complejo para el giro	Posibilidad de interferencia cinemática Cilindros más robustos Sopores anexos Un solo cilindro actúa a la vez	No
	Vástago dentado, cilindros opuestos (par de dirección)	Volumen pequeño No existe interferencia Posibilidad de uso simultáneo con los otros sistemas Los dos cilindros actúan al mismo tiempo		si

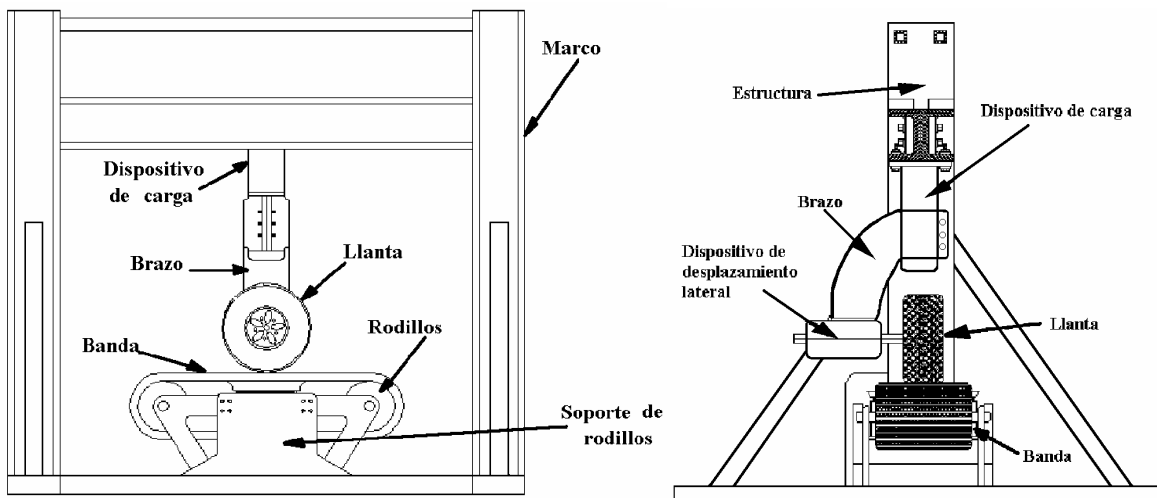


Figura 3.11 Vistas frontal y lateral (corte parcial) del banco genérico, con carga en el eje de giro del neumático, banda rotatoria y movimiento rotatorio sobre su propio eje.

El modelo seleccionado como el que se aprecia en la figura anterior resulta de la combinación de las configuraciones realizadas. Este arreglo cuenta con una banda de rodadura que simula una superficie continua de longitud “infinita” y un brazo transmisor a través del cual se transmite la carga a la llanta. Este brazo está sujeto al vástago que proporciona tanto el giro de dirección, como la carga vertical a la llanta. El dispositivo de accionamiento lateral, que transmite la carga a la flecha sobre la cual gira la llanta y sobre la cual se monta esta última, se encuentra localizado en la parte inferior del brazo curvo. Dicho brazo estará montado sobre una estructura que dará soporte a todo el conjunto. Estos detalles son semejantes a los que se aprecian, en la vista lateral del corte parcial mostrado en la Figura 3.11 (derecha).

Este tipo de configuración de marco, fue seleccionada debido a que presenta mayores ventajas sobre la configuración de columna. Entre las razones de selección se encuentran, la facilidad de fabricación, menos problemas en la sujeción del sistema de carga y el brazo, mostrando una menor dificultad de colocación de un dispositivo que genere el giro.

El criterio de selección para este nivel de diseño, se basó principalmente en la funcionalidad que presenta cada mecanismo, el costo y facilidad de construcción. Analizadas las diversas configuraciones preseleccionadas, se procedió a la extracción de una en particular para el detallado posterior. La configuración elegida pretende reunir, de manera conjunta, cada uno de los requisitos especificados para el diseño del banco, que cubra un mayor grupo de expectativas tanto presentes como futuras, tendientes a visualizar etapas posteriores de instrumentación y automatización del banco.

Teniendo ya la selección de la configuración, el siguiente paso es realizar el diseño a mayor detalle del banco, definiendo y generando la concepción específica de cada sistema principal, buscando mantener la armonía y funcionalidad del conjunto, así como la consideración de la posible instrumentación.

4 Propuesta de banco de pruebas

En este capítulo se presenta la propuesta del banco de pruebas, basada en los componentes anteriormente discutidos, incluyendo las características generales de los principales conjuntos. También, se detalla la compatibilidad funcional de esos componentes y de los aspectos móviles de la operación. Así mismo, se presentan los esquemas generales de los conjuntos, sus principales elementos y los materiales sugeridos a primera instancia, con algunos ejemplos simples de cálculo de esfuerzos. Complementariamente se indican algunas recomendaciones para llevar a cabo una posible instrumentación y otras aplicaciones posibles para el banco.

4.1 Descripción general

Operativamente, el banco propuesto se organiza en 3 conjuntos o sistemas básicos. El primer sistema comprende el conjunto de elementos que proporcionan el soporte estructural; el segundo lo constituyen los elementos necesarios para sujetar la llanta, aplicar las fuerzas de contacto de la llanta contra el piso (carga vertical), la fuerza lateral, el par de alineamiento direccional y los movimientos asociados a estas cargas, mientras que el tercer sistema corresponde al conjunto de elementos y mecanismos que conforman la superficie de rodamiento para la llanta y para producir su movimiento de rotación, simulando el movimiento de avance. Estos sistemas se muestran en el esquema de la configuración general, en la Figura 4.1.

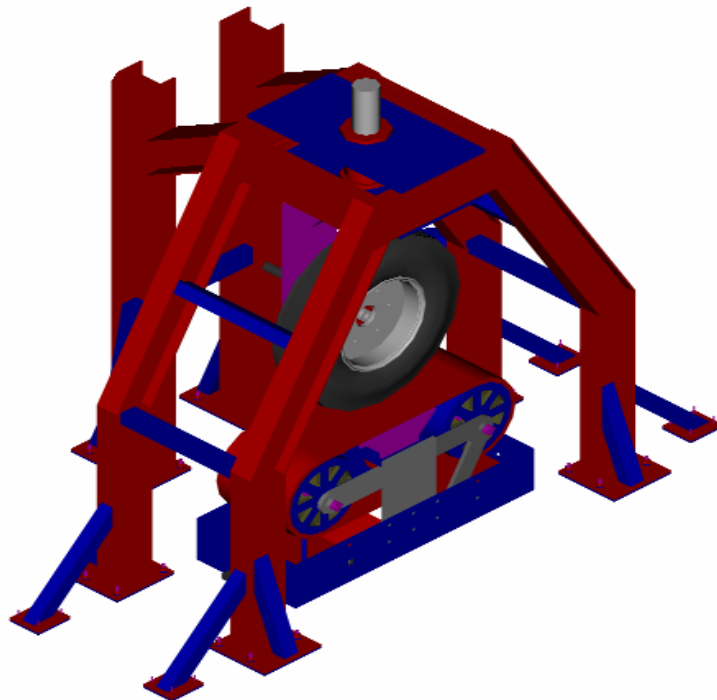


Figura 4.1 Conjunto general del banco.

En las siguientes secciones se describe a mayor detalle cada uno de estos sistemas.

4.1.1 Sistema 1. Marco estructural

El sistema que conforma la estructura de soporte y base principal de apoyo de los distintos elementos del banco, es el marco estructural, el cual está constituido por elementos estructurales, en su mayoría unidos entre sí mediante soldadura. Este marco se apoya sobre una estructura de cimentación, a la cual se fija mediante elementos roscados anclados al piso de dicha cimentación.

Considerando aspectos de resistencia y de reducción de flexión de los elementos superiores debida a las fuerzas de reacción de los elementos estructurales bajo la aplicación de carga vertical a la llanta, se propone una forma trapezoidal, como se muestra en la Figura 4.2. Esta forma brinda al banco la capacidad de montar llantas de hasta 1200 mm de diámetro, disminuyendo además el claro entre los soportes laterales de la cúspide.

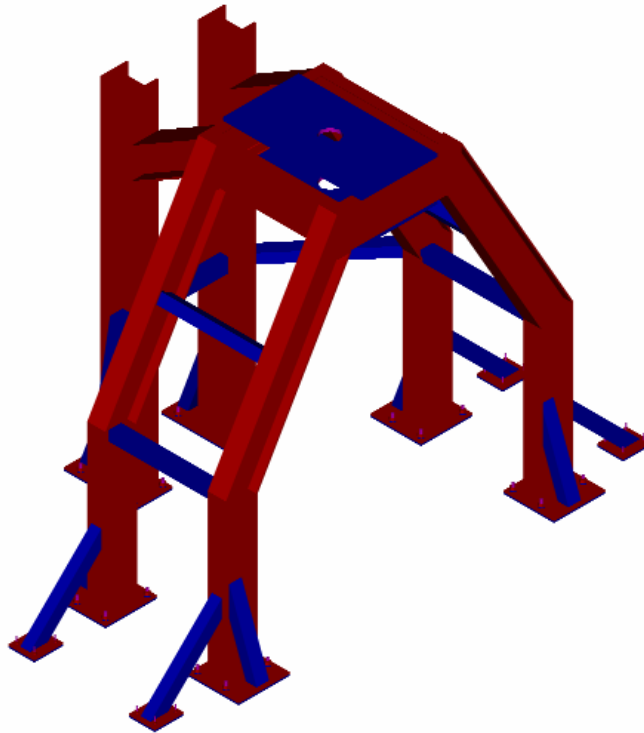


Figura 4.2 Estructura del banco.

En la parte superior se forma un marco para alojar el eje dentado del sistema de aplicación de carga vertical y giro direccional de la llanta. Este alojamiento o marco orientado horizontalmente, se forma con cuatro secciones de perfil estructural tipo “C”, con placas en la parte superior e inferior del alojamiento.

La estructura se sostiene por seis soportes de perfil estructural tipo “I”, conectados entre sí por medio de vigas PTR que favorecen la rigidez del conjunto. Para el apoyo al piso, los soportes terminan en placas soldadas, fijándose a través de tornillos anclados a la cimentación, con una capa de neopreno entre placas y piso para aislar y disminuir la transmisión de vibraciones a través de la estructura. Adicionalmente, el apoyo de estos soportes se refuerza con elementos inclinados que se fijan a los soportes y al piso.

4.1.2 Sistema 2. Soporte y carga de la llanta

El segundo sistema corresponde al soporte de la llanta de prueba y de aplicación de la carga a la misma. Los componentes de este conjunto son elementos que sostienen la llanta y producen los movimientos para presionar la llanta contra el piso, para contrarrestar el desplazamiento lateral y para orientarla de acuerdo a la dirección de viaje supuesta. Estos elementos pueden observarse en la Figura 4.3.

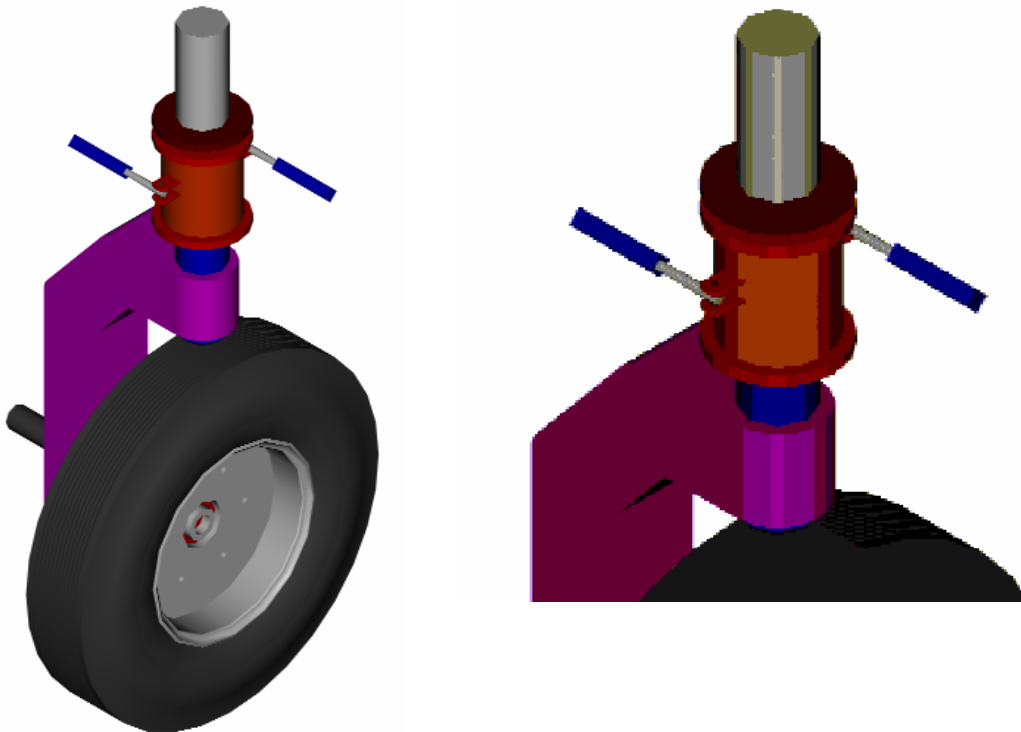


Figura 4.3 Sistema de brazo transmisor y aplicación de cargas.

La carga vertical y el giro direccional son producidos por un sistema que consta de un pistón hidráulico, unido a un eje (vástago) dentado, colocado dentro de una funda a la cual engrana formando un sistema de piñón-corona. El vástago tiene libertad de desplazamiento lineal en dirección vertical, correspondiente a la aplicación de la carga. La funda se encuentra confinada dentro de la cavidad formada por las dos placas superiores de la estructura, restringiendo su desplazamiento vertical, pero con libertad de rotar de manera conjunta con el eje

(vástago dentado) gracias al acoplamiento engrane-corona (eje-funda, respectivamente).

La rotación de la funda se logra por la aplicación de un par producido por el empuje de dos cilindros hidráulicos acoplados a sus costados, colocados en direcciones opuestas en un plano horizontal en la parte media de la funda. Así, al rotar la funda, ésta arrastra al eje por medio del acoplamiento de engrane (Figura 4.4).

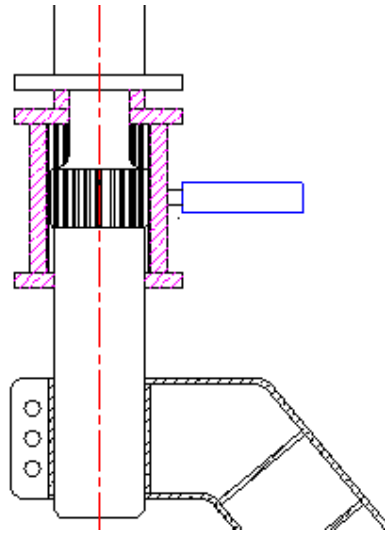


Figura 4.4 Acoplamiento engrane-corona para producir rotación y desplazamiento (corte).

El brazo transmisor, sujeto al eje que aplica la carga, transmite al eje de rotación de la llanta de prueba la fuerza generada por el pistón vertical. El eje sobre el que gira la llanta se aloja en la parte inferior del brazo, teniendo libertad de desplazarse horizontalmente y de aplicar o soportar la carga lateral generada por la deformación transversal de la llanta (Figura 4.5).

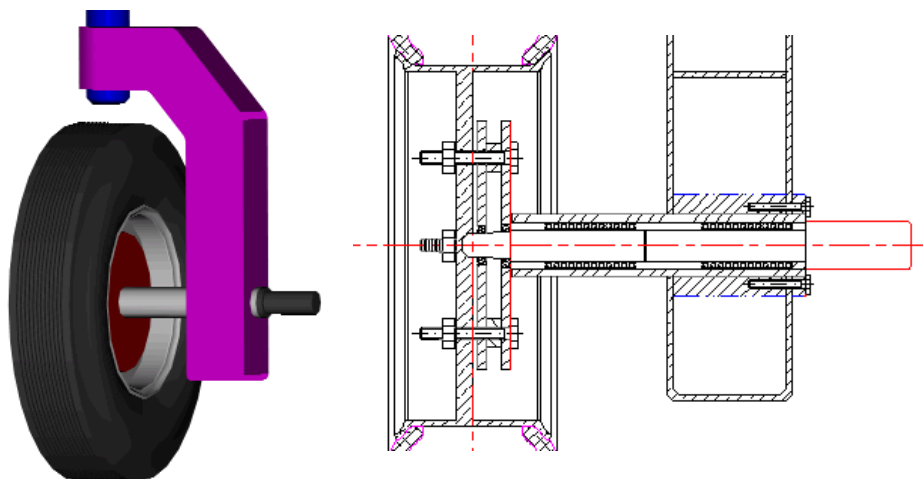


Figura 4.5 Sistema de brazo transmisor, sujeción de la llanta y aplicación de carga lateral.

Tanto el movimiento como la carga lateral son debidos a un accionador tipo cilindro hidráulico que empuja o retrae el mecanismo y eje sobre el cual gira la llanta. Sobre el extremo libre de este eje se sujeta el dispositivo que da soporte al conjunto de rin y llanta, permitiendo la rotación de la llanta.

4.1.3 Sistema 3. Sistema de rodamiento

Brindar tanto la superficie de apoyo como la generación de la rotación de la llanta por fricción, son parte de la función del tercer conjunto. Este conjunto consta de dos rodillos sobre los cuales se encuentra montada una banda flexible que, al girar, transmite el movimiento de traslación a la zona de contacto plana de la llanta con la banda, produciendo su rotación alrededor del eje horizontal. Los dos rodillos se encuentran montados sobre una estructura que le brinda soporte y estabilidad, conformando una unidad, como se muestra en la Figura 4.6.

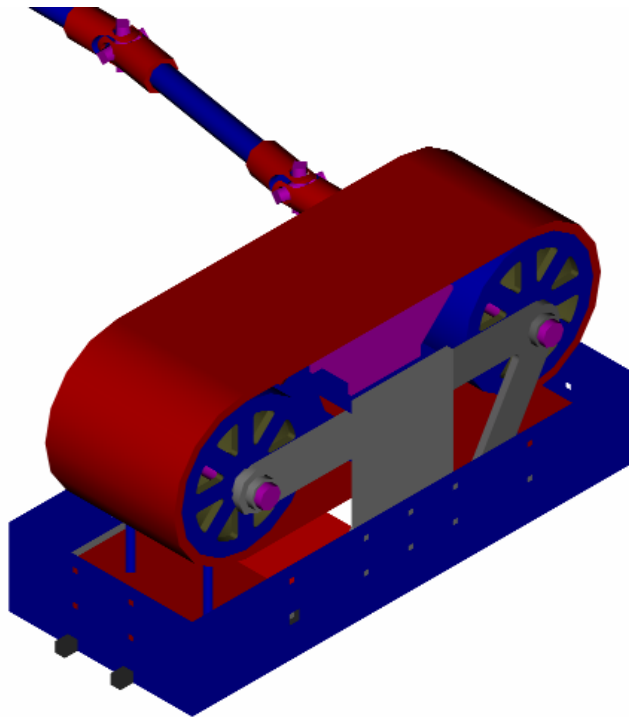


Figura 4.6 Base soporte de los rodillos para la banda.

Para proporcionar el movimiento de desplazamiento de la banda, uno de los cilindros es accionado a través de un motor externo (hidráulico o eléctrico) con velocidad controlada, que produce su rotación. Los dos brazos horizontales rectos sobre los que se apoya uno de los rodillos, poseen la libertad de poder desplazarse axialmente, lo que facilita el montaje y el tensado de la banda. El ajuste principal de la tensión se realiza a través del sistema que soporta el rodillo opuesto, compuesto de un mecanismo que empuja el eje del rodillo, con independencia en cada lado del mismo para compensar posibles diferencias en la tensión de la banda en sus costados.

Para proporcionar una superficie plana de apoyo a la llanta, se ubica bajo la banda, en la zona de contacto con el neumático, una placa que soporta la fuerza de contacto de la llanta con el piso. El ensamble de rodillos y banda son soportados por un sistema de elevación, compuesto por 4 barras roscadas, que permiten ubicar la mesa de acuerdo al diámetro de la llanta de prueba, eliminando de esta manera la necesidad de producir grandes carreras con el mecanismo de descenso y aplicación de carga vertical en el brazo transmisor. Esto proporciona al banco, a su vez, la versatilidad de admitir llantas de diferentes diámetros. La altura prefijada, según las dimensiones de la llanta de prueba, se mantiene a través de bloques que soportan todo el conjunto, colocados alrededor de la base del ensamble, liberando de la carga a los tornillos. Dichos bloques descansan sobre cuatro placas laterales que además forman un marco que restringe el movimiento lateral del conjunto de la banda y rodillos.

4.1.4 Cimentación

Dadas las características físicas de los componentes, de la estructura de soporte y de las capacidades de carga del banco, es preciso que para la ubicación del banco se disponga de un lugar apropiado con la infraestructura de soporte necesaria. Tanto para soportarlo rígidamente como para tener un aislamiento mecánico con el resto del entorno, es necesario contar con una base de cimentación. Dadas las características requeridas, la cimentación debe considerar al menos soportar 100 kN estimados, con una capa de arena por debajo de la losa de cimentación, con dimensiones acordes a las del banco. En la Figura 4.7 se esquematiza el armado utilizado para reforzar la cimentación. Adicionalmente para evitar hundimientos diferenciales de la losa, se colocan dos capas de tepetate compactado, de 400mm de espesor, lo cual proporciona una superficie más uniforme y estable para el desplante de la losa (apoyo de cálculos de Ingeniería Civil).

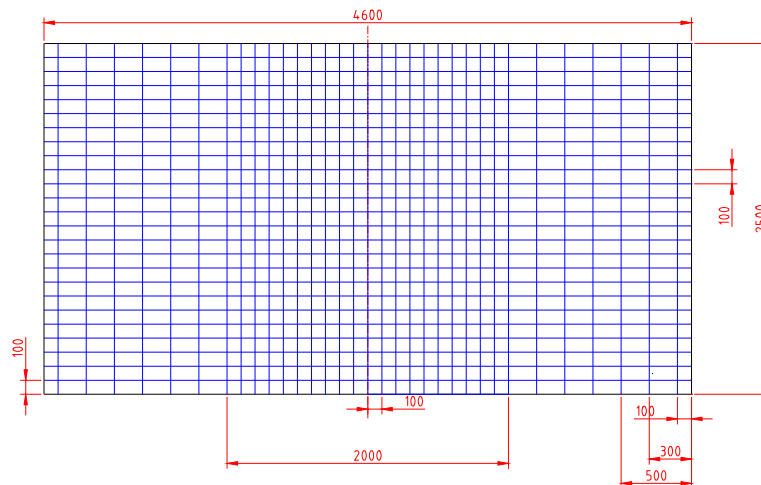


Figura 4.7 Armado de la cimentación.

El armado consta de 57 varillas colocadas en un arreglo de cuadrícula, como se aprecia en la Figura 4.7, con mayor concentración de acero de refuerzo en el centro, correspondiente a la zona donde se encuentra el sistema de banda y con mayores concentraciones de carga.

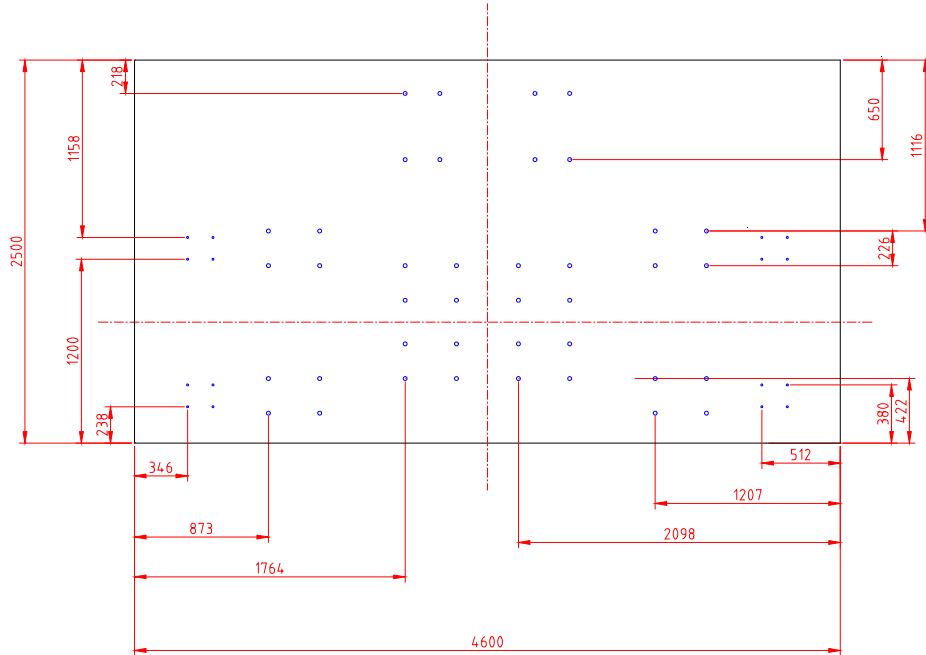


Figura 4.8 Localización de las anclas.

La Figura 4.8 muestra la localización de los elementos de anclaje del banco a la cimentación. Estos elementos son barras roscadas unidas a través de soldadura al armado de varillas metálicas de la cimentación. Su ubicación corresponde a la localización de las placas que unirán a la estructura y el sistema de banda. Para mayor detalle consultar el anexo.

4.1.5 Materiales principales

Dentro del proceso de diseño, la adecuada selección de materiales representa una etapa importante, ya que involucra relaciones combinadas entre la geometría, la función, la exposición, la operación y el tipo de material. Esta permite que exista una variedad de combinaciones entre las cuales se pueda ubicar la que proporcione las mayores ventajas para los aspectos considerados. Aunque especificaciones precisas se requerirían en diseños con alto grado de detalle, en el diseño conceptual se requiere de una selección preliminar de los posibles materiales con los cuales pudieran fabricarse los componentes principales. Esto permite contar con una base de referencia para mejoras posteriores, tanto de la geometría como de las características mecánicas deseadas, incluso de modificaciones funcionales del elemento específico.

De esta manera, se sugieren materiales que muestran factibilidad para la fabricación de los componentes principales del banco. Para la estructura de soporte (marco) se propone el uso de perfiles estructurales de acero del tipo “I”, “C” y “PTR”. Estos elementos presentan características que combinan la resistencia mecánica del material con una distribución de esfuerzos debida a la forma, lo cual puede resultar mecánicamente ventajoso, aligerando el peso y disminuyendo el costo. Otro aspecto importante de este tipo de elementos estructurales es su amplio uso comercial, facilidad de adquisición y costo moderado.

Para facilitar su fabricación y ensamble, el brazo transmisor se sugiere sea compuesto por placas de acero, adoptando la forma de una estructura reticular a manera de cajón, que permite aprovechar el volumen del material y disminuir el peso sin decremento significativo de la resistencia del elemento. Los espacios generados permiten la ubicación de los diversos actuadores en la parte interna del brazo, los cuales se fijan a su estructura y a los elementos a los cuales proporcionarán movimiento.

En los actuadores y soporte para la llanta (flecha), se sugiere la utilización de un acero con buena resistencia a la fatiga y al desgaste, como serían los AISI 4340, 8620, 9840, 1045 ó 1060, ya que, debido a su condición de movilidad, estos elementos estarán sujetos a cargas repetitivas, alternantes y de contacto.

Para el sistema de rodamiento, aprovechando la versatilidad del acero, la estructura de soporte puede ser fabricada con placas de este material con bajo carbono, como el 1018, las cuales están ubicadas de manera que su orientación promueve que el conjunto tenga una mejor resistencia a las cargas de trabajo. Un tubo de acero de espesor reducido pero gran diámetro, es sugerido para fabricar los rodillos, mientras que la banda debe ser una combinación de un material flexible y resistente, como neopreno, reforzado con una malla de fibras metálicas, para que presente una mayor resistencia a la tracción pero flexibilidad en la deformación adaptable a la forma del rodillo.

Para el soporte del banco, la cimentación se constituye con una matriz de concreto hidráulico reforzado con varillas de acero, las cuales conforman el armado. Con base en la construcción de obras civiles, el acero de refuerzo promueve la resistencia a la flexión del concreto, mientras que el soporte y amortiguamiento lo brinda el concreto mismo, gracias a su rigidez y masa para resistir las cargas y las vibraciones generadas. Para los anclajes se sugiere la utilización de barras roscadas de acero unidas al armado de la cimentación, proporcionando así una mejor unión entre esta última y la estructura del conjunto.

Debido a las características complejas que requeriría un diseño de detalle, únicamente se han sugerido materiales con características generales. Mayores especificaciones de esos materiales, así como para elementos específicos, resultarán del análisis preciso de cada uno de los sistemas y sus elementos.

4.2 Compatibilidad funcional (accionamientos e interferencias)

Para incrementar la certidumbre del funcionamiento del banco en su conjunto, se realizó una verificación general con el propósito de confirmar el cumplimiento de las características impuestas para su desempeño. Esta consistió en revisar que no existiese interferencia alguna entre las parte móviles (accionamiento) durante la operación del banco. Lo anterior implica que cada uno de los movimientos muestre independencia y pueda ser realizado de manera simultánea con el movimiento de otros miembros. Tal es el caso del brazo transmisor, que debe ejecutar movimientos de desplazamiento vertical y de rotación, como se observa en la Figura 4.9.

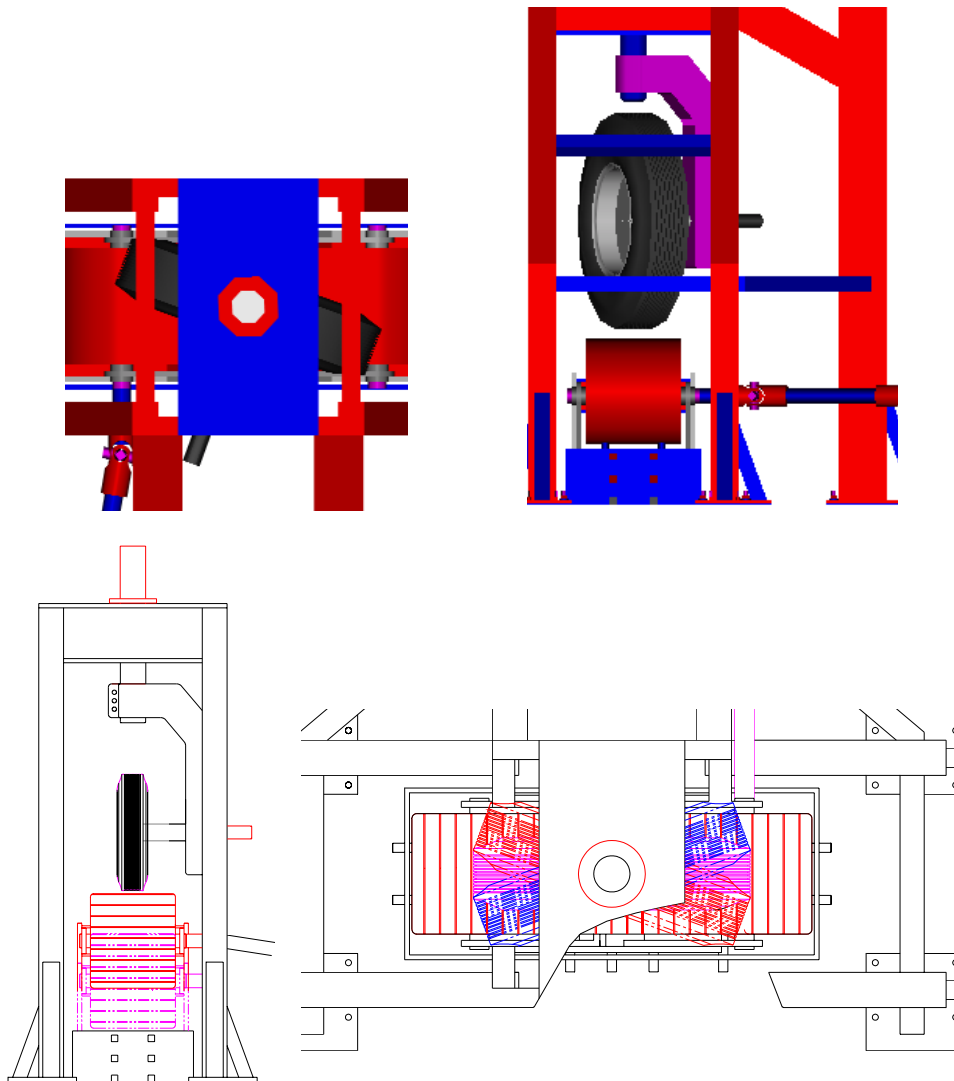


Figura. 4.9 Verificación de no-interferencia entre componentes, admisión de tamaño de llanta

En la misma figura se aprecia que las dimensiones de la estructura presentan, en primera instancia, compatibilidad para albergar los demás componentes, así como de las llantas a ser probadas. Además, el proceso de verificación incluye el movimiento adecuado de los componentes individuales, evitando y delimitando las posiciones de interferencia entre partes fijas y móviles.

4.3 Dimensiones Generales

Considerando los requisitos de operación y la funcionalidad del banco, cuyas capacidades en la aplicación de diversas medidas de neumáticos van desde llantas empleadas en vehículos ligeros (llantas pequeñas de aproximadamente $\phi 580$ mm) hasta llantas para vehículos pesados (llantas de hasta $\phi 1100$ mm), magnitudes de desplazamiento y deformaciones máximas esperadas, se obtuvieron las dimensiones globales. De esta manera, se realizaron los esquemas y dibujos generales del banco de acuerdo a las dimensiones propuestas. Posteriormente, se realizaron algunos cálculos para la verificación de la geometría con relación a las cargas y deformaciones supuestas.

4.3.1 Banco global

Uno de los aspectos importantes en el proceso de diseño, es la elaboración de esquemas y dibujos técnicos que permitan una mejor comprensión y visualización del proyecto. Dada la complejidad y el número de elementos que componen el banco, en este apartado se muestran algunos de los detalles de mayor relevancia, esencialmente los referentes a los componentes principales que conforman el conjunto. Estas representaciones se ejemplifican con una serie de componentes que, de acuerdo a su papel, forma y dimensiones, se consideran los más importantes en la estructura del banco.

De acuerdo a esta propuesta, en la Figura 4.10 se muestra la configuración general del conjunto, en la que se aprecian la mayor parte de los elementos que conforman al banco y la ubicación final de cada subsistema. Como se indica en la figura, la llanta (5) es soportada por la flecha (4), que puede rotar, gracias al giro de la banda (6) la cual está montada sobre los rodillos (12), uno de los cuales está directamente acoplado a un motor para proporcionar el movimiento. Los rodillos están soportados por los brazos (11), uno de los cuales tiene libertad de desplazarse longitudinalmente para ajustar la tensión de la banda.

El conjunto de banda y rodillos tiene libertad de movimiento en dirección vertical con tres posiciones, que se fijan con bloques sobre el retén (7), el cual restringe además el movimiento lateral y longitudinal del conjunto de banda y rodillos. La banda es ajustada mediante el mecanismo (13) que recorre uno de los rodillos, aflojando o tensando a la banda según se requiera.

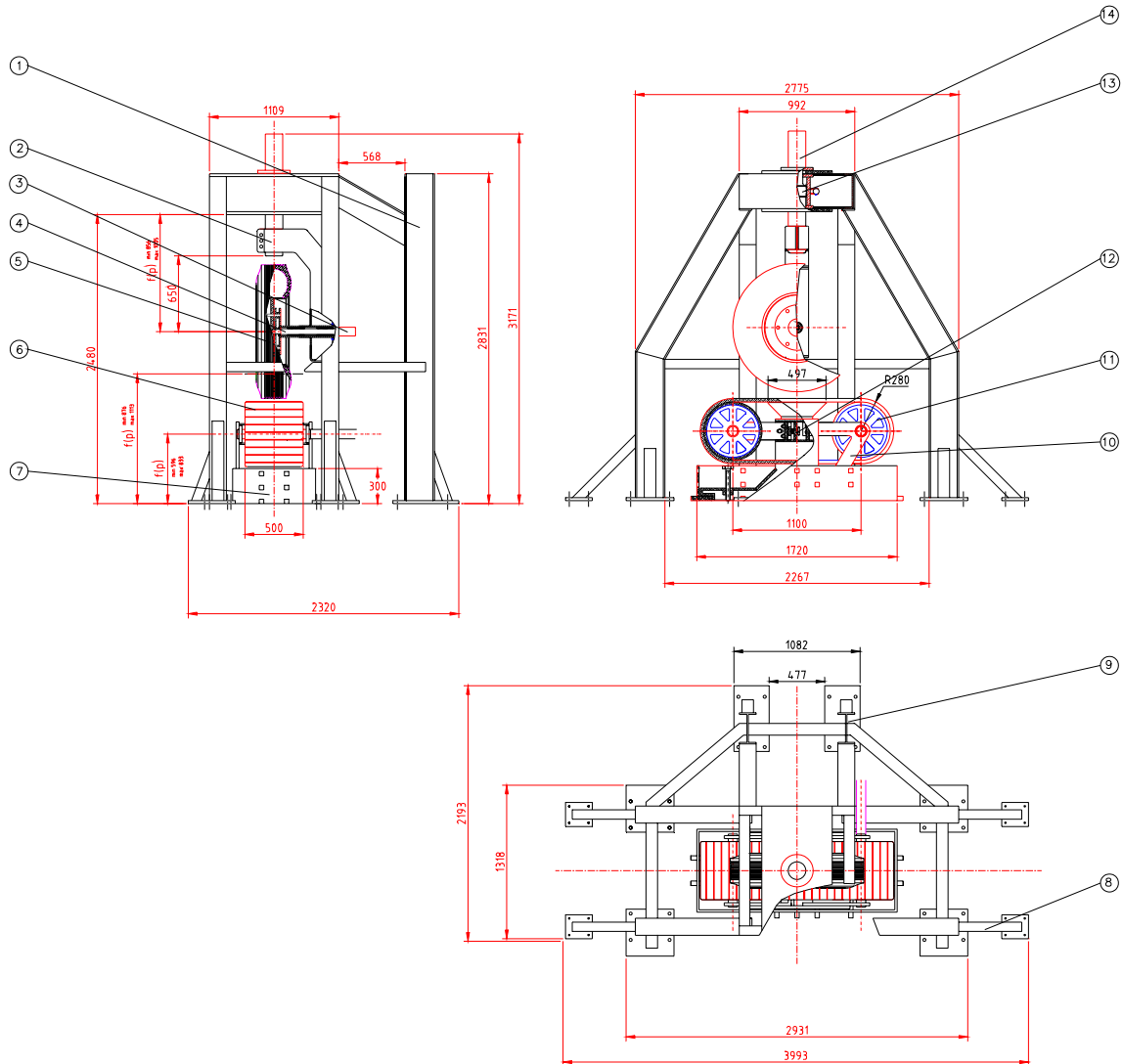


Figura 4.10 Conjunto general del banco.

Todo el conjunto es soportado por el marco (1), que en su parte superior aloja el mecanismo (14), encargado del ascenso, descenso y giro direccional del brazo (2). Sobre este brazo se ubica la flecha y los elementos de montaje de la llanta. El pistón (14), colocado en la parte superior del marco y conectado al mecanismo (13), cuyo vástago tiene libertad de desplazamiento longitudinal y de rotación sobre su propio eje, proporciona el empuje para producir la carga vertical requerida. El desplazamiento y carga lateral de la llanta se controla por medio del pistón (3), montado en la parte posterior del brazo y conectado al eje de la llanta. Para proporcionar mayor rigidez a la estructura se cuenta con soportes posteriores (9). Mayor detalle de los elementos se muestra en el anexo.

4.3.2 Sistema 1

El primer conjunto del banco corresponde a la estructura de soporte, mostrada en la Figura 4.11. Esta estructura, encargada del soporte del banco, se fija a la cimentación por medio de tornillos y tuercas. Los principales elementos que la componen tienen de base perfiles estructurales de acero, unidos entre sí mediante soldadura.

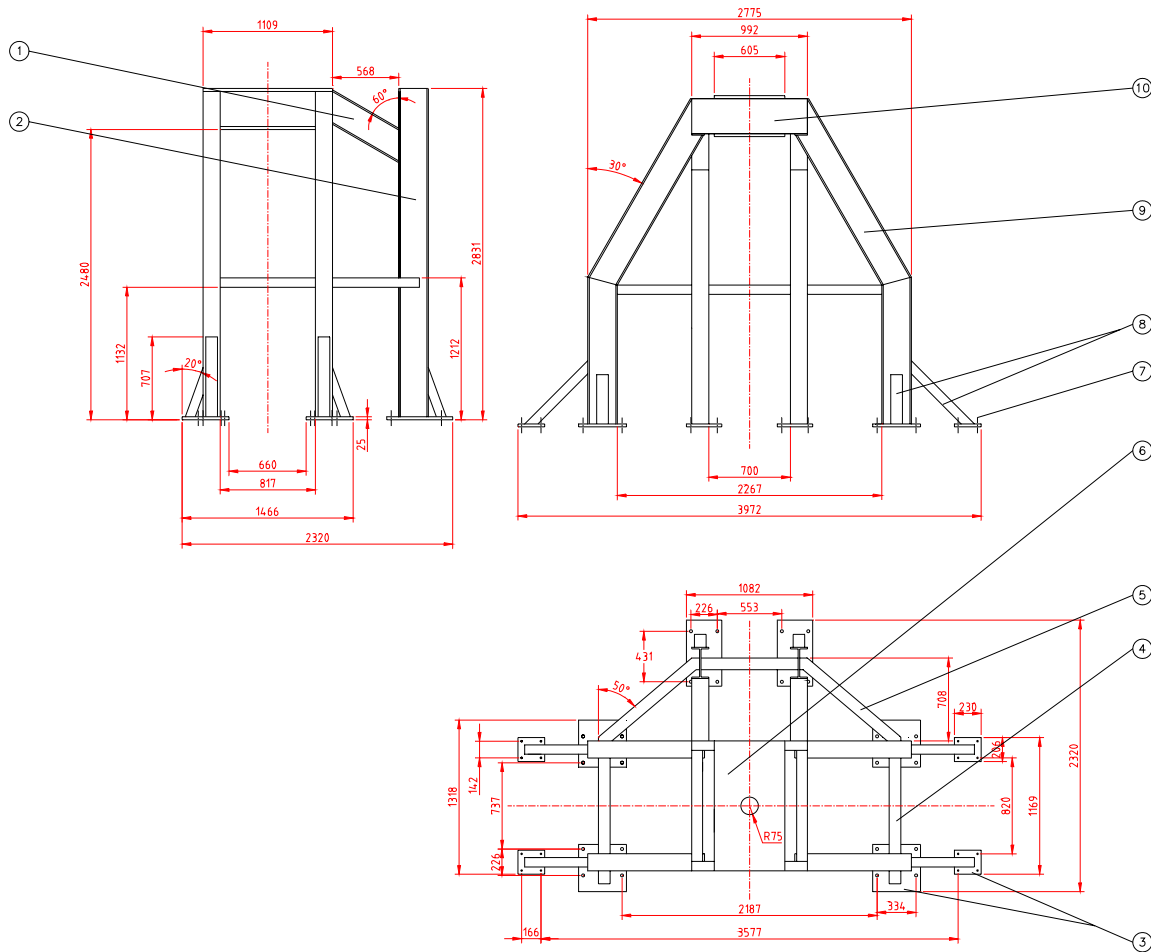


Figura 4.11 Estructura de soporte.

El marco principal consta de cuatro soportes (9), formados por dos piezas de idéntica sección transversal tipo **I**, soldadas una a la otra a un ángulo de 150° entre ellas. Estas “columnas angulares” proporcionan el soporte a un marco cuadrado en la cavidad superior (10) compuesta por el acomodo de 4 perfiles tipo **C**, que cuenta en su base y tapa con placas (6), que permiten acoplar y restringir el movimiento de los sistemas de carga y giro.

Los cuatro soportes angulados (9), conectados estructuralmente uno al otro por barras de **PTR** (4), se fijan a la cimentación por medio de placas (3) soldadas en

sus bases con agujeros para su acoplamiento mediante barras roscadas (7), unidas al armado de la cimentación.

Para brindar soporte en la parte posterior, dada la ubicación del resto de los elementos del banco, la estructura cuenta con dos “columnas” adicionales (2) de sección tipo I, unidas a las columnas angulares (9) mediante elementos (1) del mismo tipo en su parte superior y tipo **PTR** (5) en su parte media. Las columnas, a su vez, cuentan con elementos inclinados tipo **PTR** (8), que les proporcionan mayor rigidez y estabilidad vertical. Mayor detalle de esta estructura principal de soporte se muestra en el anexo.

4.3.3 Sistema 2

El sistema, mostrado en la Figura 4.12, está constituido por el bazo transmisor, el soporte de la llanta, los sistemas de giro, tanto el direccional como el de rotación de la llanta sobre su propio eje y el de desplazamiento o empuje lateral sobre la llanta. Como se aprecia en la figura, el sistema de carga y giro está constituido por el pistón (9), al cual se encuentra unido el vástago (8), el cual tiene la libertad de trasladarse linealmente en dirección vertical. Al desplazarse linealmente los pistones laterales (7), colocados excéntricamente, producen un momento sobre la funda (1), que engrana sobre el vástago (8), produciéndose así el par en la dirección requerida o contrarrestando reactivamente el par generado por el empuje lateral durante el proceso de prueba.

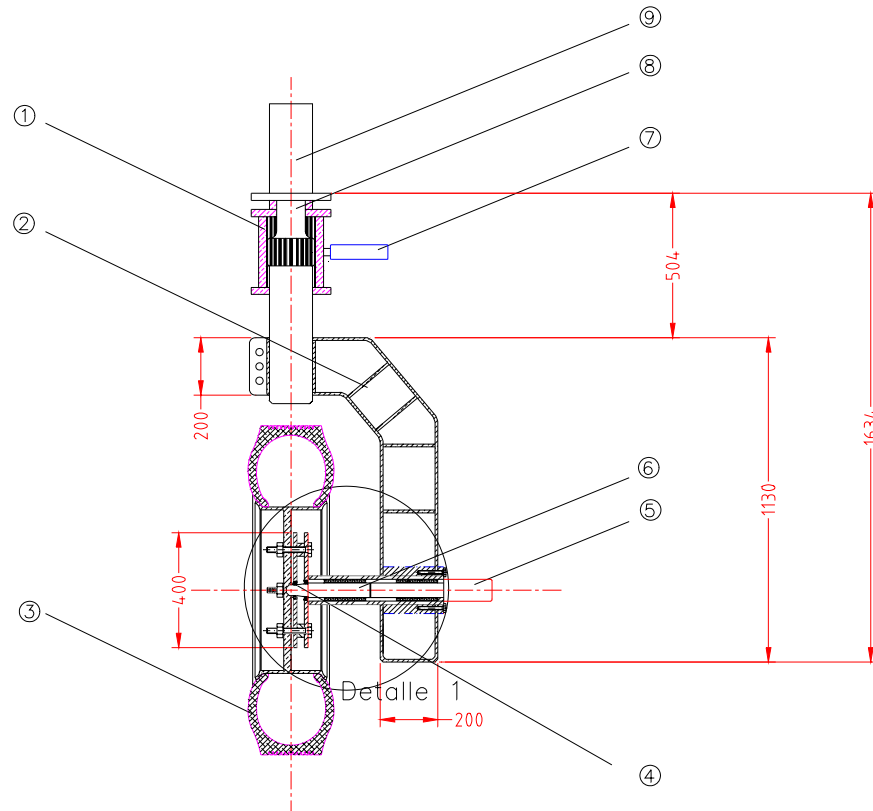


Figura 4.12 Corte lateral del sistema de aplicación de la carga y brazo transmisor.

El brazo (2) está formado por el arreglo soldado de placas planas de acero; éstas generan una retícula en su parte interna para dar mayor rigidez con espesores de placa reducidos. Dicha retícula permite albergar tanto al vástago superior (9) como a la flecha (6), ubicada en la parte inferior del brazo. Sobre el extremo libre de dicha flecha, se encuentra colocado el soporte (4) sobre el cual se fija el rin con la llanta de prueba. En el extremo opuesto de la flecha (6) se conecta al vástago del cilindro hidráulico (5), encargado de producir el desplazamiento lateral de la llanta, apoyándose en la estructura del brazo.

Un mayor acercamiento de los mecanismos de aplicación del par para producir el giro direccional y la carga vertical a la llanta, se muestra en la Figura 4.13. El esquema muestra las características geométricas referentes al pistón de carga vertical, ejemplificando el dispositivo de giro con el acoplamiento al pistón.

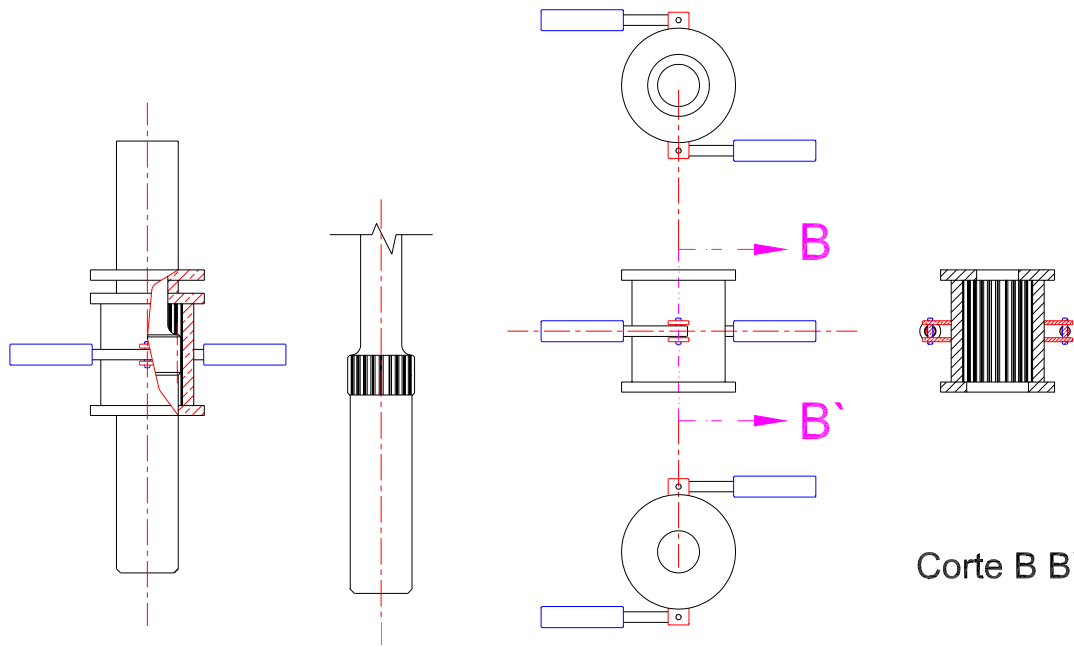


Figura 4.13 Detalle de los mecanismos de aplicación de carga vertical y de giro direccional. De izquierda a derecha: Conjunto de sistema de carga y giro, vástago de carga y giro funda de engranaje para giro con pistones para la rotación, corte de funda de engranaje

En la Figura 4.14 se presenta mayor detalle del mecanismo de acoplamiento entre el brazo de soporte y el rin de la llanta de prueba. De la figura se puede observar la flecha (4), que proporcionara el empuje lateral, el sistema de sujeción del soporte (2) y el rin de prueba (1), así cómo los tornillos sujetadores del soporte y rin (6). Sobre la flecha se indica el tipo de rodamientos, (3), que permiten que la flecha (4) deslice longitudinalmente sobre su funda (5). En el anexo se muestran estos componentes con mayor detalle.

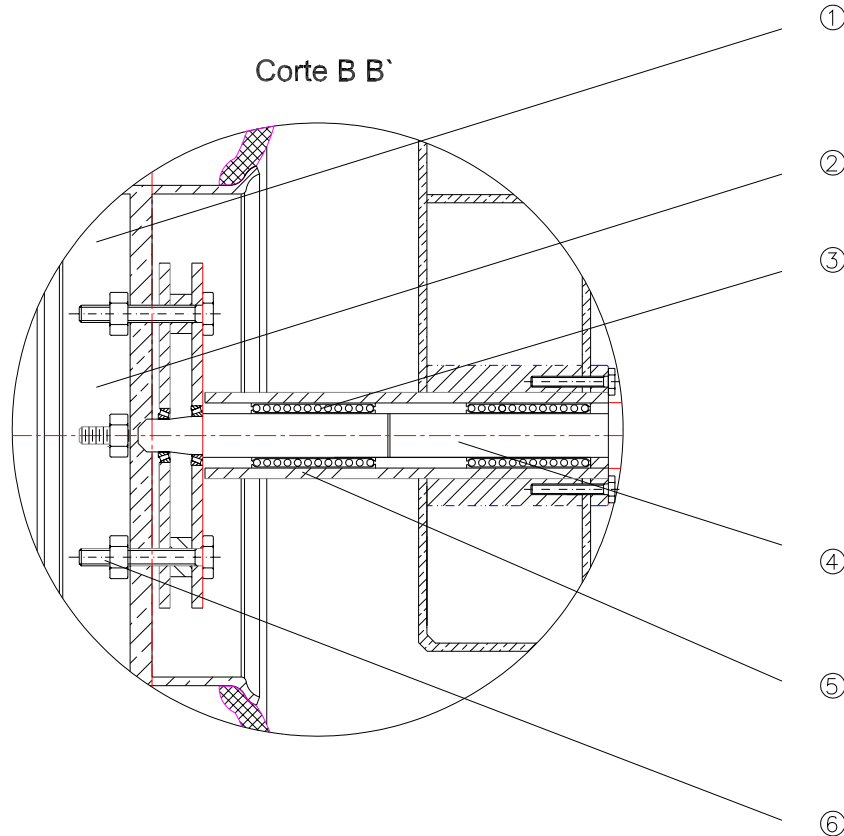


Figura 4.14 Detalle del acoplamiento de la llanta y actuador de empuje lateral.

4.3.4 Sistema 3

El sistema 3 está constituido por la banda y los rodillos, constituyendo la primera superficie de rodamiento de la llanta, y los segundos los generadores del desplazamiento de la banda, transmitiendo el movimiento de rotación a la llanta. Este sistema proporciona también los mecanismos para elevar el conjunto de banda y rodillos, lo que permite admitir diferentes diámetros de neumáticos.

La descripción del sistema se muestra en la Figura 4.15. Los rodillos (3) dan soporte a la banda (1) y le proporcionan la tracción necesaria para su movimiento de desplazamiento longitudinal. Los rodillos están montados sobre los brazos (2) y (9), los cuales les dan el soporte necesario. Estos se encuentran montados sobre la estructura lateral (10) conformada por placas planas. Los brazos rectos (2) tienen libertad de movimiento longitudinal, que permite el ajuste de la banda mediante el sistema de tensión (7). Ubicada por debajo de la banda se encuentra la base plana (11), la cual proporciona una superficie rígida plana en la zona de contacto con la llanta.



Lo anterior ha ilustrado los sistemas principales del diseño propuesto, mostrando los componentes principales y la geometría general, esbozando, a la vez, la funcionalidad del mismo.

4.4 Ejemplo de cálculo de componentes

Como parte complementaria del diseño, es necesario verificar la resistencia mecánica de los componentes. Aunque el cálculo de tal resistencia para todos los elementos del banco no está dentro del alcance de este proyecto, con el propósito de esquematizar uno de los métodos que pudieran aplicarse para su estimación, se presenta el análisis de un componente. Por tanto, se presenta parte del proceso del análisis estructural del brazo transmisor, elemento principal del sistema de carga y soporte de la llanta. De acuerdo a sus funciones, se considera que este elemento estará sujeto a las mayores cargas dentro del conjunto, transmitiendo el movimiento y la carga al neumático de prueba. Por tanto, es importante estimar la magnitud y localización de los esfuerzos y deformaciones que experimenta, criterios que pueden ser utilizados para posibles modificaciones en la geometría o el material propuestos.

Para el análisis se utilizó una herramienta computacional aplicando el método de elementos finitos (FEM), proporcionando información valiosa para la especificación de espesores y longitudes recomendables de una manera general. Los resultados permiten confirmar que las dimensiones y espesores propuestos fuesen adecuados para resistir los esfuerzos teóricos esperados. Dentro del proceso de análisis, se hizo uso de un programa comercial de elementos finitos.

Como base para la modelación, se partió de la geometría mostrada en la Figura 4.17, obtenida a través de un programa de CAD. En la figura se muestra el volumen principal de la estructura del brazo de soporte.

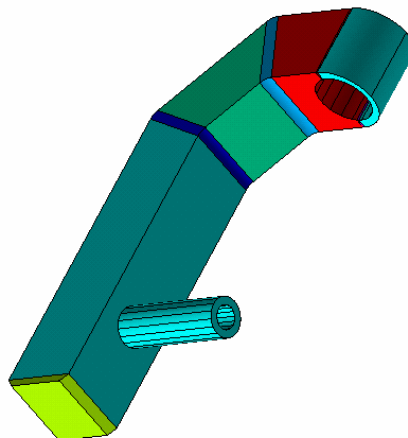


Figura 4.17 Volumen de referencia para el brazo de soporte.

La siguiente etapa en la modelación, consistió en la discretización de los volúmenes y en la generación de los elementos finitos tipo “sólido tetraédrico

isoparámetro (20 nodos 3 grados de libertad por nodo)", resultando una malla como la mostrada en la Figura 4.18.

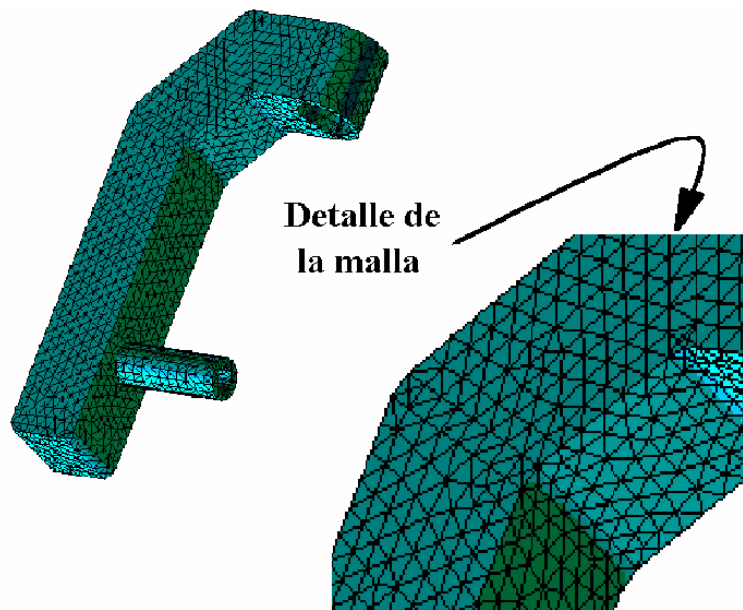


Figura 4.18 Detalle del brazo mallado.

Una vez generada la malla de elementos sobre los volúmenes base del brazo, se procedió a indicar las restricciones de movimiento y localización de aplicación de las cargas. Las restricciones consistieron en desplazamientos nulos de los nodos en la parte superior, zona donde se acopla con el pistón que aplica la carga vertical, mientras que las cargas se aplicaron en el eje de soporte, como se indica en la Figura 4.19.

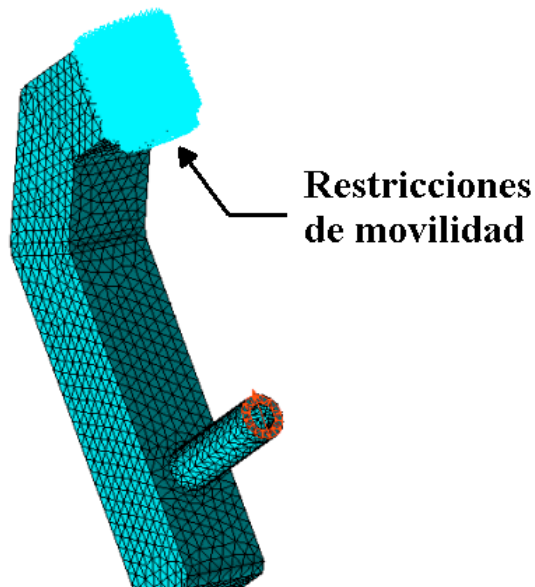


Figura 4.19 Modelo mallado y aplicación de las restricciones de movilidad.

Los valores de carga se estimaron en 4 kN, como requerimiento de diseño, y con una presión horizontal de 1000 N/mm^2 , por efecto del empuje del cilindro y de la llanta lateralmente. En concordancia con el material de apoyo, se utilizaron las propiedades mecánicas del acero, utilizando un módulo de elasticidad de 200 GPa, y Poisson de 0,29.

Como se mencionó anteriormente, se realizó un análisis estructural lineal, dando como resultado el soporte deformado mostrado en la Figura 4.20, con los desplazamientos como se indican en la Figura 4.21, presentándose los valores máximos de desplazamiento en la Tabla 4.1.

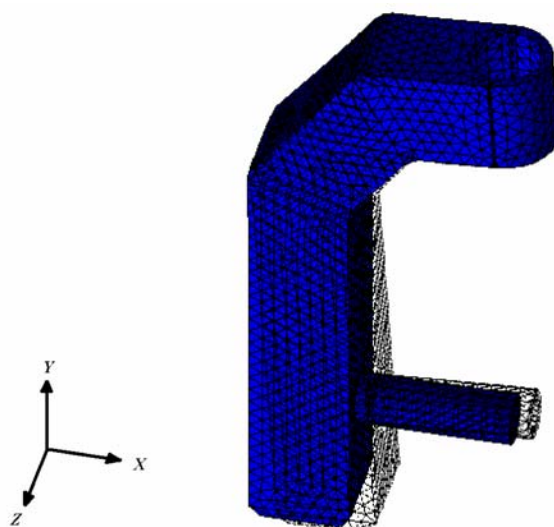


Figura 4.20 Deformación producida por las cargas aplicadas en el modelo del brazo de soporte.

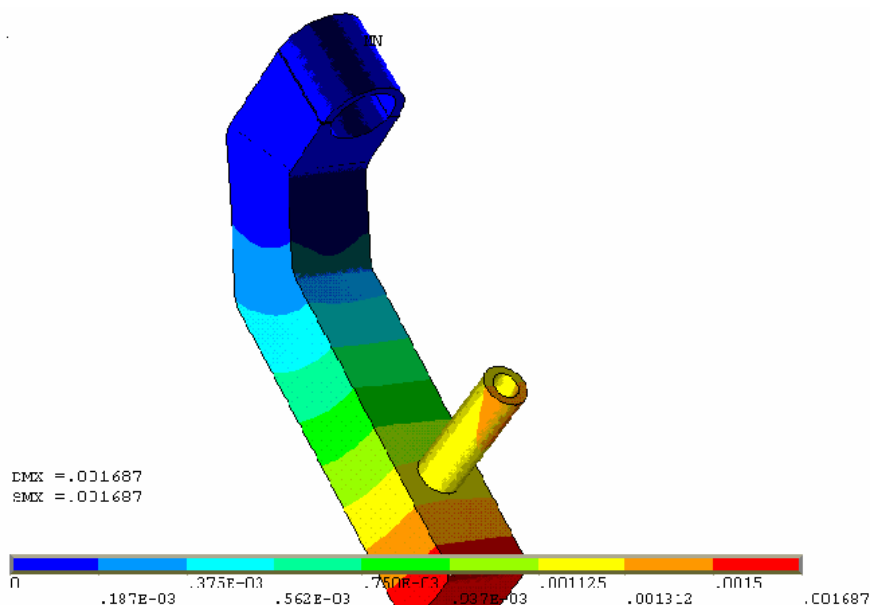
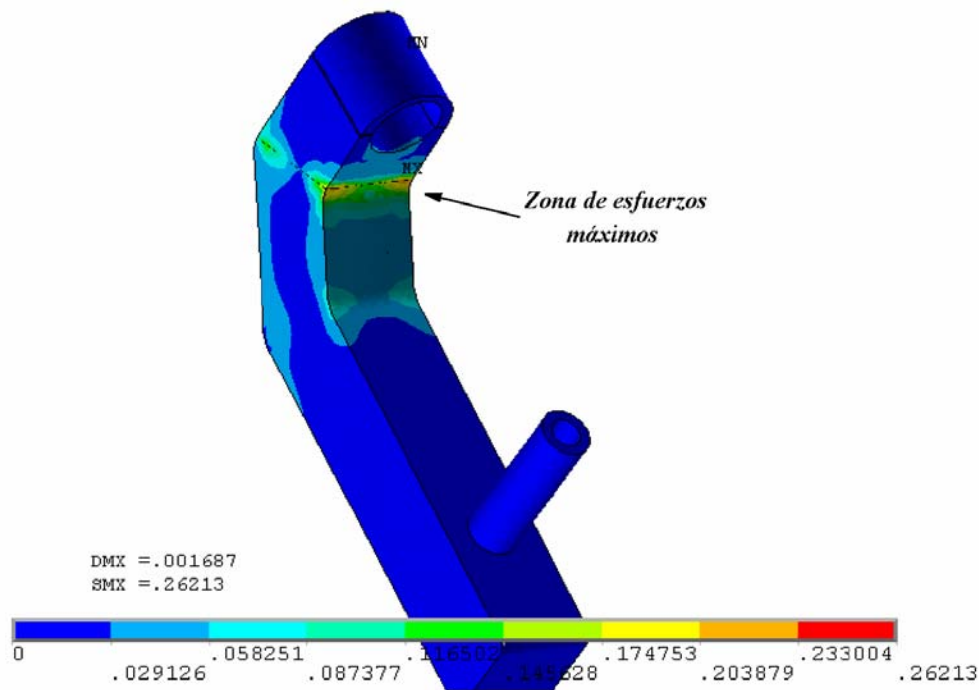


Figura 4.21 Desplazamientos resultantes en el modelo del brazo de soporte.

Tabla 4.1 Desplazamientos máximos.

Desplazamientos máximos (mm)			
	DMX	SMN	SMX
Dirección x (UX)	0.001687	0.515e-4	0.001646
Dirección y (UY)	0.001687	-0.531e-3	0.427e-3
Dirección z (UZ)	0.001682	-0.227e-04	0.227e-4

De manera semejante, la Figura 4.22 muestra los esfuerzos resultantes del análisis, debido a la aplicación de las cargas de diseño.

**Figura 4.22 Vista del modelo sometido a esfuerzo (zona de esfuerzos máximos).**

Los resultados obtenidos mediante el análisis de esfuerzos y deformaciones por FEM, mostraron que unos y otras resultan de pequeña magnitud, comparados con la resistencia y dimensiones del brazo transmisor, siendo por ello prácticamente despreciables. Estos resultados de la excesiva robustez del brazo dan lugar a considerar la modificación de espesores que promuevan, además, una reducción en masa y peso. En este caso, se propone un nuevo espesor del orden del 50% del original, es decir, placas de acero 12,7 mm en sustitución de las placas de 25,4 mm del brazo inicial. Dadas las características del modelo no se presenta un análisis posterior con esta nueva dimensión, debido a la pequeña magnitud de los resultados anteriores. Sin embargo, en un futuro sería recomendable actualizar el análisis de ésta y otras piezas del banco.

El análisis muestra que los mayores esfuerzos se localizan en una zona de unión, por lo que se deberá poner especial atención durante el proceso de fabricación de esta pieza, para evitar que existan discontinuidades en dicha área.

4.5 Generalidades de la instrumentación

Un sistema de medición consta de diversos dispositivos, conocidos como transductores, encargados de convertir la energía o información de un tipo a otra. La finalidad, del dispositivo es detectar la variación del fenómeno de interés, registrarla y transformarla para poder presentar correspondientemente una salida aceptable de la señal, que pueda ser manejada posteriormente para su análisis.

El diseño del sistema de medición consiste en la selección de los transductores necesarios y adecuados para la detección, transmisión e indicación de las variables a medir. Este proceso generalmente no es sencillo, por esta razón y debido al nivel de detalle del diseño aquí presentado, cuyo propósito principal es el diseño del banco, se presentan de manera general algunas propuestas de las posibles formas de instrumentación, que permitan medir y obtener los parámetros necesarios para la obtención de las propiedades mecánicas de la llanta.

Dentro de las alternativas de medición e instrumentación se encuentran, el aprovechar el uso de los manómetros para monitorear la presión del fluido del sistema hidráulico, que dota de movimiento a los tres actuadores ubicados en el brazo transmisor. De manera complementaria o redundante, dependiendo de la exactitud de los instrumentos de medición disponibles, se pueden elaborar transductores específicos con base en la técnica de extensometría, tomando de base los propios elementos del banco, que constituyan por sí mismos un papel semejante a las celdas de carga. También pueden desarrollarse celdas de carga ex profeso, que se coloquen entre los elementos del brazo transmisor y/o bajo la superficie de rodamiento, en el área de contacto entre la llanta y la banda.

Para la medición de los desplazamientos lineales, se sugiere utilizar, medidores de desplazamiento (LVDT), tanto para el desplazamiento lateral, como para el movimiento de dirección.

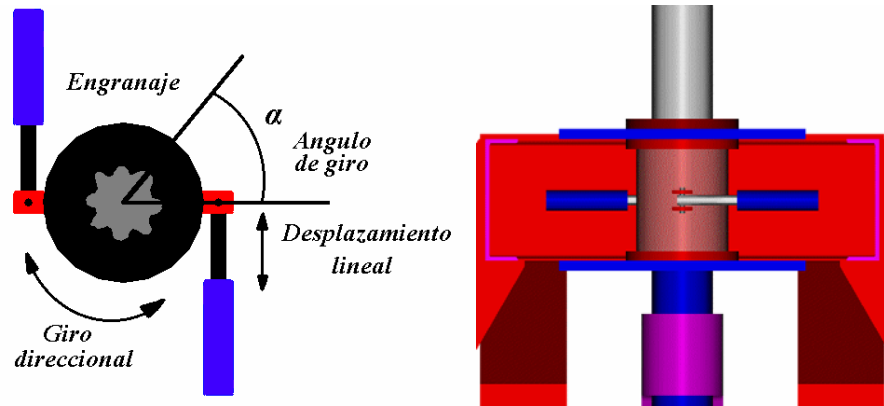


Figura 4.23 Desplazamiento lineal, convertido a giro direccional.

Sin embargo, la tarea de instrumentación debe ser analizada a mayor detalle, lo cual no está en el alcance del presente trabajo.

4.6 Conceptualización virtual

Como parte de la representación del banco de pruebas, en este apartado se presentan algunas imágenes correspondientes al modelo sólido tridimensional. Estas imágenes permiten percibir las características espaciales del funcionamiento del banco, así como facilitar posibles tareas de instrumentación e incorporación de dispositivos aparentes.

En la Figura 4.24 se presenta una vista superior del conjunto, mostrándose una de las disposiciones de la llanta en un evento de prueba, con el máximo ángulo de giro direccional de 20° a ambos lados. Pueden observarse también otros diversos componentes del banco, incluido el posible dispositivo para el accionamiento de los rodillos y la banda.

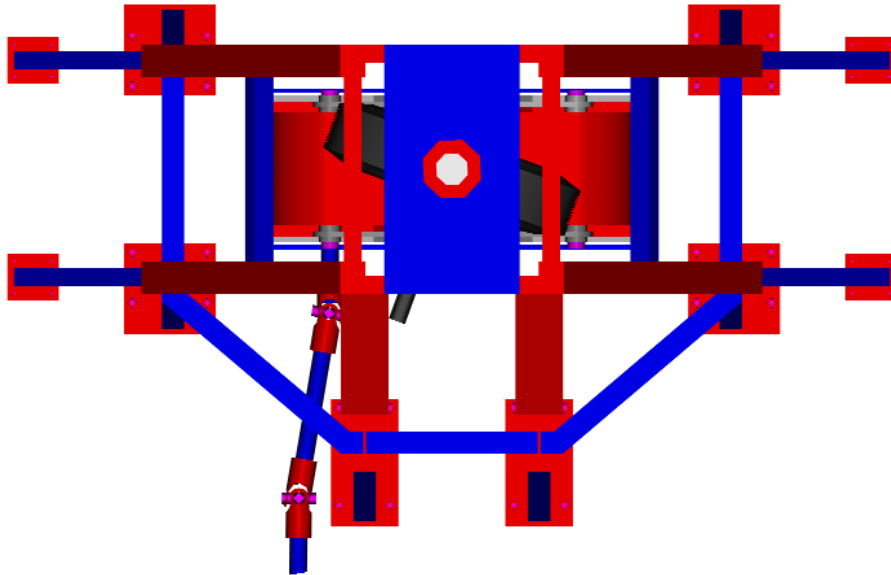


Figura 4.24 Vista superior del modelo sólido, mostrando el intervalo de giro direccional de la llanta de prueba.

En la Figura 4.25 se presenta una vista frontal y una lateral del banco, incluyendo una llanta del tipo utilizado en vehículos pesados.

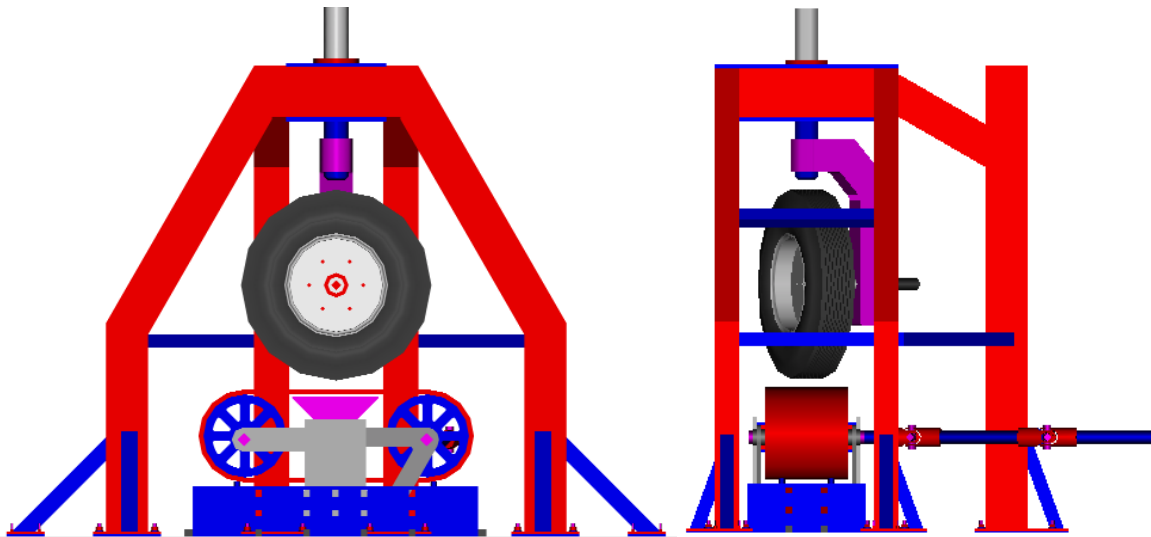


Figura 4.25 Vistas frontal y lateral del modelo sólido.

A grandes rasgos, estas imágenes permiten verificar la disponibilidad de espacio para ejecutar los movimientos de giro de la llanta, así como de la ausencia de posibles interferencias entre los elementos que componen el banco. Adicionalmente, la Figura 4.26 muestra una vista posterior. En la figura 4.27 se visualiza el modelo tridimensional del conjunto.

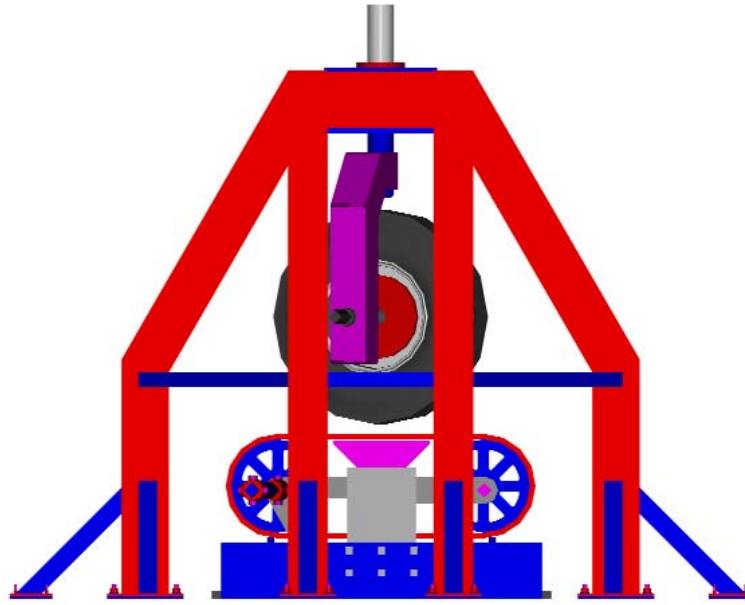


Figura 4.26 Vista posterior del banco llanta con dirección de 20°

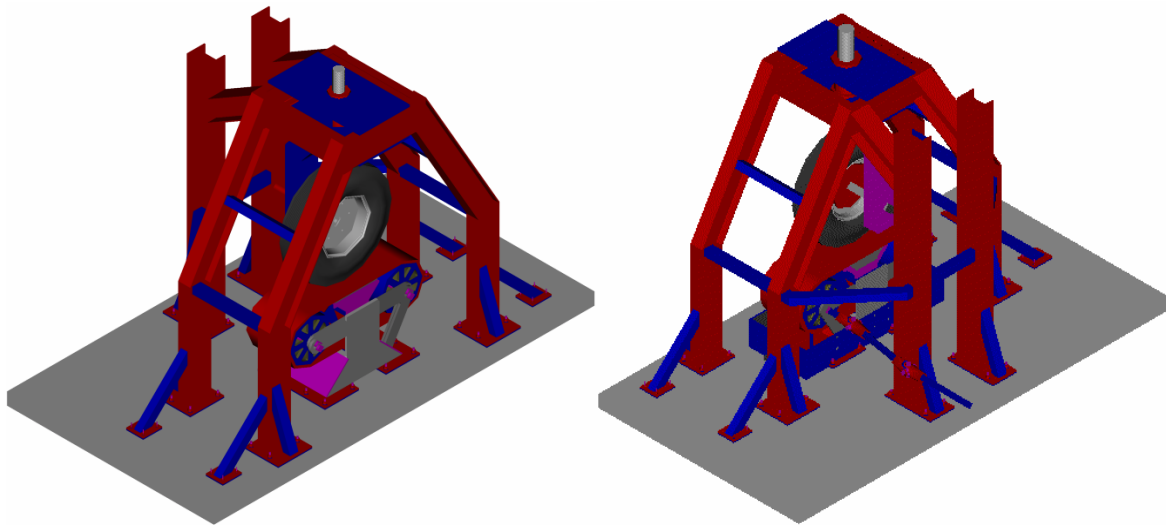


Figura 4.27 Vista del conjunto, modelo tridimensional

4.7 Otras aplicaciones posibles

El principio del diseño original del banco se basa en generar las condiciones normales de operación de las llantas. Aunque las condiciones consideradas son suficientes para determinar las propiedades propuestas, el banco, con las adaptaciones adecuadas, puede ser además utilizado para la determinación de otras características relativas a la operación de las llantas. Estas características pueden ser la respuesta de la llanta bajo condiciones ambientales simuladas, frenado, rodamiento en distintas condiciones superficiales y de desgaste, pruebas de resistencia a la penetración, evolución del desgaste y de la resistencia. Con respecto al tamaño de llantas de prueba, las limitantes serán las condiciones

físicas de la construcción del banco, así como de los intervalos de funcionamiento y operación que éste pueda proporcionar para tipos específicos de llantas.

Conclusiones

La llanta neumática es uno de los componentes de mayor complejidad que participan en el comportamiento dinámico de los vehículos. Por tanto, conocer sus propiedades mecánicas permite identificar algunas características y efectos sobre dicho comportamiento. Una de las maneras de conocer esas propiedades es a través de dispositivos experimentales diseñados ex profeso. Este trabajo cumple con el objetivo de proponer el diseño conceptual de un banco de pruebas, ideado para simular condiciones de operación de llantas neumáticas y determinar su rigidez, tanto radial y lateral como torsional. Las características del banco permiten asociar estas propiedades con otros parámetros de desempeño de las llantas, como el desplazamiento lineal y angular, la velocidad, las fuerzas vertical y lateral y el par de autoalineamiento.

Dentro de las características del banco se cuenta la de simular el desplazamiento lineal de la llanta, así como el transversal y la carga vertical a la que podría estar sujeta. La modularización del banco, permite, a su vez, agrupar conjuntos de dispositivos que dan lugar a la versatilidad del mismo. Por otro lado, las características funcionales y de diseño aplicadas sobre el banco permiten que sus capacidades puedan ser extendidas a la determinación de otros parámetros que intervienen en el desempeño mecánico de las llantas, así como del comportamiento dinámico de los vehículos. Sin embargo, el diseño propuesto es susceptible de posibles mejoras, tanto de índole mecánica como de funcionamiento y operación.

Del desarrollo del proyecto se estima que la construcción de un banco de este tipo puede representar un costo inferior al 25 % del valor de un dispositivo comercial con características semejantes, además de contener mecanismos sencillos que permiten reducir costos de mantenimiento y/o reparaciones. Lo expuesto en este trabajo puede servir de base para el desarrollo posterior de sistemas prácticos para la construcción del mismo, así como para análisis de mayor sofisticación.

Recomendaciones y trabajos futuros

A partir de las características del diseño conceptual presentado, se pueden detallar y refinar tanto aspectos geométricos como de materiales. Así, se puede desarrollar un proceso específico para la selección adecuada de los materiales de cada componente, así como de las formas de los elementos que puedan proporcionar un mejor desempeño al banco, así como en sus capacidades.

Además del diseño mecánico detallado de cada componente, es necesario realizar el análisis correspondiente al proceso de instrumentación, ya que en este trabajo se incluye de manera somera. Por tanto, una de las propuestas de investigación que pueden ser continuación de este trabajo es el de tomar mayores consideraciones para el diseño de la instrumentación, en el que se definan con

mayor precisión los accesorios, los transductores y los dispositivos de registro, tomando en consideración los sistemas de control necesarios para su operación.

Por otro lado, la automatización del banco resulta ser un punto de interés para asegurar un control preciso de los parámetros de prueba durante su operación. Esto se puede combinar con los sistemas de adquisición de datos, que presentan la posibilidad de tener un pronto manejo de las señales y representaciones en tiempo real, pudiendo ser utilizados para el correcto desarrollo de las pruebas.

El diseño aquí presentado puede servir como base para el desarrollo de bancos que permitan analizar neumáticos diversos, incluyendo los utilizados en la minería y construcción.

Referencias

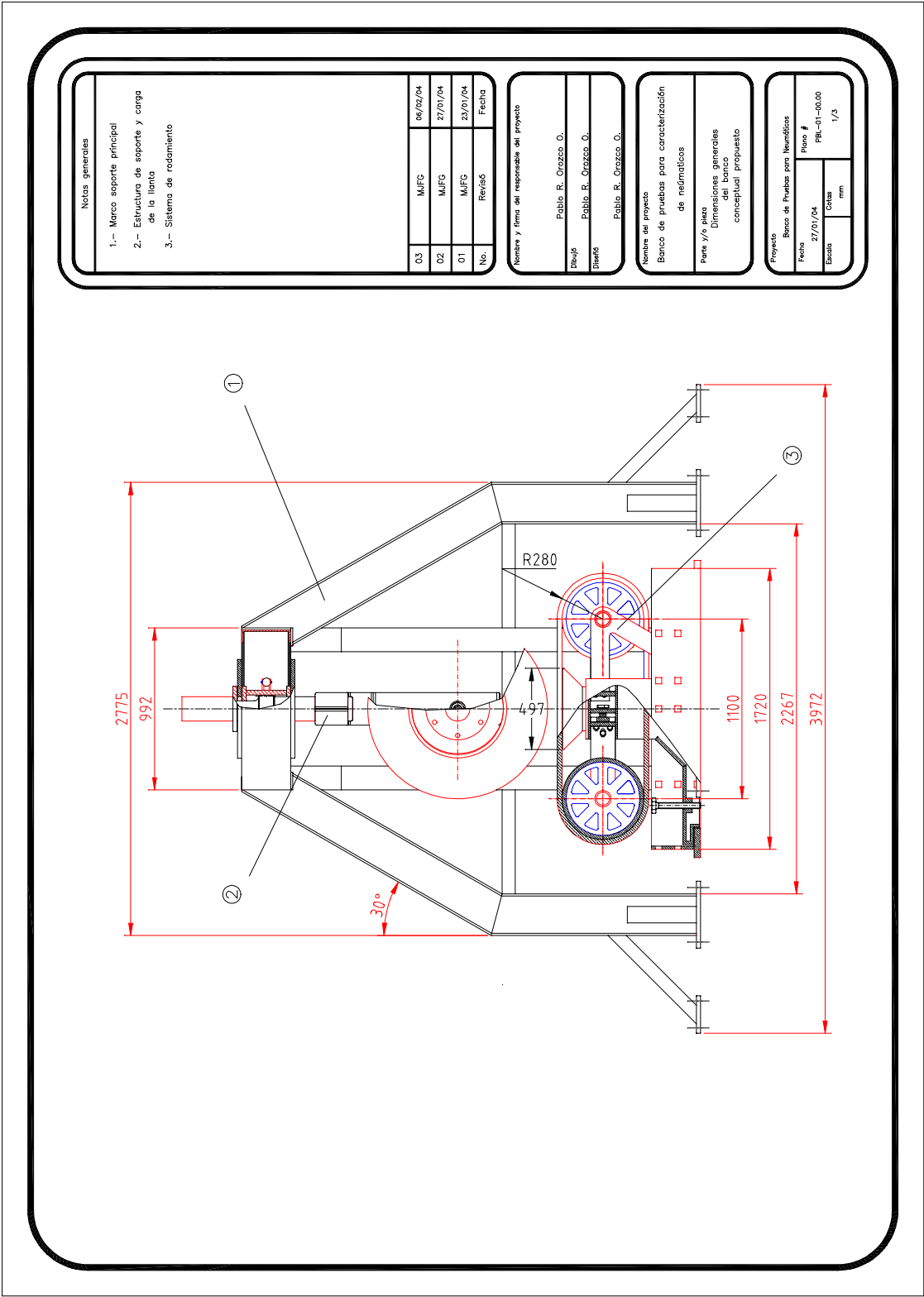
1. Larousse. **Diccionario Enciclopédico**. 2000. Colombia. Edit. Larousse México, Colombia, Venezuela. 7ma edición.
2. NMX-T-004-SCFI-2000 Industria Hulera – Llantas, Cámaras y Accesorios– Definiciones.
3. Encyclopaedia Británica. 1965. Estados Unidos. Edit. William Beneton. Tomo 10
4. <http://www.goodyear.com/corporate/strange.html>
5. <http://www.blupete.com/Literature/Biographies/Science/Inventors.htm>
6. <http://inventors.about.com/library/inventors/blelastic.htm>
7. http://icarito.latercera.cl/enc_virtual/e_tecnologica/materiales/caucho.htm
8. Enciclopedia Británica. 1965. Estados Unidos. Edit. William Beneton. Tomo 7
9. <http://www.tartans.com/articles/famscots/jbdunlop.html>
10. http://www.austral.addr.com/old_cars/autos_viejos.htm
11. <http://www.michelin.com.mx/bienvenido.htm>
12. **Enciclopedia Británica**. 1965. Estados Unidos. Edit. William Beneton. Tomo 15
13. <http://www.michelin.com.mx/bienvenido.htm>
14. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
15. Norma SAE J670e **Vehicle Dynamics Terminology**.
16. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
17. Fitch, James William. **Motor Truck Engineering Handbook**. 1994 Estados Unidos Edit. Society of Automotive Engineers, Inc. 4ta edición.
18. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
19. Norma NOM-016-SCT-2-1996–Industria Hulera – Llantas para Camión– Especificaciones y Métodos de prueba.

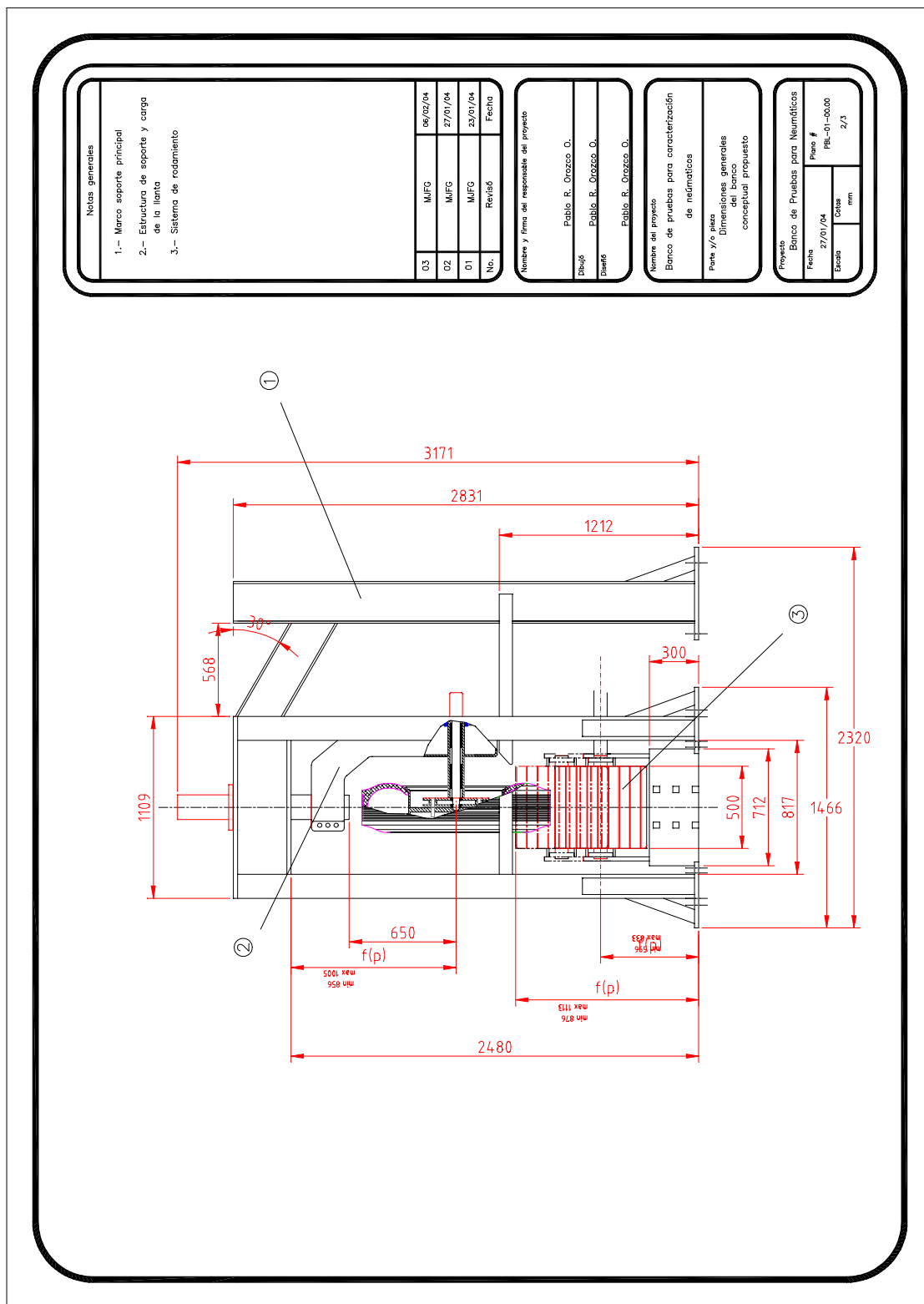
20. Norma NOM-086/1-SCFI-2001.
21. Fitch, James William. **Motor Truck Engineering Handbook**. 1994 Estados Unidos Edit. Society of Automotive Engineers, Inc. 4ta edición.
22. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
23. <http://www.ljtyres.com/facts.htm>
24. <http://www.yokohama.co.nz/understand.htm#aspect>
25. <http://www.supaquick.co.za/>
26. Shigley. Joseph E., Mischke. Carles R. **Fundamentos de Diseño de Maquinas**. 1995. México. Edit. McGraw-Hill/Interamericana de México S. A. de C. V. 1ra edición en español.
27. Shigley. Joseph E., Mischke. Carles R. **Diseño en Ingeniería Mecánica**. 1996. México. Edit. McGraw-Hill/Interamericana de México S. A. de C. V. 4ta edición en español.
28. Fitch, James William. **Motor Truck Engineering Handbook**. 1994 Estados Unidos Edit. Society of Automotive Engineers, Inc. 4ta edición.
29. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
30. Norma SAE J670e **Vehicle Dynamics Terminology**.
31. Kinstler, John R., Gillespie Thomas D. Et al **Truck Systems Design Handbook**. 1992. Estados Unidos, Edit. Society of Automotive Engineers, Inc.
32. Preston-Tomas. J. **Measure Characteristics and Dynamic Performance of two configurations of Western Canadian Log Truck**. 1994.
33. Tong X., Tabrrok. B, Gindy. M. **Computer Simulation Analysis of Canadian Logging Trucks**. 1995. Canada. Center for Surface transportation Technology.
34. Preston-Tomas. J. **Measure Characteristics and Dynamic Performance of two configurations of Western Canadian Log Truck**. 1994.
35. Tong X., Tabrrok. B, Gindy. M. **Computer Simulation Analysis of Canadian Logging Trucks**. 1995. Canada. Center for Surface transportation Technology.
36. Fitch, James William. **Motor Truck Engineering Handbook**. 1994 Estados Unidos Edit. Society of Automotive Engineers, Inc. 4ta edición.

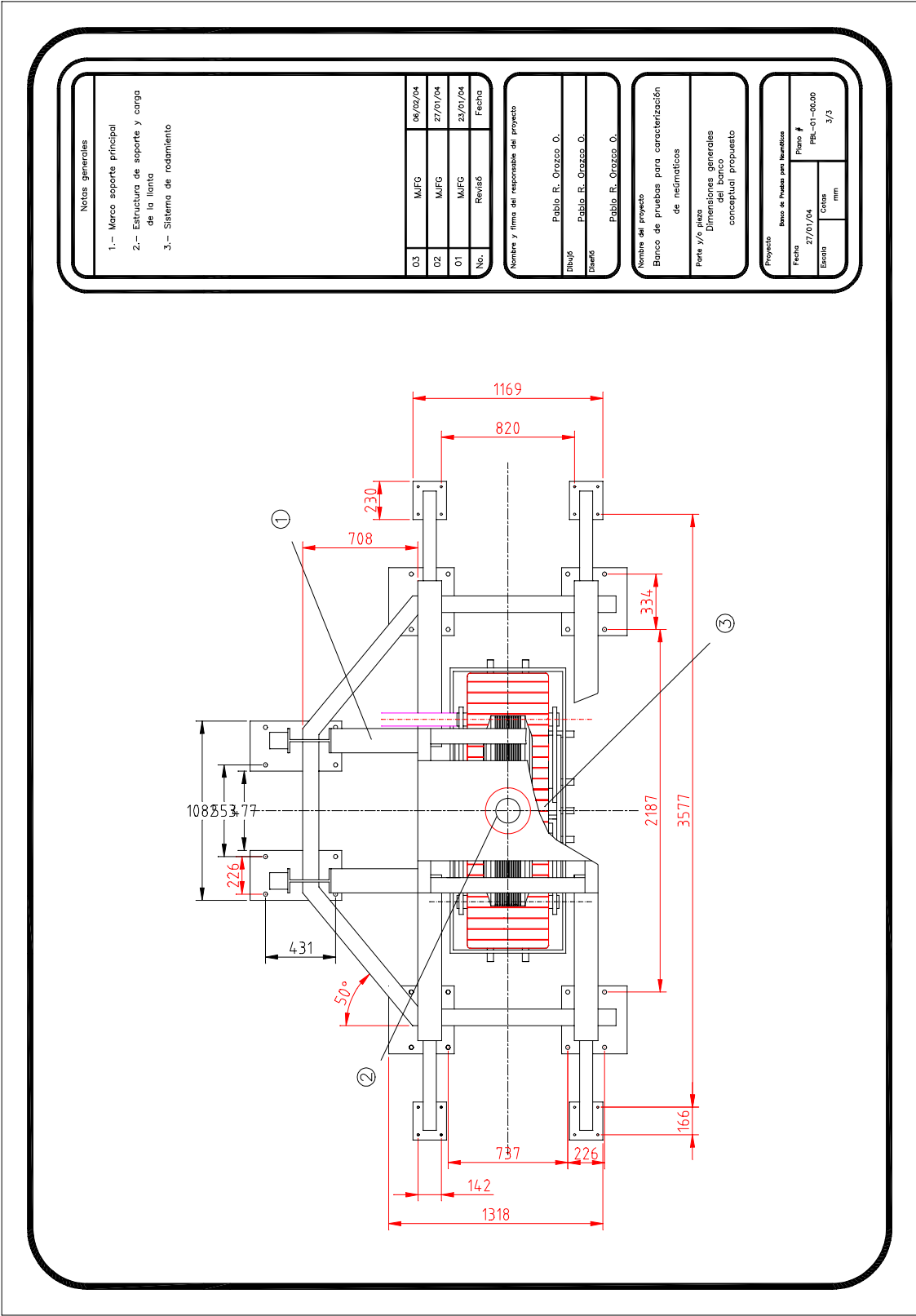
37. Gillespie Thomas D. **Fundamentals of Vehicles Dynamics.** 1992. Edit.: Society of Automotive Engineers, Inc. 3era reimpresión 1994.

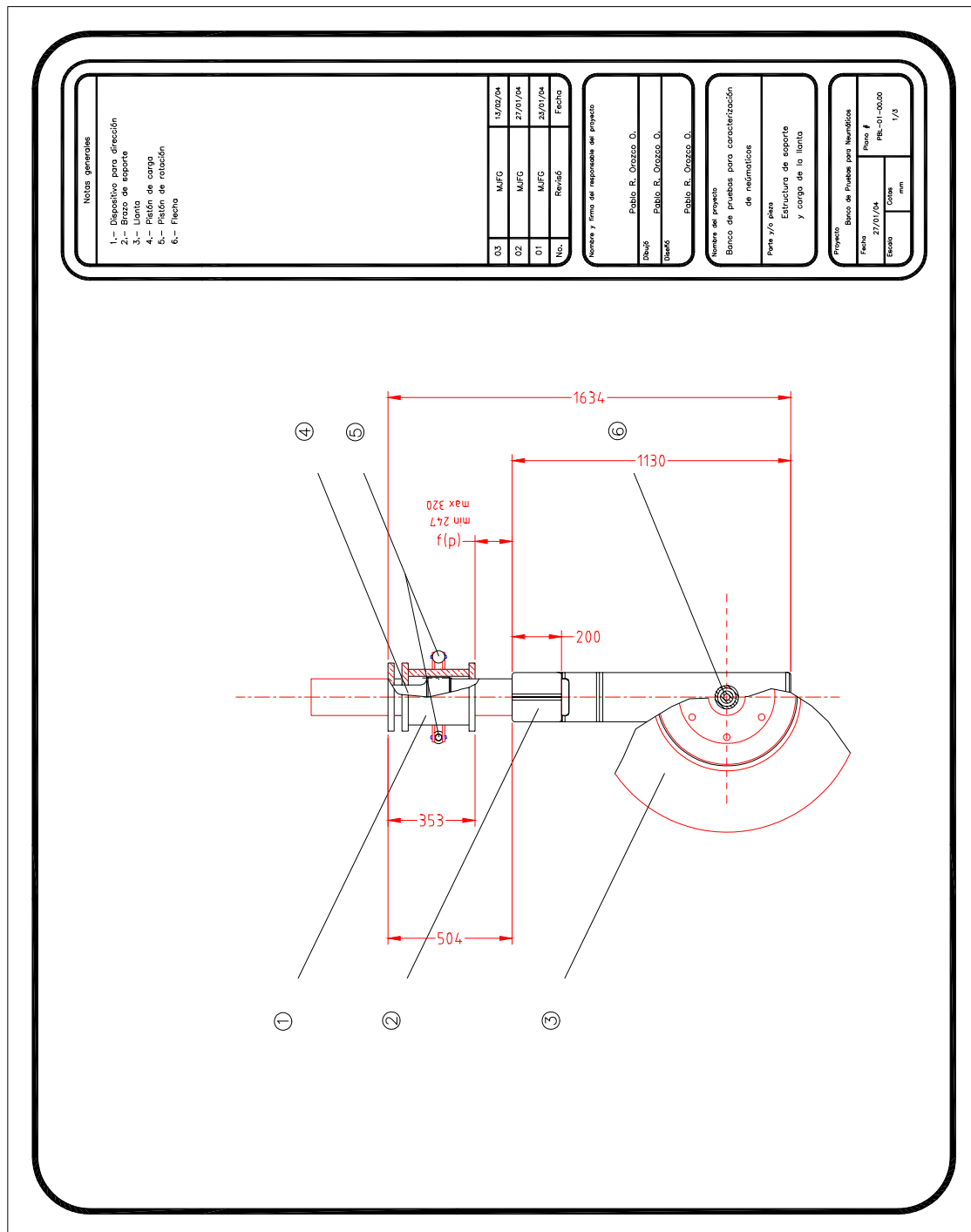
Anexos

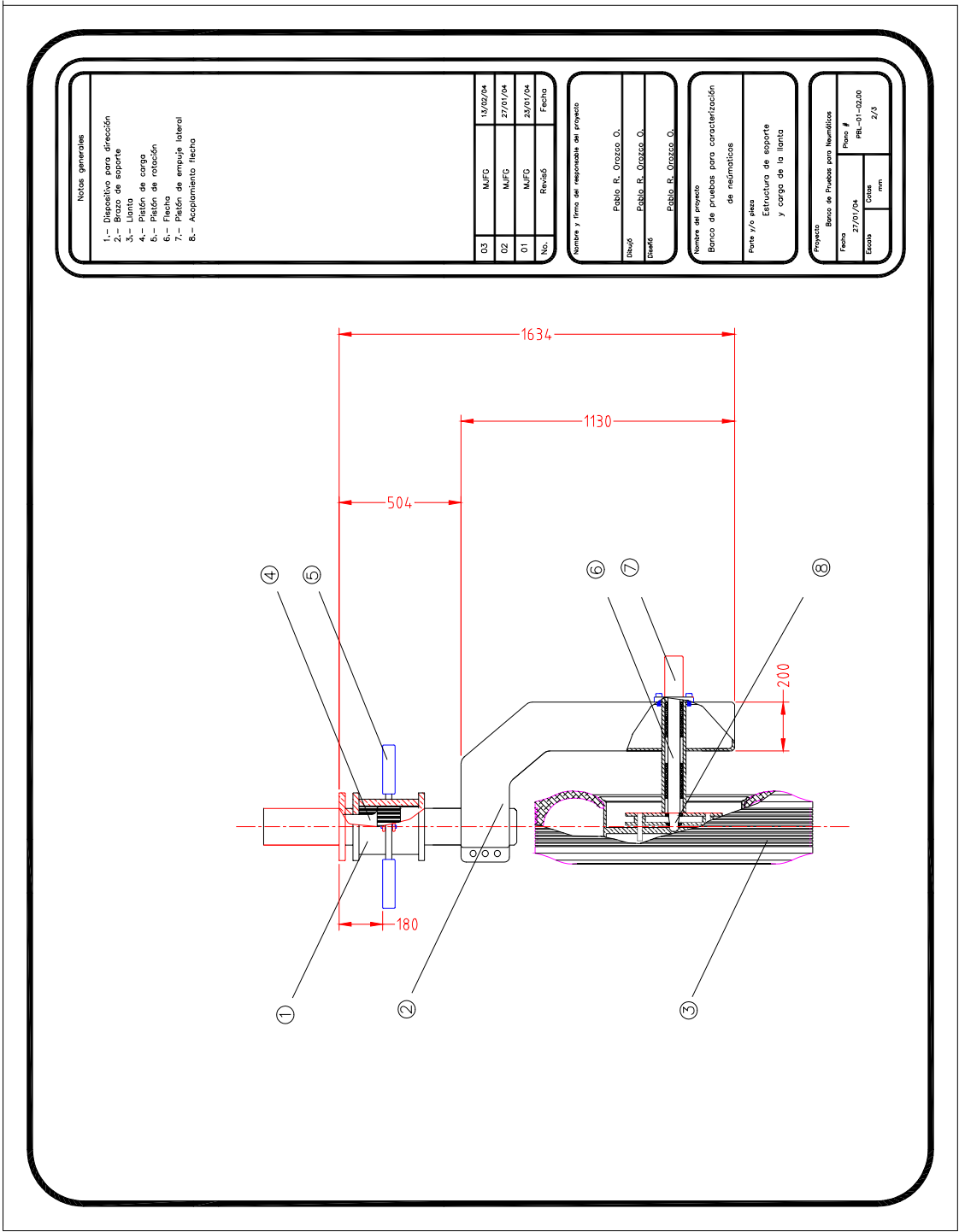
PBL-01-00.00 1/3	77
PBL-01-00.00 2/3.....	78
PBL-01-00.00 3/3.....	79
PBL-01-02.00 1/3.....	80
PBL-01-02.00 2/3.....	81
PBL-01-02.00 3/3.....	82
PBL-01-02.01	83
PBL-01-03.00 1/3.....	84
PBL-01-03.00 2/3.....	85
PBL-01-03.00 3/3.....	86
PBL-01-03.02	87
PBL-01-04.00 1/2.....	88
PBL-01-04.00 2/2.....	89
PBL-01-04.01 1/2.....	90
PBL-01-04.01 2/2.....	91

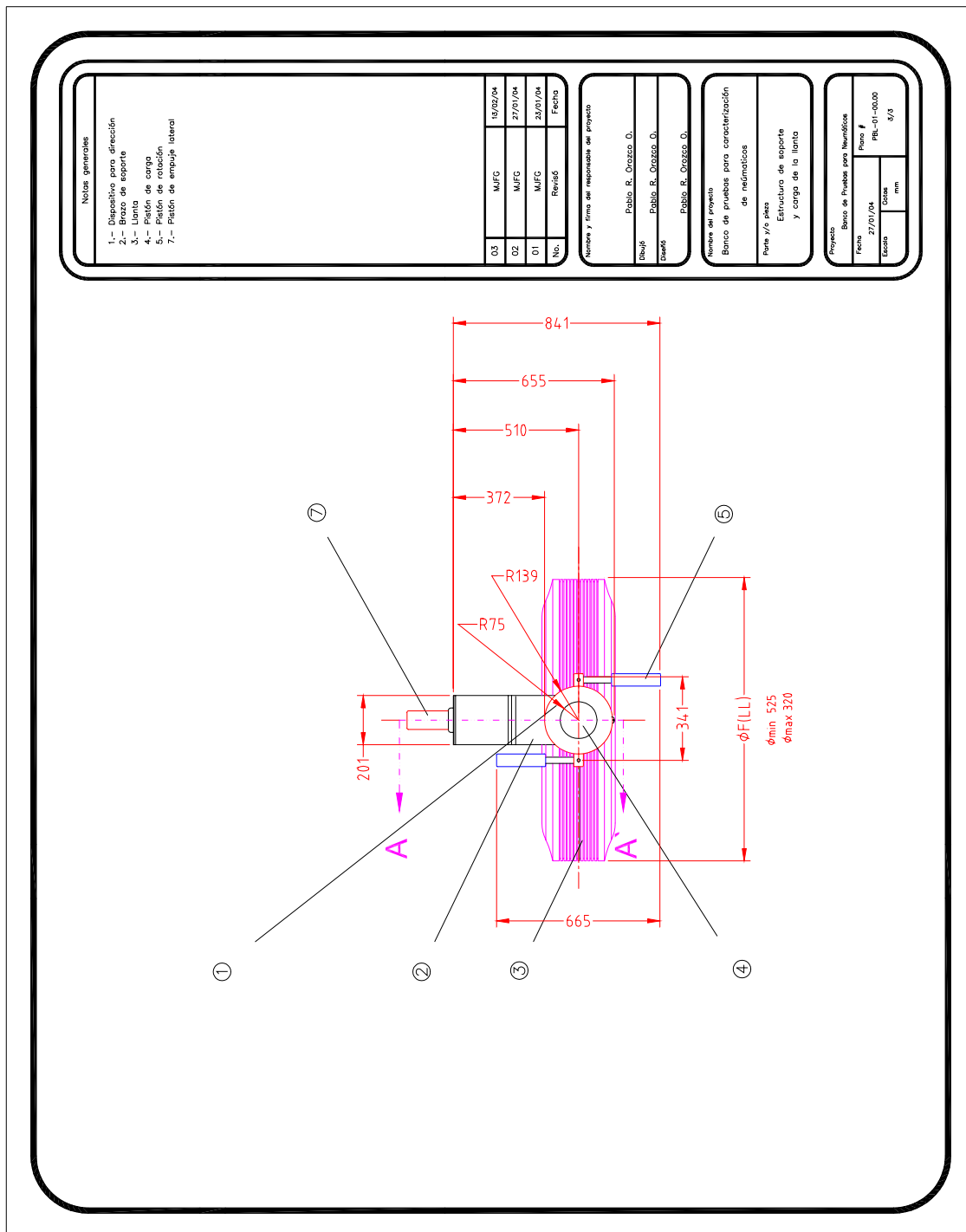


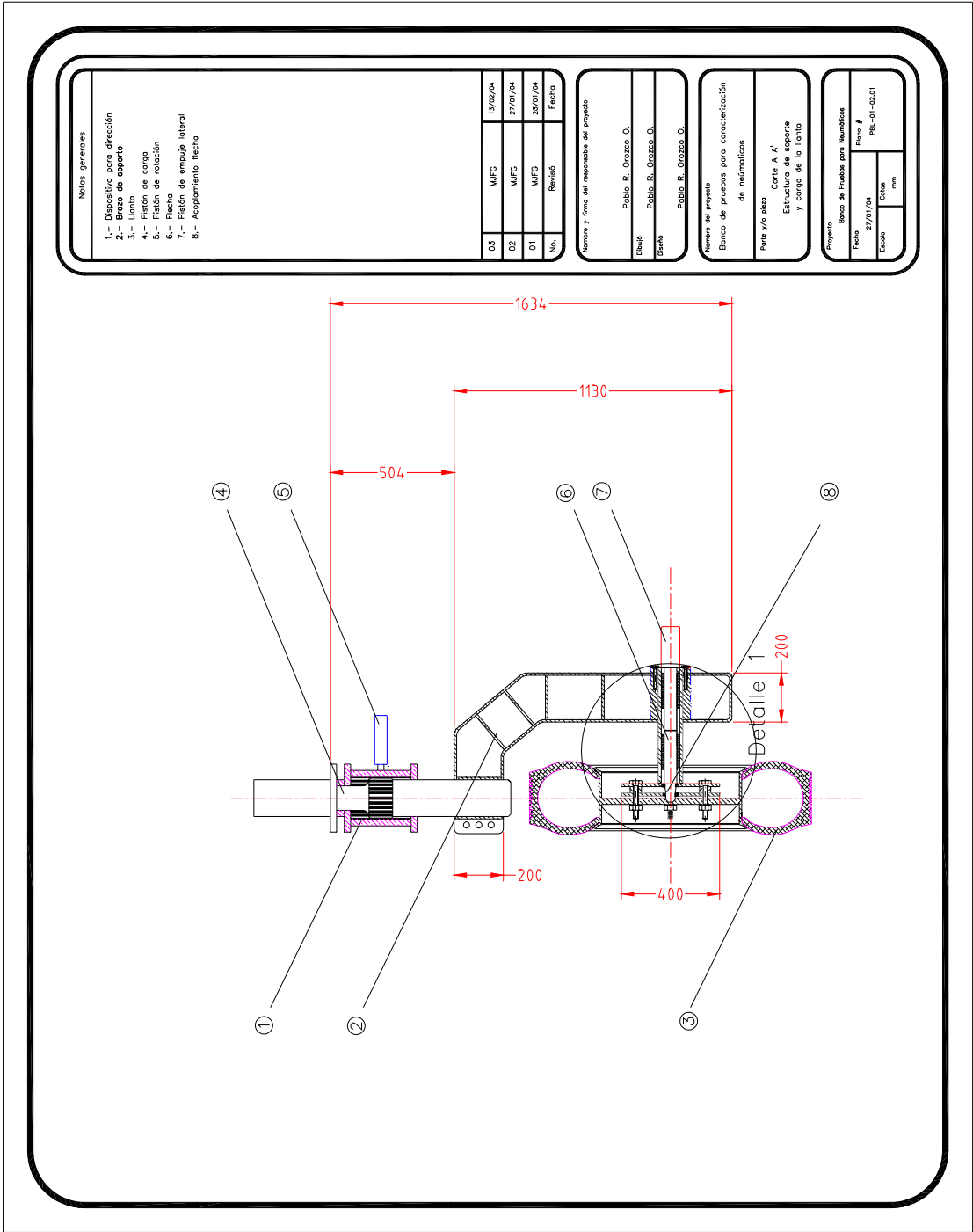


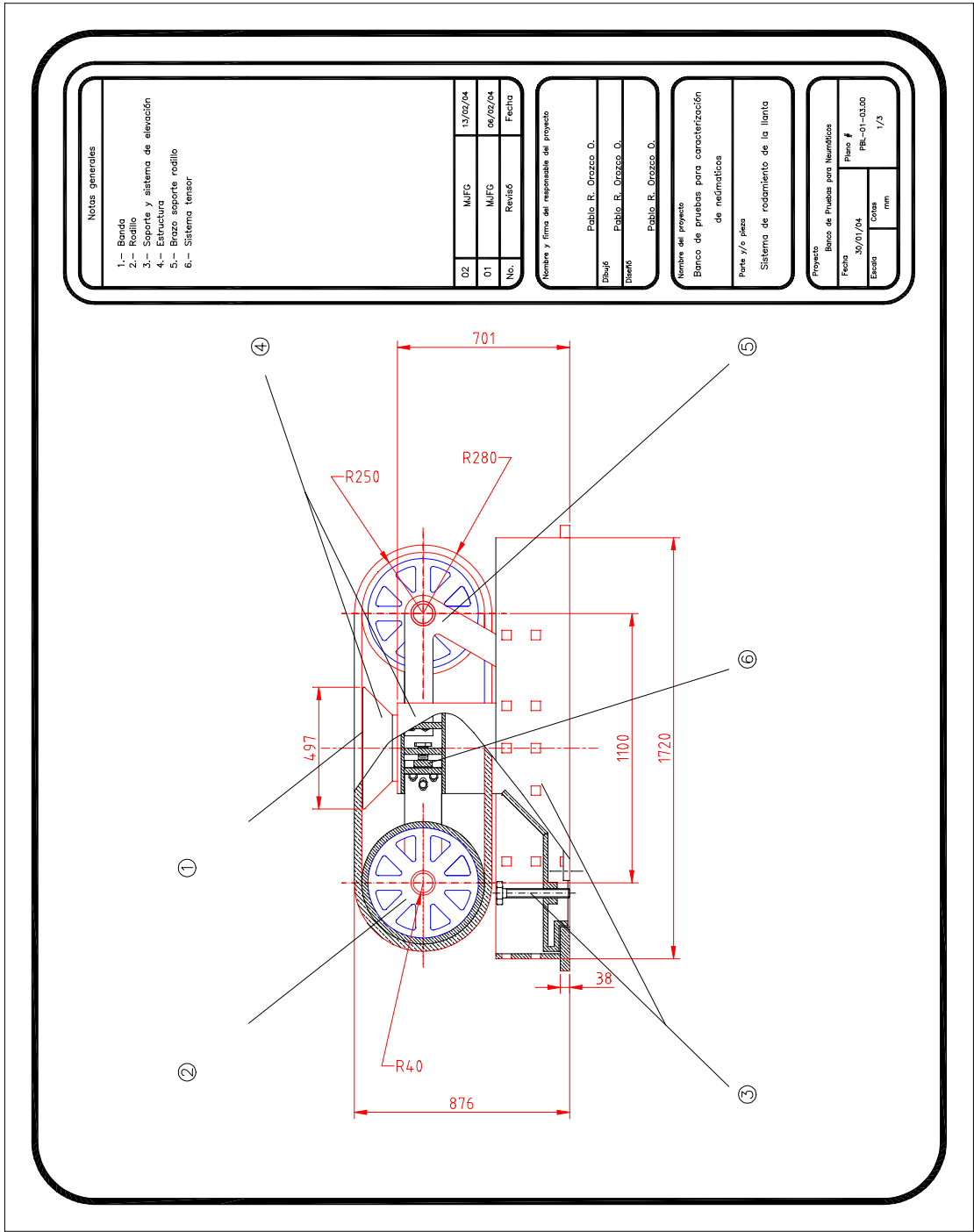


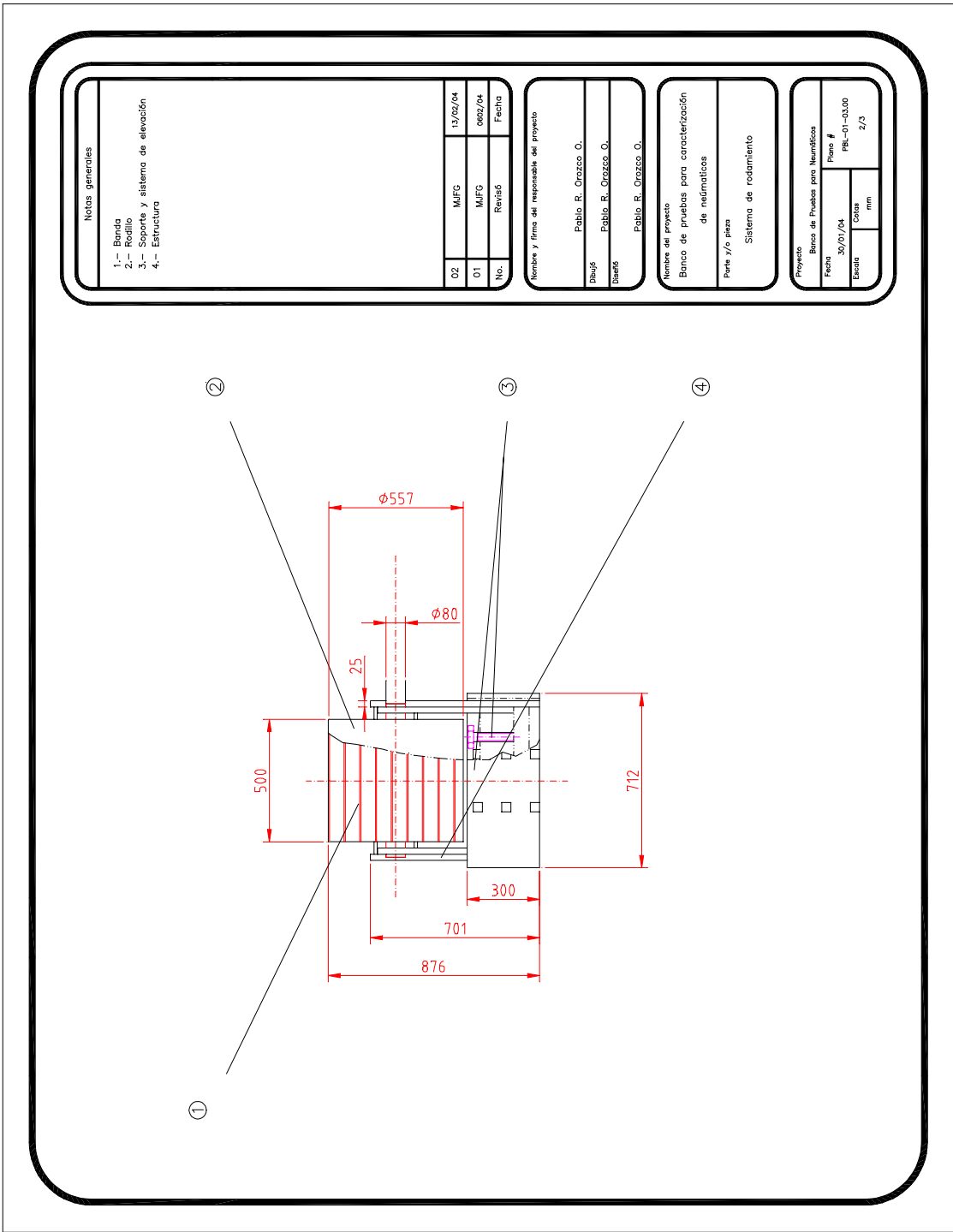


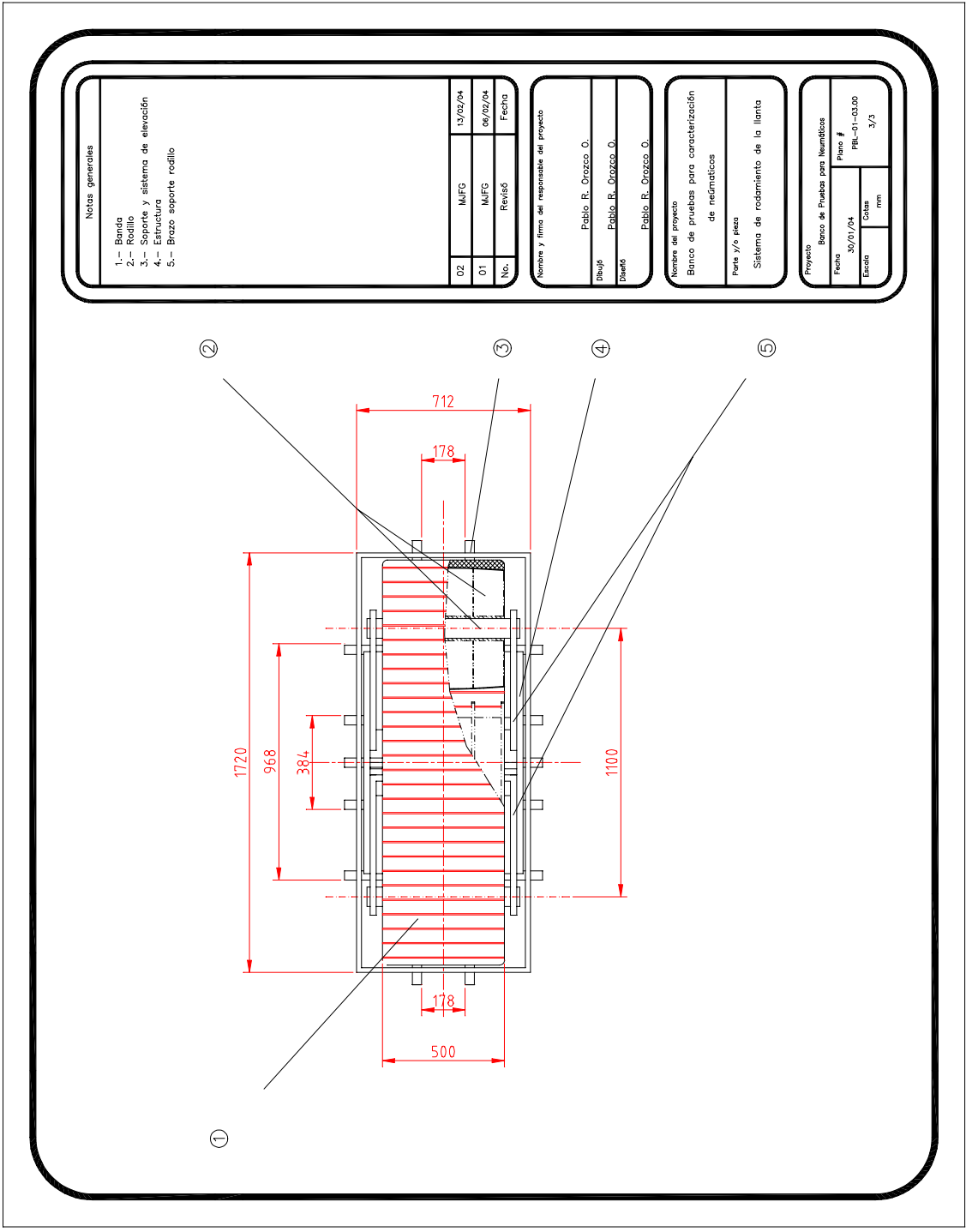


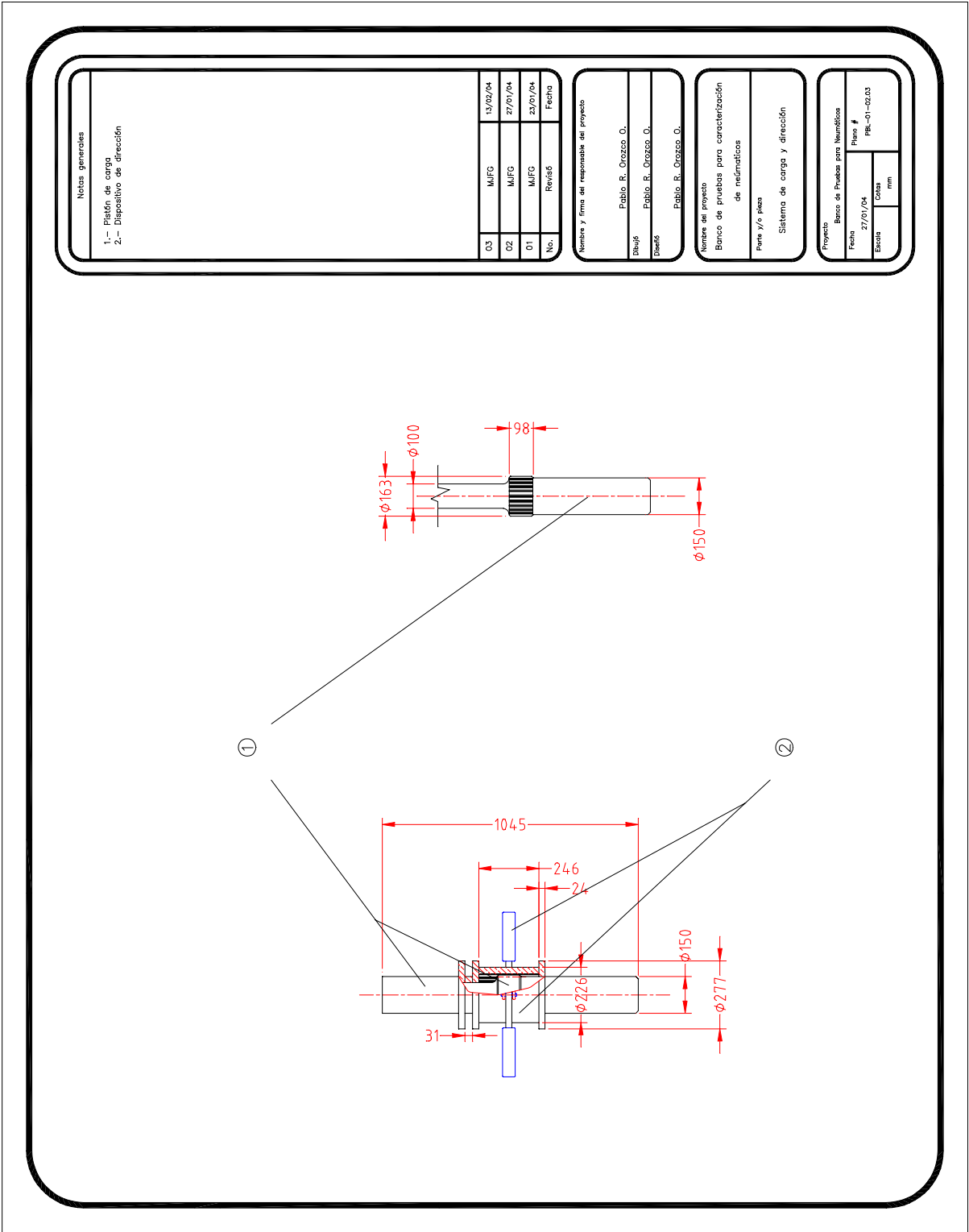


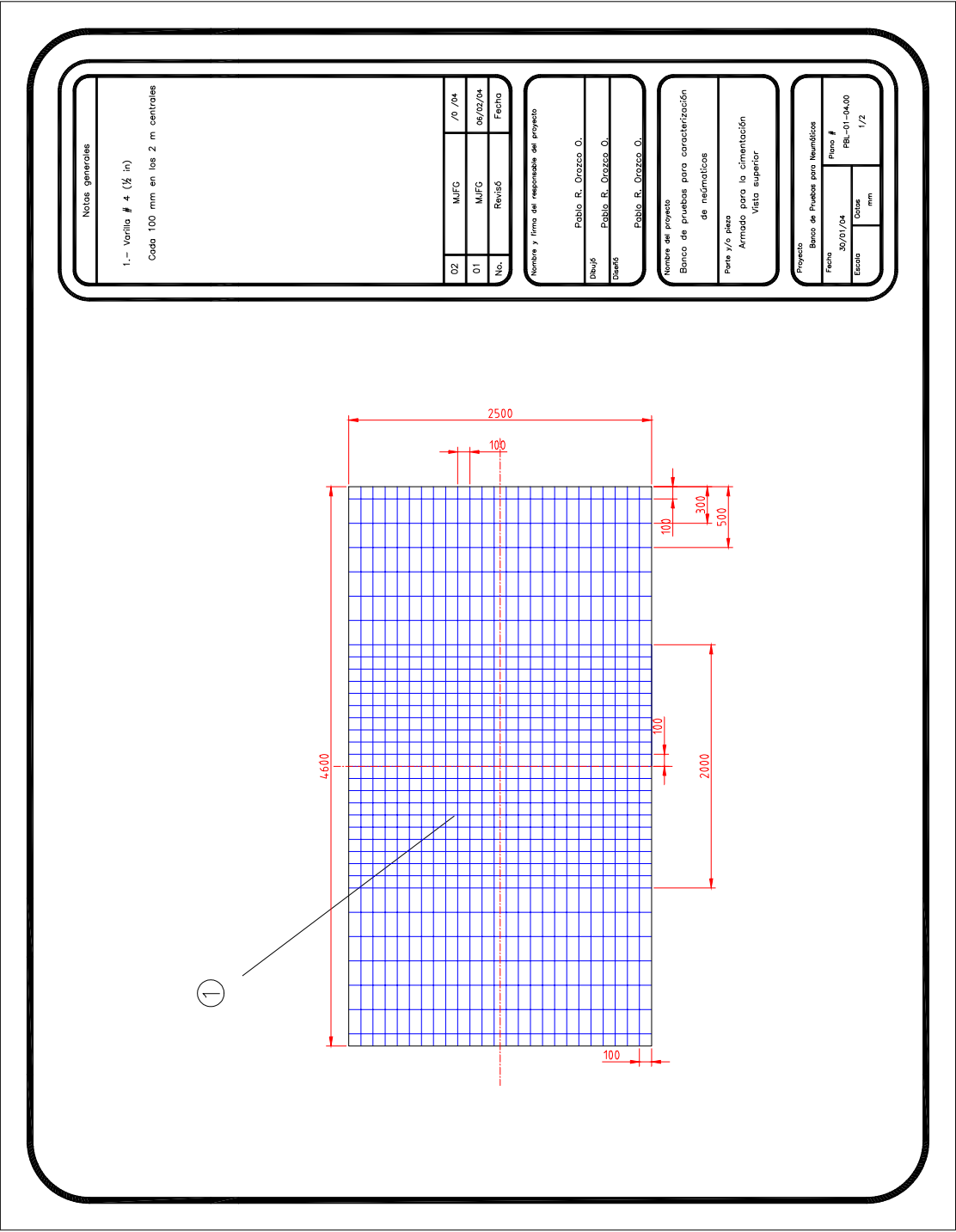


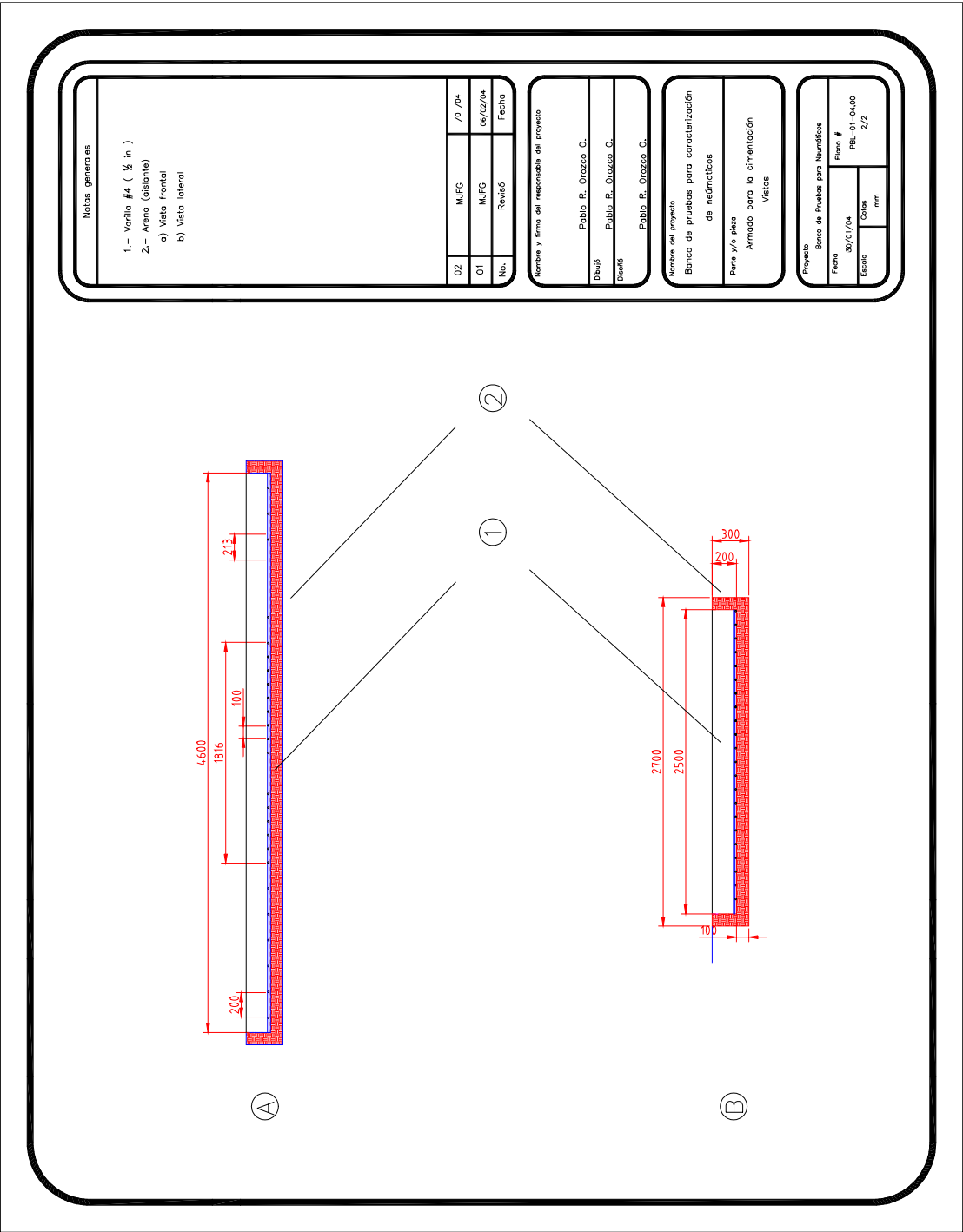


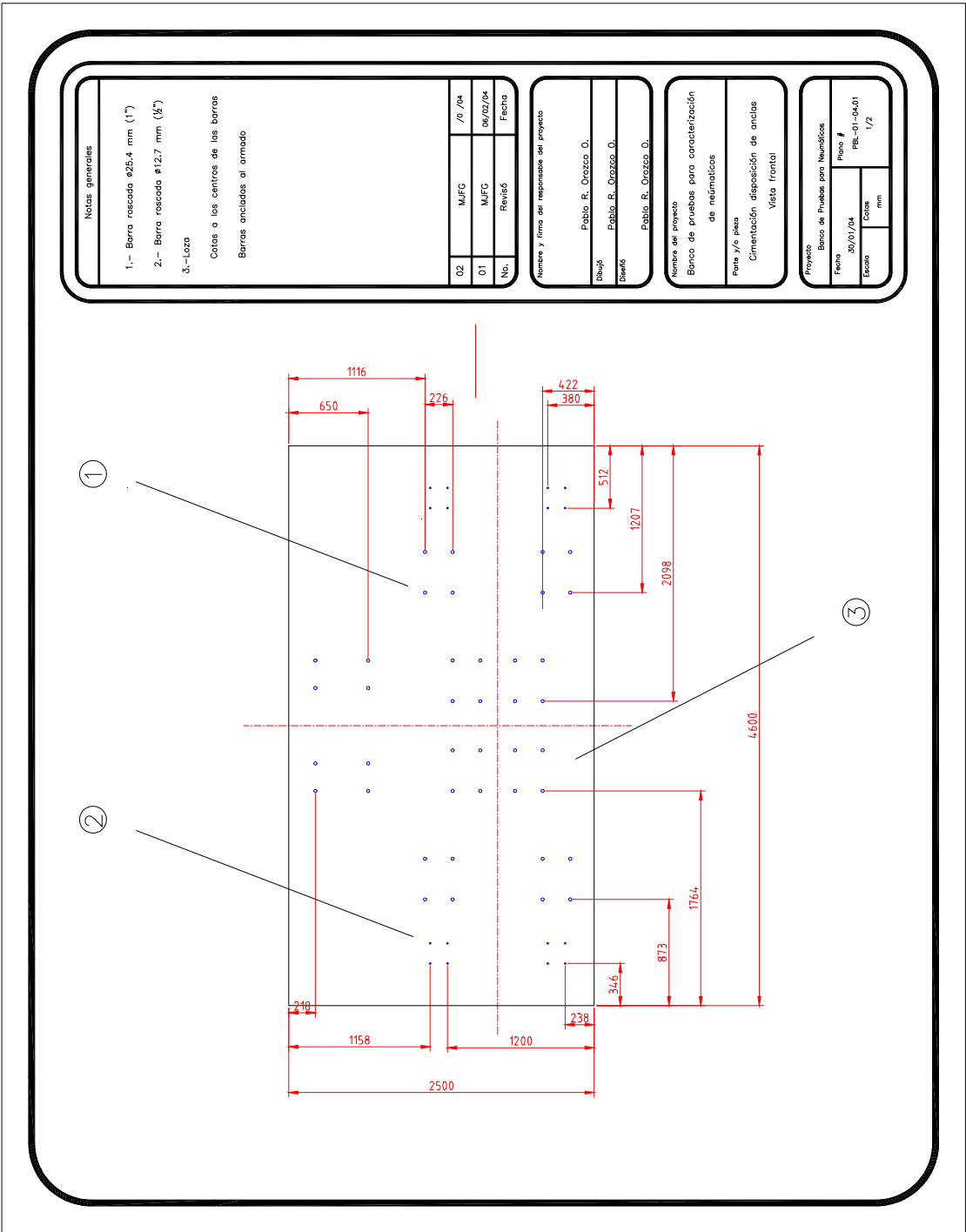


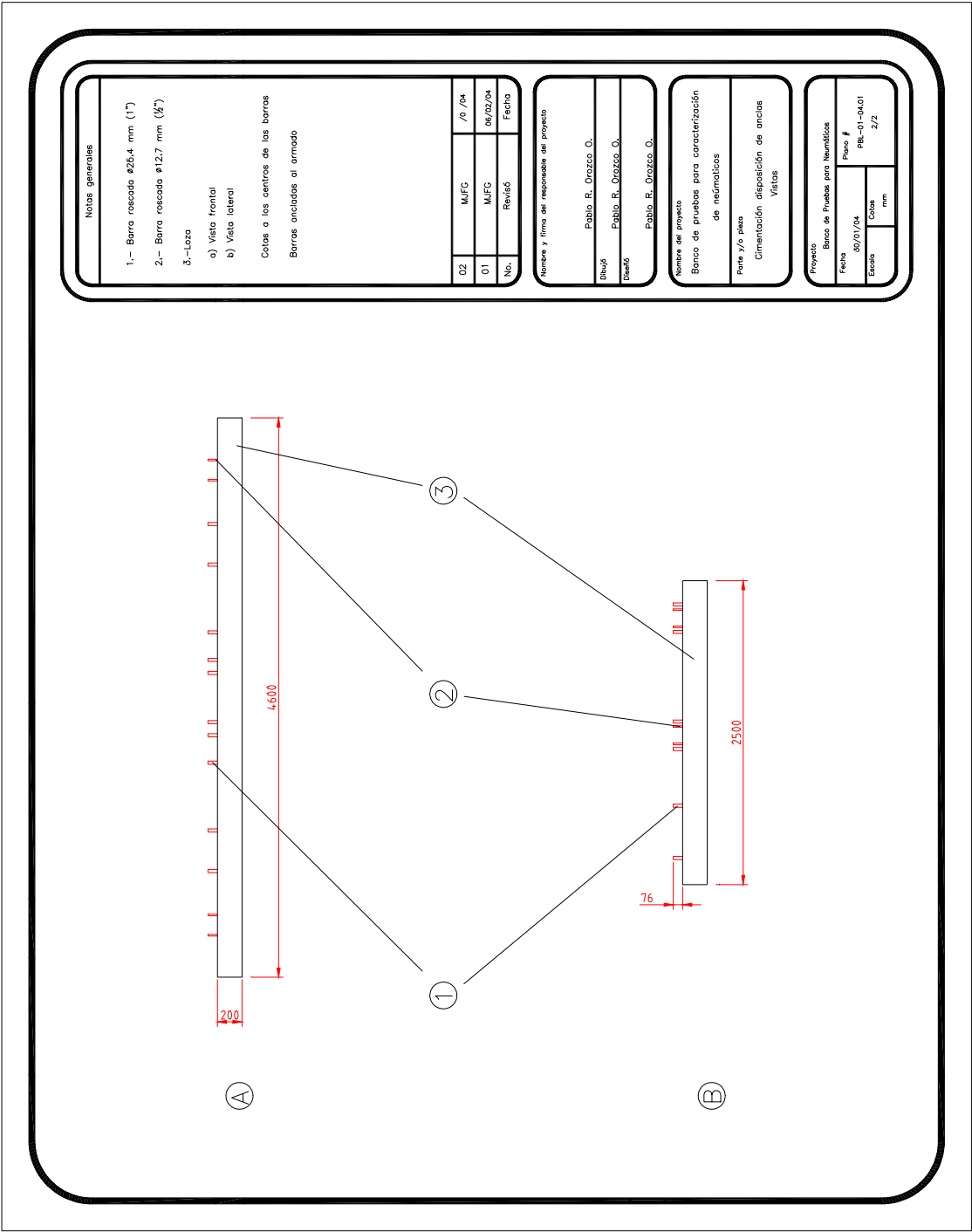












**CIUDAD DE MÉXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730 México, D.F.
Tels. (55) 5615 3575
5598 5218
Fax (55) 5598 6457

SANFANDILA

Km 4+000, Carretera
Los Cues – Galindo
76700 Pedro Escobedo, Qro.
Tels. (442) 216 97 77
216 96 46
Fax (442) 216 96 71

Internet <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx