

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica



**DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN  
Y EL DE DIRECCIÓN  
DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO  
FÓRMULA ELECTROTÓN EXPERIMENTAL**

Juan Carlos Pratdesaba Prado

Guatemala  
2,004



**DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN  
Y EL DE DIRECCIÓN  
DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO  
FÓRMULA ELECTRATÓN EXPERIMENTAL**

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

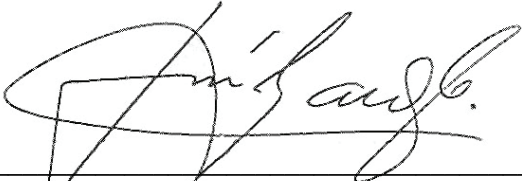


## **DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y EL DE DIRECCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO FÓRMULA ELECTROTÓN EXPERIMENTAL**

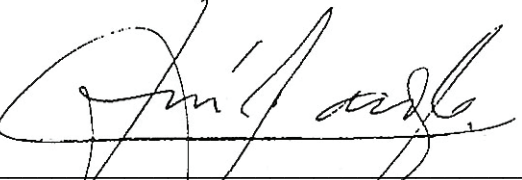
Trabajo de Investigación presentado por  
Juan Carlos Pratdesaba Prado  
para optar al grado de  
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala  
2,004


Vo.Bo.

(f)   
Ingeniero José Joaquín Garoz  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Ingeniero José Joaquín Garoz

(f)   
Ingeniero Carlos Paredes

(f)   
Ingeniero Manuel Ruano

Fecha de Aprobación: 11 de Junio de 2,004.

*"Llega tan lejos como tus sueños te lo permitan,  
y disfruta cada instante de ese camino,  
para que cuando llegues a ellos,  
quieras seguir soñando"*

**JCPP**

## **PREFACIO**

La culminación de todo un esfuerzo a lo largo de seis años en las aulas de la Universidad del Valle, más el tiempo transcurrido hasta lograr terminar esta última etapa de la formación académica, para poder sentir la satisfacción personal de haber terminado una de las etapas más duras e importantes en la vida de cualquier persona, me llena de orgullo y me motiva a seguir adelante en mi preparación profesional.

La carrera de Ingeniería Mecánica me ha llenado de satisfacciones a lo largo de estos años y una de ellas es que me brindó la oportunidad de participar en el primer y único campeonato Electrón inter universitario realizado en Guatemala. Esta experiencia me hizo descubrir ese potencial que muchos tenemos de inventar y de realizar proyectos que en principio creía que no estaban dentro de nuestras posibilidades. La unión que desarrollamos los estudiantes de la Del Valle que participamos en ese evento fue algo notable e hizo la diferencia con respecto a los demás equipos y permitió que la Universidad del Valle se llevara el campeonato en forma más que dramática, pero con una demostración de trabajo en equipo, disciplina y esfuerzo muy superior al resto de competidores.

Una motivación grande para dejar constancia del trabajo hecho, me llevó a tomar este tema como base de mi trabajo profesional de tesis, adicionando mejoras sustanciales y realizadas de forma más técnica que las del vehículo que compitió, en parte por la experiencia acumulada en el trabajo diario desarrollado en áreas como mantenimiento y diseño.

Ha sido un trabajo muy completo que me ha llevado al aprendizaje y desarrollo de nuevos métodos y habilidades, como fue el uso de Autocad, como una herramienta de dibujo por computadora potente y muy versátil, el cual no estaba incluido todavía en el pñsum de estudios que llevé, el cual me facilitó la elaboración de los diferentes planos del proyecto, además de

reforzar la habilidad en máquinas herramientas, como el torno, la fresa y el cepillo. Gracias a este proyecto me vi en la necesidad de reacondicionar un torno y un cepillo de más de 50 años que estaban en desuso y hacerme de diferente equipo para metal mecánica, como soldador eléctrico y otros, de vital importancia para la construcción del vehículo y con la satisfacción de haber diseñado y fabricado yo mismo todas las piezas que se necesitaron en la construcción del vehículo eléctrico

Quiero agradecer de manera muy especial a mi compañero y gran amigo Luis Fernando King, quien sin su apoyo, empuje y ayuda no hubiera salido este proyecto, y que en los momentos de flaqueza me animó a seguir adelante, ante los diferentes obstáculos que se fueron presentando.

También agradezco mucho a mis padres, por haberme brindado el privilegio y la oportunidad de estudiar en esta Universidad y siempre me apoyaron y creyeron en mí, como también a los diferentes catedráticos que tuve a lo largo de mi carrera, que transmitieron sus conocimientos en las distintas áreas de estudio.

Dedico muy especialmente este trabajo a mi querido Abuelo Tono (†) que me guió en los primeros pasos dentro de la mecánica, y en el uso de máquinas herramientas, y aunque ya no esté físicamente conmigo, ha inspirado mucho del esfuerzo y la tenacidad puesta en la culminación de este proyecto.

Y no puedo terminar sin darle gracias a Dios y a la Virgen María por la fortaleza y las muchas bendiciones que recibí a lo largo de mi carrera en la Universidad.

Juan Carlos Pratdesaba

## CONTENIDO

PREFACIO .....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE FOTOGRAFÍAS .....	xii
LISTA DE PLANOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	3
A. El diseño mecánico.....	3
1. El diagrama de flujo en el diseño. ....	4
2. Análisis del diseño .....	10
3. Factor de seguridad .....	10
4. Confiabilidad .....	15
5. Costo.....	15
6. Seguridad .....	16
B. Sistema de dirección.....	17
1. Consideraciones generales.....	17
2. Requisitos de la dirección .....	17
3. El eje delantero .....	19
4. Geometría de la dirección .....	23
5. Elementos de mando .....	36
6. Mecanismos de dirección.....	39
C. La suspensión .....	40
1. Definiciones y fundamento de la suspensión .....	40
2. Funciones principales de los sistemas de suspensión.....	45
3. Elementos de las suspensiones .....	50
4. Suspensiones delanteras .....	51

D.	Vehículos eléctricos fórmula ELECTRATÓN.....	56
1.	Historia y antecedentes.....	56
2.	Electratón en Guatemala .....	57
III.	SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DEL ENIGMA.....	59
A.	Especificaciones y requisitos.....	59
1.	Reglamento de diseño y competencia categoría Electratón .....	59
2.	Otras especificaciones .....	62
B.	Diseños preliminares.....	64
C.	Evaluación de alternativas.....	68
D.	Diseño final.....	69
1.	Chasis.....	69
2.	Suspensión .....	73
3.	Dirección .....	78
E.	Construcción del prototipo.....	92
IV.	CONCLUSIONES.....	98
V.	RECOMENDACIONES.....	99
VI.	BIBLIOGRAFÍA.....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diseño del diagrama de flujo con retornos de retroalimentación .....	5
2. Eje delantero .....	20
3. Eje rígido .....	20
4. Mangueta .....	21
5. Un detalle en despliegue de la suspensión Mac Pherson.....	22
6. Disposición de mangueta en suspensión independiente de trapecio articulado.....	22
7. Sistema de suspensión Mac Pherson.....	23
8. Trayectorias teóricas de las ruedas (en ausencia de derrape y deslizamiento) .....	24
9. Sistema de Ackermann (A) y corrección de Jeantaud (B) .....	26
10. Geometría del cuadrilátero de Jeantaud.....	27
11. Rueda con eje de pivotamiento vertical.....	29
12. Ángulos de inclinación y caída.....	30
13. Efectos de la caída .....	31
14. Convergencia y divergencia.....	32
15. Ángulo de avance.....	33
16. Justificación de un radio de pivotamiento negativo .....	35
17. Tipos de movimiento en un vehículo.....	41
18. Esquema de la suspensión .....	42
19. Funcionamiento de un muelle .....	43
20. Inclinación de la carrocería por efecto de la fuerza centrífuga al tomar una curva .....	44
21. Oscilación de las ruedas con y sin amortiguación.....	46
22. Gráfica de vibraciones soportables.....	47
23. Movimiento lateral y vertical de las ruedas con eje rígido.....	51
24. Suspensión independiente de barras transversales desiguales.....	53

<b>25.</b>	Evolución del sistema clásico de suspensión Mac Pherson .....	54
<b>26.</b>	Esquema del primer sistema de suspensión .....	64
<b>27.</b>	Esquema del segundo diseño .....	66
<b>28.</b>	Esquema de la dirección con palanca de transmisión .....	67
<b>29.</b>	Esquema de la configuración de chasis en triciclo invertido .....	70

# LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
1. El Enigma en Cobán.....	57
2. Enigma en Parque Central.....	57
3. Enigma en la meta en última carrera .....	58
4. Enigma y Air Droopy al ganar el campeonato. ....	58
5. Enigma con el primer sistema de suspensión.....	65
6. El enigma con el segundo sistema de suspensión .....	67
7. Vista de los brazos transversales desiguales. ....	73
8. Suspensión trasera. Vista lateral. ....	74
9. Suspensión trasera. Vista trasera.....	74
10. Construyendo el chasis preliminar.....	92
11. Taladrando los pivotes .....	93
12. Torneando la barra para la cremallera .....	93
13. Vista de frente del torneado de la barra para la cremallera .....	93
14. Torneado de bases para chumaceras.....	94
15. Torneando piezas del Enigma. ....	94
16. Aplanado de canto de barra con fresa de 5/16". ....	94
17. Fresado de la barra.....	95
18. Fresado del piñón. Inicial .....	95
19. Fresado del piñón. Final .....	95
20. Cepillado de la cremallera. ....	96
21. Vista aérea del chasis final .....	96
22. Muleta delantera, pivote de dirección y llanta. ....	96
23. Diseño final del vehículo.....	97

## LISTA DE PLANOS

Plano	Página
1. Chasis preliminar del Enigma .....	71
2. Chasis final del Enigma.....	72
3. Muleta superior.....	75
4. Muleta inferior .....	76
5. Muletas y amortiguador.....	77
6. Dirección Ackermann .....	79
7. Brazo Ackermann.....	80
8. Radio máximo de giro .....	82
9. Piñón .....	85
10. Pivote de la dirección .....	87
11. Cubos de la dirección .....	88
12. King Pin.....	89
13. Conjunto del pivote de dirección .....	90
14. Sistema completo .....	91

## RESUMEN

Los vehículos eléctricos, categoría Electratón experimental, son vehículos monoplaza, diseñados por estudiantes universitarios para que desarrollen su capacidad creativa y constructiva, y pongan en práctica los conocimientos adquiridos en la universidad para la elaboración de estos vehículos.

Entre los elementos mecánicos de todo vehículo están la dirección y la suspensión, de los cuales depende en gran parte su buen desempeño. El objetivo está centrado en el diseño y construcción de un sistema integrado de suspensión y dirección, que sea eficiente y que permita disminuir las cargas por fricción y fuerzas externas en el desplazamiento, para un vehículo Electratón, específicamente diseñado para aplicarse a una configuración de triciclo invertido, es decir, dos llantas directrices delanteras y una llanta motriz trasera.

Se diseñó un sistema de suspensión independiente con brazos transversales desiguales y amortiguadores como la mejor solución por la estabilidad y sencillez del mecanismo. Para la dirección se utilizó un mecanismo de piñón y cremallera, con extensiones de sprokets y cadena para transmitir la fuerza del timón al piñón.

El prototipo se construyó utilizando la mayor cantidad de máquinas de mecánica de taller, elaborándose las piezas en distintos materiales, especialmente en aceros y bronces. Como resultado se obtuvo un vehículo estable, confiable, seguro y de conducción suave.

# I. INTRODUCCIÓN

En el preámbulo del nuevo siglo, la tecnología está tomando nuevas direcciones. Para buscar la máxima eficiencia al mínimo costo, aplicando las nuevas tendencias de conservación del medio ambiente, se han desarrollado desde hace varios años tecnologías alternativas que cumplan estos enunciados. En este renglón hay que destacar el transporte terrestre, donde se han hecho grandes esfuerzos de investigación y desarrollo de motores eléctricos para sustituir los contaminantes motores de combustión interna.

El diseño y construcción de vehículos eléctricos ha aumentado en los últimos años por parte de las casas automotrices mundiales; paralelamente en todo el mundo se han desarrollado las competencias de autos eléctricos, las cuales han tenido mucho éxito y han motivado a la creación de nuevos vehículos livianos y de excelente desempeño. Entre estas competencias, existe la categoría Fórmula Electrónica Experimental (F/Ex), que se define como el vehículo eléctrico en su mínima expresión, simplificado al máximo. Tiene la cualidad de estar constituido por vehículos de muy bajo costo y fácil construcción, por lo cual inevitablemente lleva a un más rápido desarrollo de la tecnología del transporte limpio y sustentable que tanto necesita el planeta.

Para que un vehículo eléctrico pueda ser eficiente, todos sus componentes mecánicos deben serlo, tanto la transmisión de potencia, el frenado, como los sistemas de suspensión y dirección. Con la experiencia previa adquirida en el primer campeonato Electrónica que se realizó en Guatemala, se observó que muchos vehículos afrontaron problemas de suspensión, que van desde pérdidas de energía y eficiencia, hasta aparatosos accidentes donde algún elemento mal diseñado de la suspensión o dirección no soportaba las cargas a las que era expuesto, caso que no se presentó en el Enigma.

La finalidad de este trabajo profesional fue desarrollar un sistema de suspensión delantera y dirección con el que se obtengan mejores resultados que los obtenidos durante ese campeonato, creando un vehículo más seguro y eficiente. El objetivo del sistema de suspensión es evitar que las vibraciones producidas por el camino se transmitan íntegramente al vehículo; el sistema de

dirección permite al conductor tener el control y maniobrabilidad del vehículo. Un buen diseño de estos dos elementos ayuda a mejorar la estabilidad del vehículo haciéndolo más seguro en curvas o virajes a altas velocidades.

Este diseño se elaboró basándose en la metodología indicada por el diseño mecánico, donde se tomó en cuenta diseños preliminares, normas de seguridad y construcción del modelo, y sus pruebas pertinentes. La investigación de las múltiples posibilidades ya desarrolladas facilitó la selección del diseño.

Al analizar los distintos sistemas de suspensión y dirección, se concluyó que el sistema de brazos transversales de longitud desigual resultaba más eficiente, que la suspensión Mac Pherson, ya que permitía una mayor adherencia a la superficie y una menor variación del ancho de vía del vehículo, entre otras ventajas. Una dirección de piñón y cremallera construida sobre elementos resistentes y con angulaciones Ackermann bien calculadas, permitía una conducción suave y libre de vibraciones, gracias al buen conjunto formado con la suspensión.

El nuevo diseño planteado se adaptó al vehículo F/Ex Enigma y superó a los primeros diseños comprobando que una buena suspensión y dirección aumenta la estabilidad y la adherencia de las llantas al suelo, haciendo de este, un vehículo de suave manejo y más seguro.

Para la elaboración de los planos se utilizó Autocad 2000. Para la construcción de los distintos elementos se utilizó equipo de mecánica de taller como lo fueron el torno, la fresa, el cepillo, taladro y la soldadura eléctrica; los materiales utilizados, fueron todos seleccionados de un mismo proveedor, para garantizar la calidad y resistencia de estos.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **A. El diseño mecánico**

El objeto de la ingeniería es proporcionarle a la sociedad lo que la civilización moderna requiere; le corresponde interpretar los principios científicos y aplicarlos para llegar a una meta definida. Es en este sentido que la ingeniería debe ser considerada como una ciencia aplicada.

Como tal, la ingeniería usa el conocimiento científico para lograr un objetivo específico. El mecanismo mediante el cual una necesidad es convertida en un plan funcional y significativo es llamado diseño. En otras palabras, diseño es la formulación de un plan, esquema o método para trasladar una necesidad a un dispositivo que, funcionando satisfactoriamente, cubra la necesidad original. De hecho, prácticamente todas las funciones técnicas dependen del diseño para el funcionamiento satisfactorio.

Diseñar consiste, básicamente, en la formulación de un plan para satisfacer una necesidad. Implica todo un proceso metódico de transformación de ideas en realidad. Se distinguen muchas formas de diseño (mecánico, eléctrico, industrial, etc.); sin embargo todos ellos coinciden en que tienen un propósito concreto que es la obtención de un resultado final que a menudo tiene una realidad física.

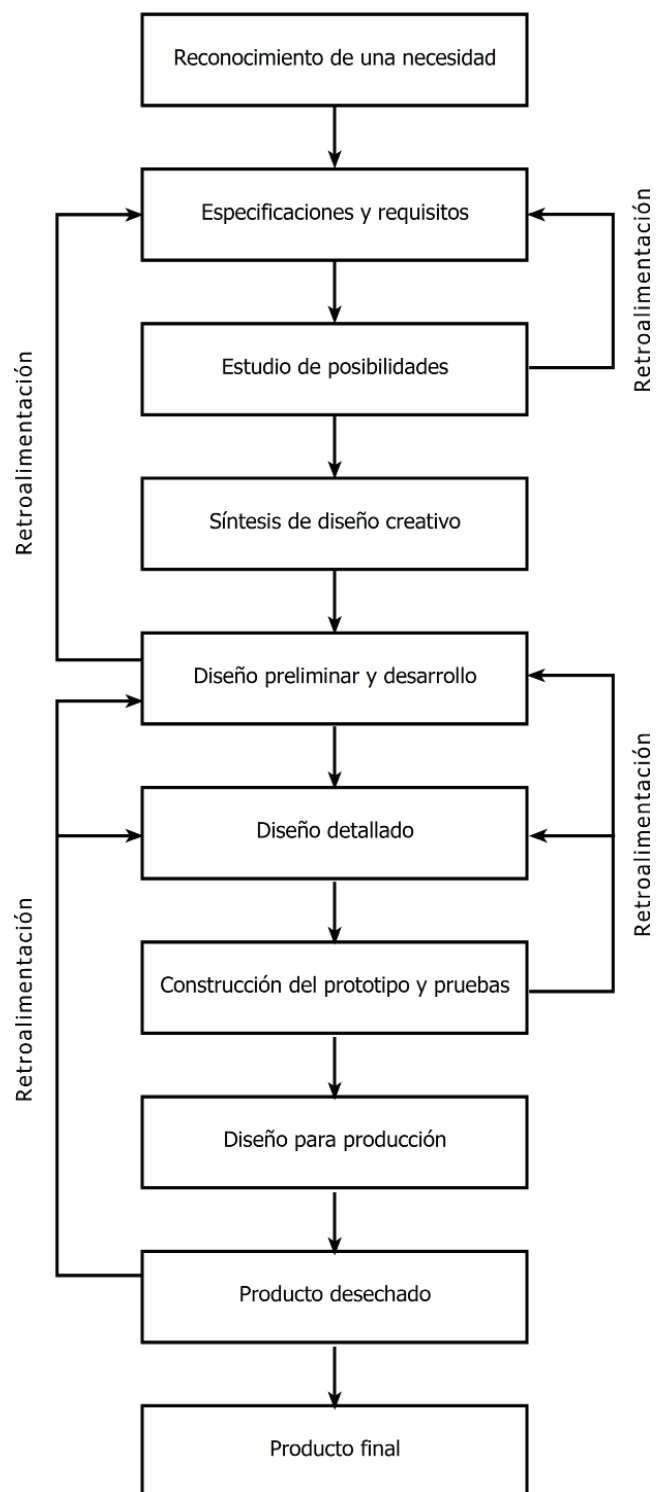
El proceso de diseño incluye varias fases: (a) determinación de la necesidad; (b) descripción del problema, que consiste en la definición clara de lo que se ha de remediar incluyendo todas las restricciones y condiciones aplicables; (c) síntesis, que es la fase creativa del proceso de diseño;

(d) análisis y optimización, consiste en la revisión y mejoramiento del proyecto de solución; (e) evaluación que es donde se prueba la eficacia del diseño y (f) presentación, que es la transmisión del diseño a la comunidad por medios orales, audiovisuales, escritos u otros.

El diseño mecánico consiste también en idear dispositivos o aparatos de naturaleza mecánica. Un diseño mecánico correcto deberá estar apegado a los estándares establecidos en los códigos y normas nacionales e internacionales vigentes. Cada sistema mecánico debería proveer soporte o transmitir movimiento o masa sin poner en riesgo la vida o propiedades; es decir que debe ser suficientemente robusto para operar de manera estable y segura.

Los diseños deberían considerar factores tales como: (a) precisión, es decir que el tamaño de la pieza sea exactamente determinado; (b) accesibilidad, que significa que la instalación debe estar dispuesta de forma tal que las operaciones de mantenimiento sean fáciles de realizar; (c) confiabilidad, es decir que el sistema sea capaz de proveer de soporte o transmitir movimiento de manera continua.

**1. El diagrama de flujo en el diseño.** Dependiendo del producto a diseñarse y del procedimiento particular de cada compañía, este diagrama puede variar. Este diagrama nos enseña la secuencia a seguir en el diseño mecánico para obtener un producto funcional y acorde a especificaciones pre-establecidas dentro del diseño. En la figura 1 se muestra un esquema del diagrama de flujo para un diseño mecánico. Para entender todo lo que debe considerarse en el proceso de diseño, a continuación se explican las características de cada etapa.



**Figura 1.** Diseño del diagrama de flujo con retornos de retroalimentación

**a. Reconocimiento de una necesidad.** Este aspecto del diseño puede tener su origen en un número cualquiera de causas. Los reportes de los clientes sobre el funcionamiento y la calidad del producto pueden obligar a un rediseño. Lo importante es poder detectar un problema o una necesidad que involucre el diseño. Esto nos guía hacia la búsqueda de soluciones que nos permitan satisfacer la demanda o la solución de un problema. La inestabilidad que se observa en los vehículos Electratón ha dado la pauta para buscar una solución a este problema: desarrollar un sistema adecuado de suspensión y dirección que reduzca la inestabilidad de los vehículos.

**b. Especificaciones y requisitos.** Habiéndose definido la necesidad, los requisitos que debe cumplir el diseño deberán estudiarse con mucho cuidado. En el diagrama de flujo se indica a este paso como especificaciones y requisitos. Con frecuencia la parte inicial de un proyecto resulta interrumpida en este punto debido a que las especificaciones están dadas en términos muy generales. Para contrarrestar esto, existen organizaciones gubernamentales, comerciales e industriales que fijan estándares y especificaciones para la elaboración de un sinnúmero de proyectos. Dentro de la categoría fórmula Electratón experimental existe un reglamento de diseño que especifica las normas generales de construcción de un vehículo con el objetivo primordial de mantener la seguridad de los pilotos de los vehículos.

**c. Estudio de posibilidades.** La finalidad de este estudio es verificar el posible éxito o falla de una propuesta tanto desde el punto de vista técnico como económico. Se debe dar respuesta a varias preguntas: ¿Va en contra de alguna ley natural? ¿Algunas especificaciones van más allá de lo que técnicamente está disponible en el presente? ¿Hay alguna dependencia con respecto a materiales difíciles de obtener? ¿El costo del producto final será tan alto como para eliminar completamente al producto en un futuro?

Con mucha frecuencia, como resultado del estudio de posibilidades, se hacen cambios en las especificaciones y requisitos, con el fin de que el proyecto tenga una mayor probabilidad de éxito.

**d. Síntesis del diseño creativo.** Esta fase constituye un reto siendo una parte muy interesante del diseño. A menos que se tenga restricciones, el diseñador podrá actuar como ingeniero, inventor y artista, todo a la vez; a esto se le llama crear.

La creatividad puede definirse como la síntesis de varias ideas nuevas y/o antiguas y de conceptos de tal manera que con ello se produzca una idea completamente nueva.

**e. Diseño preliminar y desarrollo.** Después de que se ha completado el proceso de síntesis del diseño creativo, habrá uno o varios diseños que satisfagan al conjunto dado de especificaciones y requisitos. Es necesario establecer cuál de las soluciones se usará para el diseño preliminar y desarrollo. Las bases para formular decisiones son muchas y variadas.

Al haber escogido una solución entramos al dominio llamado diseño preliminar y desarrollo. En este paso, se hacen dibujos mostrando máquinas o sistemas separados para determinar la configuración total y para establecer relaciones funcionales entre las diferentes partes de la máquina o sistema. Estos dibujos deben tener todas las dimensiones y notaciones importantes así como también vistas seccionales auxiliares que expliquen completamente el diseño propuesto. Además, se hacen estudios cinemáticos que incluyen dibujos completos de la máquina y los diagramas de sus ciclos.

Durante esta fase no se logran todas las especificaciones y requisitos. Por tanto, se observa la retroalimentación que sale del diseño preliminar hasta el apartado de especificaciones y requisitos, indicando con esto la necesidad de reducir o aumentar algunas especificaciones a fin de efectuar el diseño completo. Mientras se elaboran los bosquejos para el diseño preliminar, se puede trabajar en probar la idea, determinar algunas propiedades de los materiales, para evaluar el dispositivo, o bien, para determinar algún parámetro desconocido.

**f. Diseño detallado.** Se refiere al aparejo actual y dimensionamiento de todos los componentes individuales, tanto de los fabricados como de los comprados, que constituyen el

producto total, dispositivo o sistema. Se elaboran por separado dibujos detallados de cada uno de los componentes, mostrando todas las listas necesarias y todas las dimensiones y tolerancias, el material y el tratamiento térmico (si lo requiere), la cantidad de cada uno de los componentes por ensamble y el lugar donde se usarán los componentes. La información dada en los dibujos debe ser tal que en el taller se sepa específicamente como va a fabricarse la pieza.

Para obtener esta información, el ingeniero de diseño, trabajando con sus esquemas preliminares, deberá dimensionar las partes, escoger los materiales, especificar los componentes comerciales, etc., basado en las técnicas analíticas adecuadas y en su experiencia. Esto indica que deberá utilizar sus conocimientos de matemáticas, mecánica, resistencia de materiales, mecánica de fluidos, cinemática, vibraciones, metalurgia y procesos de taller.

**g. Construcción del prototipo y pruebas.** Después de haber completado todos los detalles, deberá enviar al taller los dibujos de sub-ensambles y ensambles, incluyendo los materiales y lista de las partes del diseño completo para la fabricación del modelo o prototipo.

En esta etapa, se fabrican las partes, se compran los componentes comerciales y la máquina o sistema después del ensamble esta lista para una evaluación y prueba. Al final del período de prueba se podrán o no conocer los datos que requieran cambios o modificaciones en el diseño preliminar o de un área específica del diseño. Después de haber efectuado los cambios y/o modificaciones necesarias, se incorporan los nuevos componentes en el ensamble del proyecto para continuar con las pruebas y evaluaciones. Este procedimiento de hacer continuas revisiones y mejoras al diseño se repite hasta que el ingeniero del diseño quede satisfecho y de que se cumpla con las especificaciones estipuladas. En ese punto, se envían todos los dibujos, partes y listas de materiales al departamento de ingeniería de la producción donde los dibujos son modificados de modo que se pueda diseñar la ruta completa para su producción.

**h. Diseño para producción.** Ahora se analizarán los cambios sugeridos en el diseño, con el fin de tener los mejores (a veces el más económico) métodos de producción. Utilizando nomenclatura moderna a esto se le llama análisis de valores, en consideración a que está adquiriendo cada vez más importancia en el diseño. Por ejemplo, el ingeniero encargado de la producción podrá considerar que una parte a fabricar podrá lograrse mediante estampado, vaciado o quizá forjado. Si se van a fabricar cantidades grandes, cualquiera de estos procesos resultará más económico que el manipulado de cada pieza en lo particular. Desde luego que al hacer una descripción deberán considerarse los costos de toda la herramienta necesaria, la cual puede amortizarse de acuerdo a la cantidad de partes a producir.

Otro ejemplo que el ingeniero de la producción debe considerar, es la posibilidad de combinar varias partes fabricadas en una sola o la de reemplazar algunas partes con equivalentes comerciales disponibles. También el ingeniero de la producción podrá considerar el reemplazo de alguno de los materiales con equivalentes satisfactorios de menor precio. Cuando se han terminado de hacer los dibujos para la producción, deberán enviarse al departamento de producción para considerar los productos desechables.

**i. Producto desechado.** Por lo general se hacen prototipos para producción, los cuales son probados y cualquier mal funcionamiento que no pueda corregirse fácilmente es regresado al departamento de diseño y desarrollo preliminar o al diseño detallado para su modificación.

La descripción anterior, no está descrita en todos sus detalles, así como tampoco es la única trayectoria a seguir en el diseño de un producto, dispositivo o sistema. Sin embargo, para apreciar en forma total la descripción mencionada del proceso de diseño, será necesario involucrarse diariamente con el procedimiento utilizado.

**2. Análisis del diseño.** Una vez que se ha seleccionado un diseño se hacen diseños detallados subsecuentes. En esta etapa es necesario hacer dibujos de planos mostrando los detalles, resultados de la prueba, hacer los cálculos necesarios, etc., lo que en última instancia dará como resultado el diseño del prototipo. En esta parte, el diseñador deberá especificar dimensiones, seleccionar componentes y materiales, y en general, considerar algunos aspectos tales como método de fabricación, costo, confiabilidad, utilidad y seguridad. El diseñador debe confiar en su habilidad analítica y entrenamiento en la ciencia de la ingeniería para lograr sus objetivos.

En este punto del estudio es necesario entender que el modelo escogido y los cálculos subsecuentes son realmente hechos en forma aproximada. Por tanto, deben conocerse completamente las diferentes suposiciones y limitaciones que se hicieron en la obtención de las ecuaciones usadas en el estudio de la ciencia de la ingeniería. El diseñador, en su afán de aplicar las ecuaciones adecuadas a su modelo matemático, podrá hacerle grandes simplificaciones que realmente no representen el caso real.

Por tanto, es muy importante tener en mente que un buen diseño basado en una buena teoría, le proporcionará al ingeniero de diseño bases racionales muy importantes para su trabajo. Desafortunadamente no todos los tópicos en el diseño tienen bases analíticas firmes para el trabajo que hacen. En tales casos, dependen de enfoques semi-racionales o empíricos para la selección de un problema o selección de un elemento de diseño.

**3. Factor de Seguridad.** A la luz de lo expuesto en la sección anterior referente a modelos analíticos, resulta razonable suplir las incertidumbres asociadas con cualquier diseño basado en tales modelos. Además, el diseñador deberá considerar en cualquier tiempo las siguientes incertidumbres adicionales:

- Variaciones en las propiedades de los materiales: Debido a que dos coladas en un horno no son exactamente iguales, y que algunos materiales pueden tener inclusiones, etc., las

propiedades de resistencia de los materiales dadas en las tablas son por lo general valores promedio. Si el valor es el dado por el fabricante lo más probable es que se refieran al valor mínimo.

- Efecto del tamaño con respecto a las propiedades de resistencia del material: Las tablas de propiedades, a menos que se indique otra cosa, listan los valores de la resistencia basados en pruebas de especímenes de ½ pulgada. Por lo general, componentes mayores fallan a esfuerzo menor que componentes menores hechos del mismo material.
- Tipo de carga: Una carga estática simple es fácil de reconocer, pero las cargas por impacto y cargas súbitamente aplicadas son más difíciles de analizar y si tomamos en cuenta la carga de fatiga aplicada y combinada con algunas cargas de choque (por ejemplo levas, eslabones o sistemas de alimentación), el análisis se vuelve más complejo.
- Efecto del maquinado o procesos de formación: Estas operaciones en la producción pueden, como generalmente ocurre, dar lugar a introducir concentración de esfuerzo y a esfuerzos residuales.
- Efecto del tratamiento térmico con respecto a las propiedades físicas del material: Un tratamiento térmico inadecuado puede producir esfuerzos residuales y agrietamientos. Además, el esfuerzo de cedencia real puede ser muy diferente del usado en los cálculos efectuados para el diseño.
- Efecto del desgaste con respecto a las funciones y vida de un miembro de una máquina: El constante rozamiento sin la lubricación adecuada puede reducir apreciablemente la vida de trabajo, por lo que debe tomársele en cuenta.
- Efecto del tiempo y ambiente en que se espera vaya a trabajar el dispositivo: Deben tomarse muchas precauciones cuando los componentes van a trabajar en regiones radiactivas o atmósferas corrosivas. Deben tomarse las debidas precauciones para el caso de esperarse que un material esté sujeto a climas adversos como las altas temperaturas y expuestos durante períodos prolongados de tiempo. También debe considerarse la condición a temperaturas menores que la normal.

- Requisitos específicos para vida y confiabilidad: Por ejemplo, una ametralladora debe ser confiable, pero por lo general tiene vida finita. Sin embargo, ciertas máquinas podrán tener vida casi infinita sin ser completamente confiables, pero puede esperarse que periódicamente puedan repararse.
- Todo lo referente a seguridad humana: Todos los diseños deben considerar la seguridad del operario y de las demás personas cercanas a, o en contacto con, la máquina o dispositivo. Las sobrecargas súbitas inesperadas pueden causar roturas o daño considerables.

Con el fin de tomar en cuenta en el diseño la lista de incertidumbres, los ingenieros emplean lo que se llama factor de seguridad. El diseñador deberá estar por completo seguro del significado cuando efectúa sus cálculos con tal factor o cuando fundamenta su diseño en tal factor. El uso inadecuado de un "factor de seguridad" puede resultar en ciertos casos, en desgaste innecesario del material o en otros casos en una falla operacional. Por tanto, debe definir el significado del uso del factor de seguridad.

Para materiales dúctiles se supone que los esfuerzos últimos a tensión y compresión tienen el mismo valor, o sea

$$N_n (\text{diseño}) = \frac{\text{esfuerzo último}}{\text{esfuerzo de trabajo o de diseño}} \quad (3-1)$$

$$N_y (\text{diseño}) = \frac{\text{esfuerzo de cedencia}}{\text{esfuerzo de trabajo o de diseño}} \quad (3-2)$$

Con frecuencia, se usa la Ecuación 3-2 porque el equipo mecánico es frecuentemente considerado como no funcional si algunos componentes importantes tienen cedencia. Un ejemplo típico podrá ser la cedencia permanente local que puede ser causada por el seguidor de una leva sobre la superficie de la leva.

Si un elemento de máquina o componente mecánico ha sido dimensionado (o sea, que sus dimensiones son conocidas), entonces el factor de seguridad está definido como:

$$N_n(\text{real}) = \frac{\text{Esfuerzo último}}{\text{Esfuerzo calculado}} \quad (3-3)$$

$$N_y(\text{real}) = \frac{\text{Esfuerzo de cedencia}}{\text{Esfuerzo calculado}} \quad (3-4)$$

Para tipos de problemas no lineales, tales como columnas o rodillos sujetos a falla por pandeo no deben usarse esfuerzos mayores al de cedencia y al último. En su lugar se utiliza la carga real de falla como base para determinar el factor de seguridad. Por tanto, se tiene:

$$N(\text{real}) = \frac{\text{Carga de falla}}{\text{Carga calculada}} \quad (3-5)$$

Para componentes mecánicos que están sujetos a cargas continuamente variadas, el factor de seguridad se basa en el límite de ruptura para carga cíclica del material utilizado. Sin embargo, debido a que se tienen cargas cíclicas y estáticas, la definición depende del análisis de fatiga de Soderberg. Joseph P. Vidosic sigue los siguientes razonables factores de seguridad. Estos factores están basados en la resistencia a la cedencia:

- $N = 1.25 - 1.5$  para materiales excepcionalmente confiables usados bajo condiciones controladas y sujetos a carga y esfuerzos que puedan determinarse con exactitud. Una consideración muy importante es que casi siempre se usan para pesos pequeños.
- $N = 1.5 - 2$ : para materiales bien conocidos, para condiciones de medio ambiente razonablemente constantes y sujetos a carga y esfuerzos que puedan calcularse con facilidad.

- $N = 2 - 2.5$ : para materiales promedio que trabajen en condiciones de medio ambiente ordinarias y sujetos a carga y esfuerzos que pueden calcularse.
- $N = 2.5 - 3$ : para materiales poco experimentados o para materiales frágiles en condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo.
- $N = 3 - 4$ : para materiales no experimentados usados para condiciones promedio de medio ambiente, carga y esfuerzo.
- $N = 3 - 4$  deberá también usarse con materiales mejor conocidos que vayan a usarse en condiciones ambientales inciertas o sujetos a esfuerzos inciertos.
- Cargas repetidas: son aceptables los factores indicados en los puntos 1 al 6, pero debe aplicarse el límite de ruptura por carga cíclica o esfuerzo de fatiga en lugar del esfuerzo de cedencia del material.
- Fuerza de impacto: Son aceptables los factores dados para  $N = 2 - 4$ , pero deberá incluirse un factor por impacto cuando el diseño o la pieza esté expuesta a impactos determinados.
- Materiales frágiles: si se consideran a la resistencia última como la máxima teórica, los factores indicados anteriormente deberán multiplicarse por 2.
- Para el caso deseable de tener factores de seguridad elevados, deberá efectuarse un análisis muy completo del problema antes de decidir sobre su uso.

En la mayoría de situaciones, la selección del factor de seguridad está estipulado por un código o por requisitos ya fijados. Los códigos ANSI, ASME, ASTM, DIN u otros estipulan entre sus estándares factores ya definidos en pruebas hechas por estas organizaciones.

Otras veces la selección del factor de seguridad apropiado es empírico y depende mucho de la experiencia industrial acumulada. Cuando un dispositivo tiene mucho tiempo de ser usado, los factores referentes a su comportamiento son confiables.

También se han empleado métodos estadísticos para obtener factores de seguridad. Este método toma en cuenta la variación tanto en dimensiones como en la resistencia del componente mecánico. Generalmente resulta un factor menor que el basado en la teoría. Sin embargo, el enfoque estadístico es tan sólo de interés pasajero para los diseñadores modernos, sobre todo en aquellas áreas en las que para ciertos componentes se tienen muchos datos experimentales acumulados.

**4. Confiabilidad.** Los productos de consumo y maquinaria industrial son intensamente evaluados en confiabilidad de operación y vida esperada. Una de las bases más importantes para la confiabilidad del producto es su diseño y es lógico que el diseñador deberá conocer algunas pautas a seguir. La confiabilidad es la posibilidad de que un dispositivo ejecute sin fallas una función específica bajo ciertas condiciones dadas por un período de tiempo conocido.

**5. Costo.** Sin lugar a dudas, el costo es un factor muy importante a la hora de elaborar un diseño. La realización de un diseño que sea económico depende mucho de la experiencia del diseñador, del conocimiento, el ingenio y la habilidad para utilizar elementos o dispositivos ya existentes para elaborar un diseño práctico, económico y eficiente.

Actualmente se maneja una metodología llamada "análisis de valores" atribuida originalmente a L. D. Miles. Brevemente, el análisis de valores es el procedimiento organizado de reducción del costo que cubren las fases del diseño, producción, materiales y distribución manteniendo la confiabilidad del producto. Con este análisis debe ser posible lograr un diseño satisfactorio y funcional con un mínimo de materiales caros y que sea consistente con la vida y desgaste de las partes y del medio ambiente en que se le use. Además, se deben evaluar otras consideraciones de costos para cada diseño, tales como el método de fabricación, la tolerancia, el uso de componentes comerciales disponibles en el mercado, el método de ensamble, el trabajo herramental o maquinado, la cantidad a producir y la simplicidad de mantenimiento. Por último, el número de componentes que constituyen un ensamble debe tratarse de conservar al mínimo posible.

**6. Seguridad.** El dispositivo o producto debe estar diseñado de tal forma que sea seguro para el operador y el espacio que le rodea. La seguridad industrial juega un papel muy importante para el diseñador en este punto. Para poder proporcionar los medios necesarios para un equipo seguro el diseñador debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Se deben proporcionar cubiertas o protecciones a los componentes móviles próximos al operario.
- Las partes que puedan causar daño al operario no deberán ser lanzadas por el equipo.
- El diseño debe ser tal que para cualquier tipo de ajuste, lubricación o mantenimiento general pueda realizarse con poca dificultad o peligro.
- El equipo deberá estar sin trabajar hasta en tanto, manos, pies, brazos o alguna otra parte del cuerpo del operario esté en la zona de trabajo (por ejemplo prensas o guillotinas).
- Deben evitarse esquinas y orillas puntiagudas.
- El equipo eléctrico debe estar adecuadamente protegido y conectado a tierra.
- Deberá proporcionarse ventilación natural o forzada en caso de que la atmósfera esté contaminada con humos, olores u otras partículas.
- Deberá tomarse precauciones para evitar exponerse a varias formas de radiación (rayos X, ultravioleta, materiales radiactivos, etc.).

Este listado enumera solamente una pequeña parte de los riesgos que un diseñador debe evitar para proporcionar seguridad adecuada. Para cada diseño específico el ingeniero deberá instruirse a sí mismo con respecto a las peculiaridades singulares de su problema refiriéndose a los códigos y/o estándares apropiados.

## **B. Sistema de dirección**

**1. Consideraciones generales.** Se denomina dirección al conjunto de mecanismos que tiene como misión permitir al conductor girar las ruedas delanteras según su voluntad, de forma que el vehículo tome la trayectoria deseada, haciendo así al vehículo girar en las curvas, evitar colisiones con otros vehículos y/o maniobrar para aparcar. Últimamente existen soluciones integrales de dirección en donde todas las ruedas son directrices.

Los principales problemas en el diseño de los mecanismos y elementos que integran la dirección de un automóvil los encontramos, por un lado, en lograr la reversibilidad controlada del mecanismo de dirección, es decir permitir al conductor tener la suficiente sensibilidad sobre la carretera como para proporcionar un control efectivo del vehículo sin que las irregularidades del terreno puedan repercutir negativamente en la fiabilidad del control del vehículo o en el confort de la dirección, y por otro lado, en la búsqueda de una solución de compromiso entre un mecanismo lo suficientemente ligero como para permitir su accionamiento en maniobras a baja velocidad (aparcamiento), y lo suficientemente pesado como para asegurar una estabilidad aceptable en la trayectoria del vehículo en velocidades medias y altas.

**2. Requisitos de la dirección.** El mecanismo de la dirección es, sin duda uno de los más importantes del vehículo. De la dirección depende en gran parte la seguridad en carretera que presente el vehículo, por ello debe reunir una serie de cualidades que proporcionen al conductor, durante la marcha del vehículo, la comodidad y seguridad necesarias en la conducción. Estas cualidades son las siguientes:

- Reversibilidad controlada
- Suavidad
- Precisión
- Estabilidad

**a. Reversibilidad controlada.** Esta estriba en el control de las ruedas y de la trayectoria del vehículo sin que las irregularidades del terreno afecten el control de la dirección, pero que al mismo tiempo permita la capacidad autodireccional de la misma. Esto se consigue mediante la adecuación de los elementos de transmisión de que consta el mecanismo de la dirección.

**b. Suavidad.** El mecanismo debe permitir una conducción lo suficientemente suave lograr para permitir una buena maniobrabilidad sin necesidad de realizar esfuerzos excesivos sobre el volante; ello se consigue bien mediante el adecuado sistema desmultiplicador o bien mediante servomecanismos de asistencia.

**c. Precisión.** Si la dirección es excesivamente suave nos encontraríamos con una significativa pérdida de precisión y control, resultaría muy difícil durante la conducción evitar que el volante no se moviera ligeramente en uno u otro sentido, lo que provocaría que el vehículo circulase, en mayor o menor medida, dando bandazos de un lado a otro de la carretera. Por otro lado, si la dirección resulta excesivamente dura, la conducción resultaría fatigosa e imprecisa. Entre las causas que pueden hacer que el sistema de dirección resulte impreciso cabe destacar:

- El excesivo juego en los mecanismos de la dirección.
- El alabeo o abolladura de las llantas de las ruedas.
- Un desgaste desigual en los neumáticos.
- El desequilibrio de las ruedas y el *shimmy* (vibración) que esto produce y que se transmite por medio de los mecanismos de la dirección desde las ruedas hasta el volante.
- La inadecuada presión de inflado de los neumáticos, que al no ser igual en ambas ruedas directrices provocará que el vehículo tienda a desviarse hacia uno de los lados.

**d. Estabilidad.** Es la característica básica de la dirección, se consigue como conjunción de todas las anteriores y resulta fundamental para garantizar la seguridad de la conducción, ésta depende también de factores como la fiabilidad del mecanismo y la calidad de los materiales empleados.

### **3. El eje delantero.**

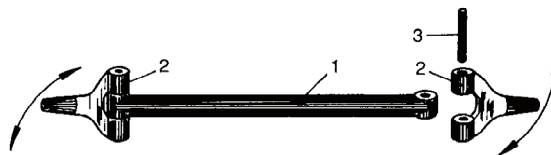
**a. Funciones del eje delantero.** El eje delantero del vehículo tiene como funciones sostener el peso de la parte anterior del vehículo y permitir el movimiento de viraje de las ruedas delanteras, necesario para la conducción del vehículo a lo largo de las curvas del camino a recorrer.

La disposición y construcción del eje delantero debe ser de tal manera que ofrezca la máxima facilidad de maniobra de la dirección al conductor, al mismo tiempo que la mayor seguridad de la misma, ya que un fallo de ésta puede producir peligrosos accidentes. Estas exigencias de facilidad de manejo y seguridad se han incrementado en la categoría Electración debido a los múltiples accidentes ocurridos durante las competencias.

Este elemento del automóvil debe mantenerse correctamente ajustado dentro de unas posiciones y condiciones establecidas y requeridas para que su funcionamiento sea perfecto.

**b. Disposición del eje delantero.** A fin de permitir el movimiento de dirección de las ruedas, el eje delantero de los automóviles no se presenta como una sola pieza rígida con las ruedas montadas en sus extremos, sino que está formado, como se muestra esquemáticamente en la figura 2, por una pieza central (1) unida al bastidor o cuerpo del vehículo por la suspensión delantera. Esta pieza tiene en cada uno de sus extremos una pieza (2) sobre la que va montada la rueda y que, estando articulado a la pieza central, hace posible el giro de las ruedas. A la pieza central se le da el nombre de cuerpo del eje delantero, a las piezas extremas sobre las que se montan las ruedas se les denomina manguetas o articulaciones delanteras. Como puede

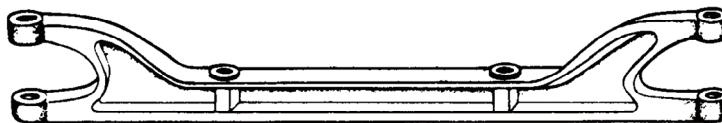
apreciarse en la figura B.1, las manguetas se unen al cuerpo por medio de unos ejes (3) que permiten su giro y que reciben el nombre de ejes de manguetas o ejes de articulación.



**Figura 2.** Eje delantero

Esta disposición esquemática del eje delantero corresponde a los vehículos con suspensión de eje rígido, actualmente utilizadas casi exclusivamente por vehículos de carga industriales. En la mayoría de los automóviles, en los que la suspensión delantera es independiente, la parte central del eje no existe, pudiendo considerarse sustituida por el travesaño anterior del bastidor o carrocería y las manguetas se articulan a los elementos de la suspensión en diferentes formas, según el tipo de ésta.

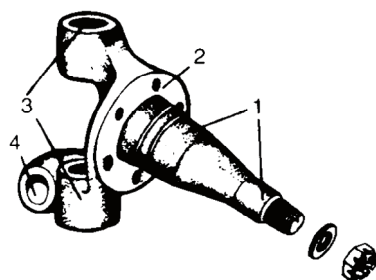
**1) Disposiciones del eje rígido.** En estas disposiciones el cuerpo de eje delantero es, en su forma más corriente, una pieza forjada de acero de alta resistencia al choque. En su parte central suele tener forma de viga con sección en I, y extremos de formas variadas según el sistema empleado para el acoplamiento de la articulación, en algunos casos los extremos tienen forma de horquilla (figura 3). El cuerpo está provisto de extensiones para su fijación a los muelles de suspensión.



**Figura 3.** Eje rígido

Las manguetas son también piezas forjadas de acero de alta resistencia al choque. Son parecidas a la de la figura 4. La parte que constituye el verdadero eje de la rueda tiene unas

superficies cilíndricas rectificadas en las que se ajustan los cojinetes sobre los que se monta la rueda. Una superficie plana, perpendicular al eje de la rueda, sirve de soporte al mecanismo del freno, que se atornilla en los agujeros sobre la superficie. Dos expansiones taladradas sirven de alojamiento a los cojinetes del eje de mangueta; en las manguetas que se montan en los cuerpos con los extremos en forma de horquilla, solamente hay una de estas expansiones taladradas. Un agujero en la parte posterior sirve para acoplar a la mangueta la palanca por la que se transmite el esfuerzo para lograr el movimiento de orientación a las ruedas. Esta palanca se llama palanca



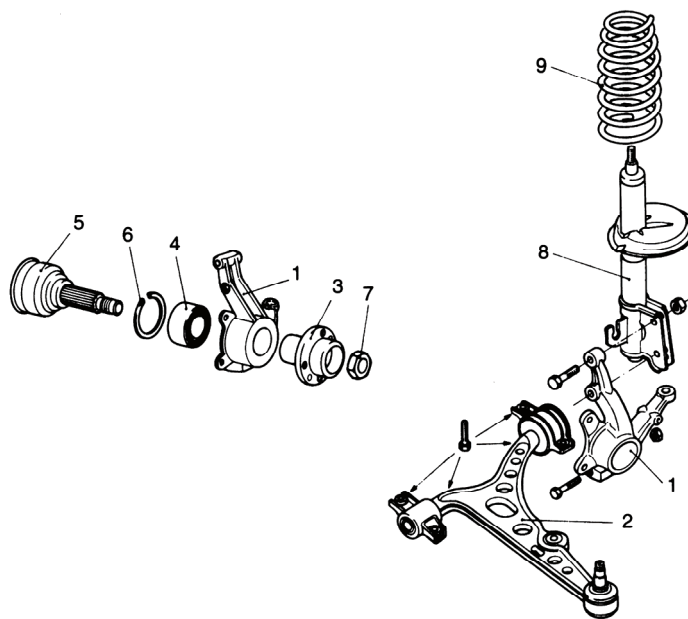
de mando, y es la que recibe el movimiento de los mecanismos de la dirección, la palanca inferior, llamada palanca de acoplamiento, sirve para transmitir el movimiento de orientación a la mangueta del lado opuesto; en algunas disposiciones de los mandos de dirección, las palancas de mando y acoplamiento son una sola.

**Figura 4.** Mangueta

El eje de articulación es una pieza de acero de forma cilíndrica, debido a los considerables esfuerzos a que está sometido durante el funcionamiento, se construyen de acero de elevada resistencia mecánica y al mismo tiempo de elevada resistencia al desgaste para evitar juegos excesivos, que harían perder precisión en la dirección del vehículo con el consiguiente peligro de accidente. Sus formas constructivas y disposición en el cuerpo y mangueta, son muy variadas.

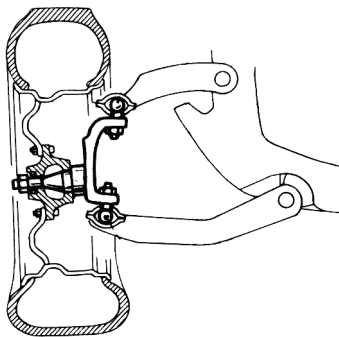
**2) Disposiciones con suspensión independiente.** En este caso el cuerpo del eje delantero no existe y las articulaciones se acoplan al bastidor o carrocería en combinación con los elementos de suspensión, variando su disposición en función de los tipos de suspensión.

Existe una disposición que recuerda en cierto modo, a la disposición clásica de eje rígido con extremos en horquilla, ya que la mangueta está unida a un bulón de giro sostenido en una pieza que hace las funciones de horquilla y a su vez soporta la suspensión Mac Pherson.



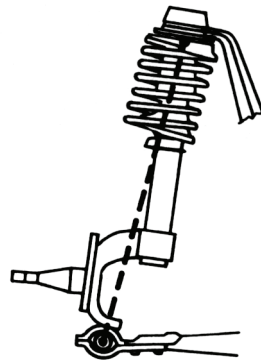
**Figura 5.** Un detalle en despliegue de la suspensión Mac Pherson

En la figura 6 se observa un detalle de una suspensión independiente. Un sistema corrientemente utilizado en las suspensiones de trapecio articulado es aquel que utiliza el principio de barras paralelas. En este caso la mangueta no dispone de bulón, y su giro es posible por estar unido mediante articulaciones de rótula esférica a los extremos de los brazos superior e inferior de la suspensión.



**Figura 6.** Disposición de mangueta en suspensión independiente de trapecio articulado

En las suspensiones delanteras tipo Mac Pherson la disposición más corriente es unir rígidamente la parte superior de la mangueta al cuerpo del amortiguador y por su parte inferior al extremo del brazo oscilante mediante una articulación de rótula. El eje de giro de la mangueta en este caso es una línea ideal que une los puntos de fijación del amortiguador en la carrocería y la articulación de rótula en el brazo oscilante (figura 7).



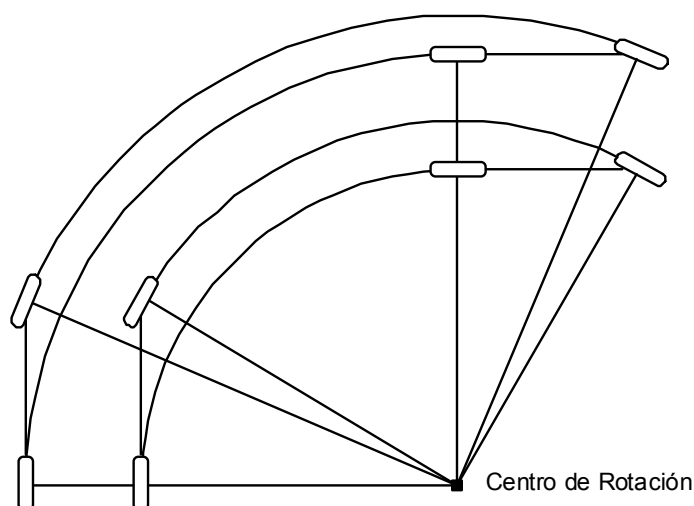
**Figura 7.** Sistema de suspensión Mac Pherson

**4. Geometría de la dirección.** Se entiende por geometría o alineación de la dirección en un vehículo a la condición geométrica que tienen que cumplir todos los órganos que afectan a la dirección (elementos de mando, ruedas y suspensión) para determinar la posición de las ruedas en movimiento sobre el terreno y que influyen de forma determinante sobre el comportamiento dinámico del vehículo. En general, en la geometría de la dirección nos encontramos con dos aspectos independientes, la geometría de giro y la geometría de las ruedas. Mediante la conjunción de ambas se ha de lograr que el vehículo tome la trayectoria deseada por el conductor con la máxima precisión y haciendo la conducción suave y segura.

**a. Geometría de giro.** Cuando un vehículo toma una curva, la trayectoria a seguir por una y otra rueda directriz no es la misma, ya que cada una de ellas tiene distinto radio de

curvatura. Si la orientación de ambas ruedas fuera la misma en todo momento, cada una de ellas giraría con respecto a un centro de rotación distinto, lo que supondría que una de las ruedas sería arrastrada por la otra puesto que las ruedas, al girar en centros de rotación distintos, tenderían a variar la distancia entre ellas; dado que esto no se puede permitir debido a la rigidez de los mecanismos de tracción y de dirección, las ruedas sufrirían un deslizamiento lateral que provocaría un desgaste inaceptable en los neumáticos acortando su vida drásticamente.

Debido a esto las ruedas deben tomar en una curva orientaciones diferentes y tales que las prolongaciones de sus ejes se corten en un centro de giro común (ver figura 8). De la misma manera las ruedas traseras se deben comportar respecto de las delanteras, ya que todo el vehículo tiene que girar como un sólido rígido y por tanto cualquier par de puntos del mismo deben recorrer trayectorias paralelas entre sí. Esto implica un mismo centro de rotación para todo el vehículo, para lo cual es condición necesaria y suficiente el hecho de que las cuatro ruedas del vehículo tengan en todo instante un mismo centro de rotación.



**Figura 8.** Trayectorias teóricas de las ruedas (en ausencia de derrape y deslizamiento)

## **b. Cinemática de los sistemas de dirección.**

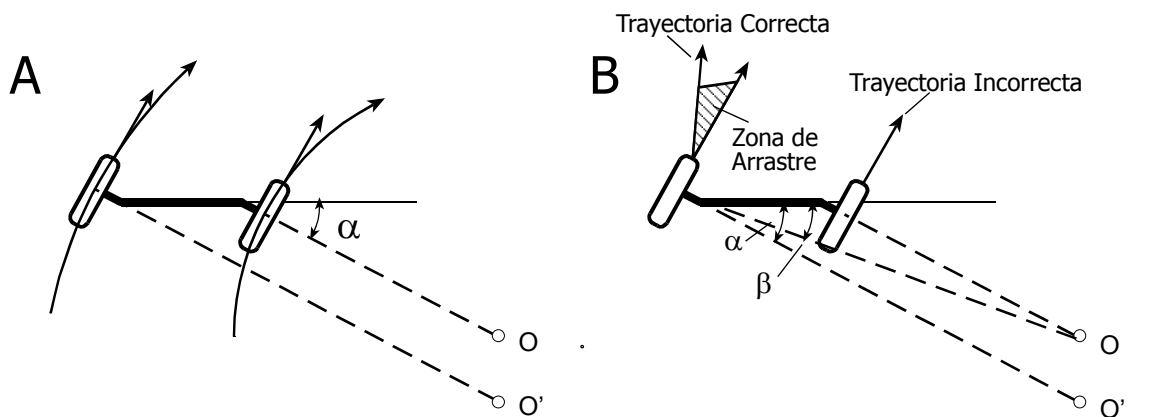
**1) Eje rígido.** Los primeros automóviles basaban su sistema de dirección en un eje delantero rígido que giraba en forma solidaria con las ruedas como respuesta al giro del volante por parte del conductor. Con este sistema no existían problemas de centros de giro distintos para las distintas ruedas del vehículo. Este sistema presenta numerosos inconvenientes:

- La dirección resulta francamente inestable; cualquier irregularidad en el terreno influye de forma importante en la dirección, esto requiere que se tenga que estar actuando constantemente sobre el volante no sólo para girar, sino también para mantener la dirección de marcha del vehículo.
- Los esfuerzos requeridos para hacer girar el eje hacen que, para vehículos muy ligeros, se requieran desmultiplicaciones muy importantes junto con volantes de grandes dimensiones y esfuerzos elevados sobre el volante para conseguir el direccionamiento, mientras que lo hace absolutamente inviable para vehículos como los actuales (de un peso notable). Además la estabilidad estaba absolutamente reñida con la maniobrabilidad del vehículo, ya que para evitar tener que aplicar esfuerzos excesivamente elevados sobre el volante, los vehículos tenían que recurrir a acortar sus ejes delanteros, llegando incluso a soluciones con una sola rueda delantera, lo que conllevaba una evidente reducción de la estabilidad.
- El radio de giro del vehículo resultaba excesivamente amplio, puesto que el eje delantero tan sólo puede ser girado hasta cierto punto. Esto supone poca maniobrabilidad para el vehículo.
- La materialización de las suspensiones delanteras resulta muy compleja, debería adoptarse una rótula esférica, o bien montar el eje delantero sobre un bastidor o estructura giratoria respecto a la caja del vehículo.

- En la gran mayoría de los vehículos actuales, las ruedas delanteras no sólo son directrices, sino también motrices, y el hecho de que el eje delantero girase supondría una gran complicación mecánica en lo que se refiere a sistemas de transmisión.

Por todas estas causas, el sistema de dirección de eje delantero rígido fue abandonado a finales de siglo XIX, quedando limitado a vehículos especiales de usos muy específicos y velocidades francamente bajas (que permiten desmultiplicaciones muy notables), como es el caso de vehículos para movimientos de tierras.

**2) Sistema de Ackermann.** Para evitar tener que girar todo el eje delantero se optó por hacer girar las dos ruedas sobre puntos de pivotamiento distintos. El sistema de Ackermann (figura 9) reducía en gran medida el valor del par que era preciso aplicar al varillaje de la dirección al reducirse de forma notable el valor del radio de pivotamiento de las ruedas, que multiplicado por la fuerza de rozamiento nos da el valor del momento de direccionamiento de las ruedas.



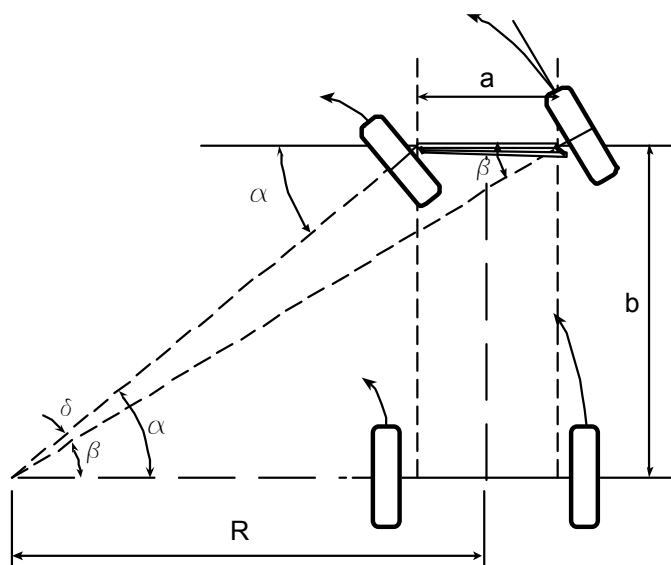
**Figura 9.** Sistema de Ackermann (A) y corrección de Jeantaud (B)

Esto permitía reducir en gran medida el grado de desmultiplicación en el mecanismo de dirección y, como consecuencia, aumentar la capacidad de maniobrabilidad de los vehículos, posibilitando la circulación de los mismos a velocidades muy superiores a las que permitía el sistema de eje rígido.

El sistema de Ackermann evitaba todos los inconvenientes vistos para el eje rígido, pero introducía un nuevo problema; al girar un mismo ángulo las dos ruedas directrices, las trayectorias recorridas por ambas no eran paralelas y, por lo tanto, las ruedas deslizaban en las curvas tal y como hemos expuesto anteriormente (figura 9 B).

Para evitar el deslizamiento, y con el fin de que las ruedas recorran trayectorias paralelas concéntricas, es preciso disponer de un mecanismo que permita girar las dos ruedas delanteras según dos ángulos progresivamente diferentes. La condición geométrica que debe cumplirse para conseguir este efecto se traduce a:

$$\cotan \alpha - \cotan \beta = \frac{\text{Ancho de vía (a)}}{\text{Distancia entre ejes (b)}}$$



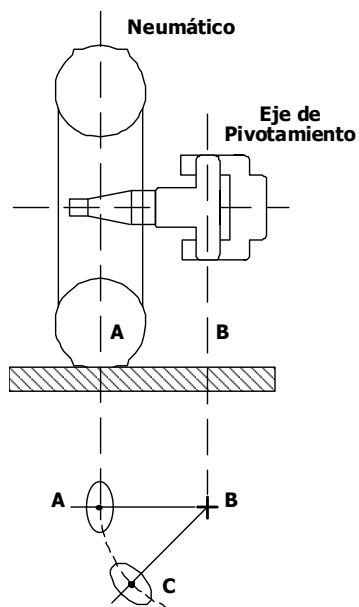
**Figura 10.** Geometría del cuadrilátero de Jeantaud

Aunque no existe ningún mecanismo simple que se ajuste a esta condición geométrica de forma exacta, Charles Jeantaud construyó en Francia en 1878 un mecanismo que se ajustaba de forma bastante precisa a esta condición, para un intervalo de valores en los ángulos girados por las ruedas comprendido entre  $25^\circ$  y  $27^\circ$ , para valores de los ángulos menores las desviaciones en los valores son de un 2% aproximadamente, mientras que para ángulos mayores las desviaciones crecen de forma considerable. Jeantaud encontró que el viraje correcto se conseguía con bastante aproximación cuando la orientación de los brazos de la dirección era tal que sus prolongaciones se cortaban en la mitad del eje trasero. Estas desviaciones se ven también modificadas, en parte por el hecho de que las ruedas no se encuentran en un plano vertical y suelen presentar una ligera convergencia, y en parte, por la acción de la deriva, que estudiaremos también más adelante. El sistema de Jeantaud se ha impuesto actualmente como solución cinemática de los sistemas de dirección de la totalidad de los vehículos automóviles.

**c. Geometría de las ruedas.** Las distintas características que determinan la geometría de las ruedas con respecto del eje delantero son:

- Angulo de caída.
- Angulo de salida.
- Angulo de avance.
- Convergencia.

Considérese de forma muy simplificada una rueda delantera de un vehículo automóvil con su mangueta y eje de pivotamiento (figura 11). Supongamos que en este montaje tanto la rueda como el eje de pivotamiento se mantienen verticales. Cualquier tipo de esfuerzo que deba soportar la rueda, bien sea debido al propio peso del vehículo o a las fuerzas originadas durante la conducción, se transmitirán a sus elementos de fijación, así como también al eje de pivotamiento. La distancia A-B hace las veces de un brazo de palanca a través del cual se transmiten al eje de pivotamiento los esfuerzos que se originan en la rueda. Por tanto, los



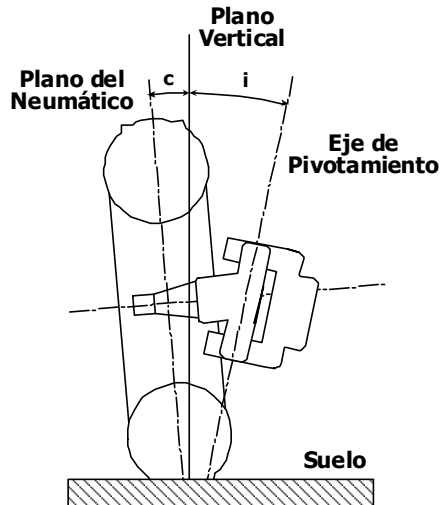
esfuerzos que ha de soportar el eje de pivotamiento serán tanto mayores cuanto mayor sea esta palanca, es decir la distancia A-B.

Cuando en un montaje como el indicado, el conductor quiere hacer girar la rueda, no sólo debe hacer que la mangueta gire alrededor del eje de pivotamiento, sino que ha de hacer que la rueda recorra el camino A-C.

**Figura 11.** Rueda con eje de pivotamiento vertical

La primera conclusión a la cual se llega como consecuencia de las observaciones anteriores, es que para ahorrar trabajo y esfuerzos innecesarios, debería reducirse todo lo posible la distancia A-B. Esto significa que en el ejemplo de la figura, la intersección de la prolongación del eje de pivotamiento con el suelo (punto B) debería hacerse coincidir con la huella del neumático para que éste al girar, en lugar de desplazarse pudiera girar sobre sí mismo.

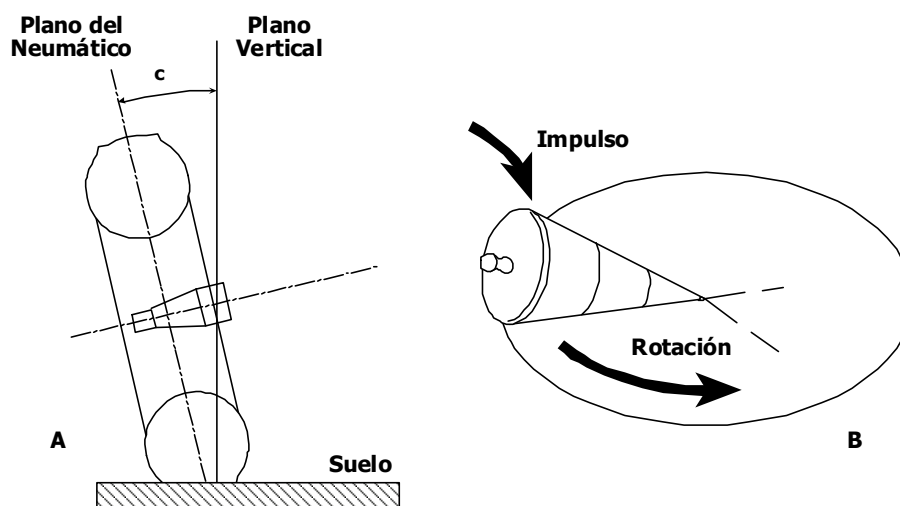
En la práctica esto se consigue aproximando el eje de pivotamiento todo lo posible a la rueda e inclinándolo según la figura 12, formando el ángulo "i" con respecto del plano vertical, de forma que el punto B esté cerca del A. El ángulo "i" se denomina inclinación del eje de pivotamiento. En ocasiones este ángulo se llama también ángulo de salida o *King-Pin*. Por razones similares, también se inclina la rueda con respecto del plano vertical formando el ángulo "c", esta inclinación también facilita el pivotamiento de la rueda en la medida que el punto A se aproxima más aun al B. Al ángulo "c" se le denomina *angulo de caída* y, en ocasiones también *Camber*.



**Figura 12.** *Ángulos de inclinación y caída*

El ángulo de caída tiene por objeto el hacer que la zona y neumático que está en contacto con el suelo quede lo más cerca posible de la línea que pasa por el eje de la articulación. Con esta condición se logra una mayor facilidad de manejo de la dirección. También se logra evitar que las irregularidades del terreno produzcan esfuerzos excesivos y perturbaciones sobre los dispositivos de mando de la dirección, haciendo menos fatigoso y más seguro el trabajo del conductor. En la mayoría de los vehículos se utilizan ángulos de inclinación y de caída, cuyas magnitudes son el resultado de ponderar adecuadamente las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Por lo general, la caída es positiva, lo que significa que la mangueta está inclinada hacia abajo. No obstante, en algunos vehículos, dependiendo del diseño y de la carga la caída puede ser nula (rueda vertical) o incluso la mangueta puede estar ligeramente inclinada hacia arriba (caída negativa).

**1) Los efectos de la caída.** En la figura 13 se representa, de forma exagerada, la inclinación y deformaciones de un neumático delantero con caída positiva. Por efecto de la inclinación de la rueda, la zona de contacto con el suelo no estará centrada en la banda de rodadura, sino desplazada hacia el borde exterior. Una caída excesiva puede, por tanto, tener una influencia notable en el desgaste de los neumáticos.



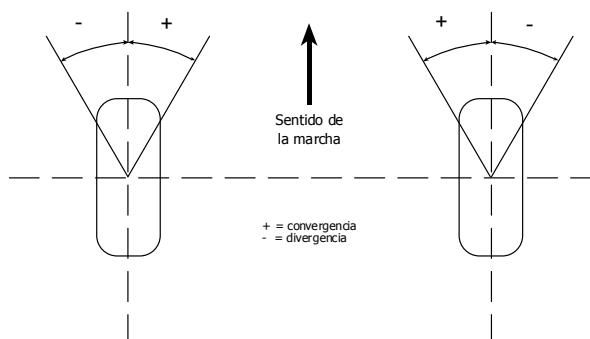
**Figura 13.** Efectos de la caída

Así mismo, la caída hace que las dos ruedas tiendan a separarse hacia el exterior del vehículo. Para comprender mejor basta con analizar el movimiento de un trompo (superficie cónica), como respuesta a un impulso que se le ejerciera, según se puede observar en la figura B.6, el trompo describiría un círculo con centro en el vértice del cono. En la figura B.7 se muestra de forma esquemática este mismo fenómeno experimentado por las ruedas directrices con caída positiva en un automóvil.

Esta situación, de no ser compensada de alguna forma, traería consigo un derrapaje continuo de las ruedas directrices que darían lugar a un desgaste inadmisibles de la banda de rodadura. Para compensar esta situación se aplica a las ruedas delanteras una graduación adicional: la convergencia.

**2) La Convergencia.** Consiste en cerrar las ruedas ligeramente por la parte delantera y abrirlas por la trasera (convergencia positiva), de tal modo que la tendencia a abrirse producida por la caída quede neutralizada.

A la convergencia positiva se le denomina también *Toe-in*; cuando las ruedas directrices están abiertas por delante y cerradas por detrás, se dice que la convergencia es negativa o *Toe-out*. Otra circunstancia que afecta al comportamiento de la dirección está relacionada con la resistencia a la rodadura de las ruedas. El eje motriz de un vehículo transmitirá su empuje al bastidor y éste, a través del eje delantero a las ruedas directrices. En este caso el eje tira de la rueda y ésta, como consecuencia de su resistencia a la rodadura, tiende a quedarse retrasada.



**Figura 14.** *Convergencia y divergencia*

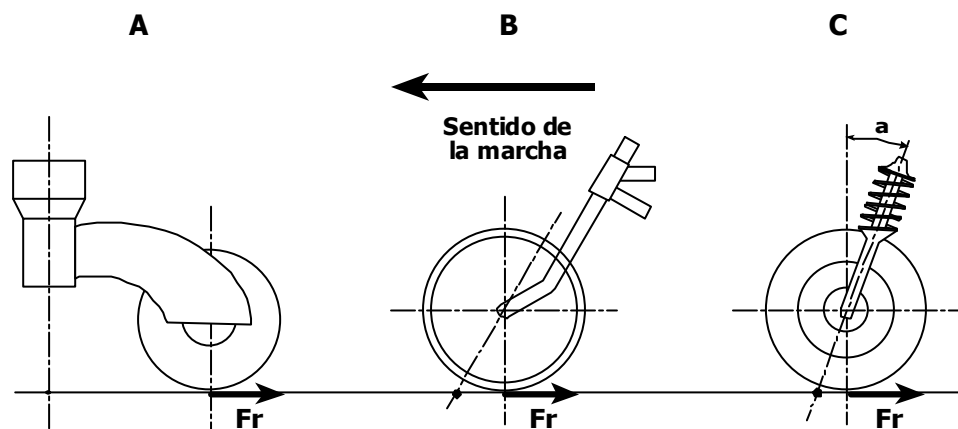
El resultado es que se produce un par de giro alrededor del eje de pivotamiento que dependerá de la fuerza  $F_r$  equivalente a la resistencia a la rodadura de la rueda y del brazo de palanca y que tenderá a abrir la parte delantera de la rueda hacia afuera.

Puede deducirse inmediatamente que este fenómeno tenderá a aumentar aún más el efecto producido por la caída, ya comentado anteriormente. No obstante, cuando se trate de un vehículo con tracción delantera, nos encontraremos con que la resistencia a la rodadura es muy inferior a la fuerza de tracción, y es la rueda la que tira del vehículo, siendo el efecto contrario al explicado para un vehículo con eje motriz trasero.

Ahora la fuerza de tracción ejercida por la rueda y el par de giro alrededor del eje de pivotamiento tiende a cerrar la rueda por la parte delantera. Por tanto, en un vehículo con tracción delantera, la tendencia de las ruedas a abrirse producida por la caída es contrarrestada, y el efecto es similar al que se produciría por una mayor convergencia positiva.

Deducimos entonces que cuando las ruedas son solamente directrices, la resistencia a la rodadura tiende a abrirlas por la parte delantera. Cuando además son motrices, la fuerza de tracción tiende a cerrarlas. La disposición final de la dirección deberá ser tal que compense todos estos efectos, más el producido por la caída de las ruedas si la hubiera. Como regla general, con ruedas directrices solamente y caída positiva la convergencia deberá ser positiva. Finalmente, si las ruedas son directrices y motrices y la caída es positiva, la convergencia podría ser positiva o negativa, dependiendo del diseño.

**3) Avance.** Hemos visto anteriormente que si las ruedas delanteras son solo directrices el suelo ejerce sobre ellas una fuerza igual a la resistencia de la rodadura y en sentido opuesto al de la marcha. Esta fuerza ejerce un efecto de auto orientación cuando el eje de pivotamiento se sitúa por delante del punto de contacto sobre el suelo. Este efecto de auto orientación es muy sencillo de ver, dos ejemplos prácticos los tenemos en la ruedecilla de apoyo de un mueble o en la rueda delantera de una bicicleta (figura 15), que permite al ciclista rodar sin manos, manteniendo en todo momento la dirección. En el caso de la ruedecilla de mueble, ésta se orienta automáticamente aunque cambiemos la dirección del movimiento.



**Figura 15.** Ángulo de avance

Esta misma característica se aplica también a la dirección de los vehículos, dando cierta inclinación longitudinalmente al eje de pivotamiento, independientemente de la inclinación lateral o salida que ya se ha comentado anteriormente. Al ángulo que forma el eje de pivotamiento con respecto al plano vertical se le denomina *avance* y, a veces también *caster*. Por lo general, el avance es positivo, lo cual significa que el extremo inferior del eje de pivotamiento está adelantado con respecto al superior. Si la orientación del eje de pivotamiento fuese tal que el extremo inferior estuviese retrasado con respecto al superior, el avance sería negativo.

**4) Autoalineación de la dirección (retorno del volante).** El valor del par de autoalineación de la dirección está influenciado especialmente por el ángulo de inclinación del eje de pivote y por el avance. Efectivamente, como consecuencia de la inclinación del eje de pivotamiento, al girar la dirección es necesario elevar ligeramente la carrocería, y el propio peso del vehículo cuando está en movimiento tiende a orientar las ruedas nuevamente en el sentido de la marcha.

Este fenómeno, unido al de avance, determina el grado de tendencia a la autoalineación de la dirección. Un avance excesivo, por ejemplo podría dar lugar a una dirección demasiado dura y con una clara tendencia a mantener la dirección de la marcha. Por otro lado, un avance insuficiente podría producir en muchos casos una dirección muy suave, pero poco estable.

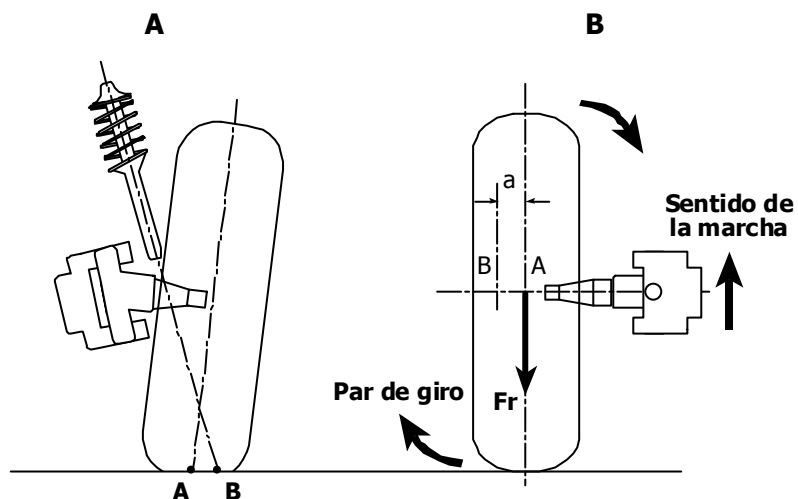
Los ángulos de avance e inclinación del eje de pivote están además íntimamente ligados. Si la inclinación del eje de pivote es grande por diseño, puede ser necesario reducir al mínimo el avance para evitar una dirección con una tendencia excesiva a la autoalineación, y son cada vez más los vehículos modernos con un ángulo de avance mínimo o incluso negativo.

**5) Radio de pivotamiento negativo.** Hemos ido verificando a lo largo de este apartado dedicado a la geometría de la dirección que el posicionamiento de los puntos A y B en la figura B.15 (*vid supra*) tiene una importancia vital sobre el comportamiento y reacciones de las ruedas directrices en sus distintos aspectos, aunque eso sí, visto de forma muy simplificada. Los puntos A y B correspondían como se recordará al centro de contacto del neumático sobre el suelo y a la intersección del eje de pivotamiento también con el plano del suelo.

Actualmente, prácticamente en la totalidad de los vehículos encontramos que el ángulo de inclinación del eje de pivotamiento es tal que su proyección sobre el suelo no cae en la parte interior de la huella del neumático, sino en el exterior (figura B.15.A), al contrario de lo que hemos visto hasta ahora. En este caso se dice que el ángulo de pivotamiento es negativo. El radio de pivotamiento negativo presenta unas características que repercuten fundamentalmente en un mejor equilibrio en la frenada.

La figura B.15.B representa la rueda delantera de un vehículo con radio de pivotamiento negativo. Si accionamos los frenos de producirá una resistencia a la rodadura que en el dibujo está representada por  $F_r$  y que será tanto mayor cuanto mayor sea la acción del freno y mejor sea la adherencia del neumático sobre el suelo.

El resultado será el mismo que cuando hablábamos de la resistencia a la rodadura, es decir, se producirá un par de giro alrededor del eje de pivotamiento. Pero al estar el punto B situado en la parte exterior del plano del neumático, el sentido del par será inverso y tenderá a cerrar la rueda por la parte delantera. Consecuentemente, ante fuerzas desiguales, la rueda que ofrezca más resistencia tenderá a cerrarse más por la parte delantera, orientándose hacia el eje del vehículo y anulando cualquier tendencia a virar bruscamente. De esta forma cualquier desequilibrio en la frenada, tiende a compensarse automáticamente.



**Figura 16.** Justificación de un radio de pivotamiento negativo

**5. Elementos de mando.** La orientación de las ruedas directrices, para que el vehículo tome la trayectoria deseada, se realiza a través de una serie de elementos acoplados al mismo, que tienen como finalidad transmitir el giro del volante a las ruedas. Este conjunto de elementos está constituido por un mecanismo desmultiplicador llamado columna de dirección y una serie de palancas y barras de acoplamiento, que componen lo que se ha venido a llamar timonería de la dirección y cuya disposición varía de unos vehículos a otros según el sistema empleado.

**a. Árbol o columna de la dirección.** Este mecanismo transforma el giro del volante en movimiento de vaivén en su palanca de mando. El árbol de dirección realiza una desmultiplicación de giro y la multiplicación de fuerza necesaria para poder orientar las ruedas, o lo que es lo mismo, como el esfuerzo que hay que aplicar a las ruedas para su orientación está en función del peso que sobre ellas gravita, este mecanismo realiza una desmultiplicación del esfuerzo a realizar en el volante para que el conductor pueda realizar la maniobra con el mínimo esfuerzo.

**1) Relación de los esfuerzos a transmitir en un mecanismo sencillo de dirección.** Como el par de giro es igual a la fuerza por su radio, la desmultiplicación de los esfuerzos está en función del volante y de la rueda directriz del mecanismo de dirección, resultando las fuerzas aplicada y obtenida inversamente proporcionales a los radios de giro correspondientes, ya que el momento del esfuerzo de direccionamiento ha de ser igual al momento resistente del mecanismo de dirección:

$$F_1 \cdot R_1 = F_2 \cdot R_2$$

Es decir:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Esto indica que, para un mecanismo de dirección dado, cuanto mayor sea el diámetro del volante, menor será el esfuerzo a realizar. No obstante, las dimensiones de éste están supeditadas al espacio interior del habitáculo y a la posición más cómoda del conductor, así como a la normativa vigente, por esta razón, los vehículos pesados, que necesitan un gran esfuerzo de orientación, con el fin de no sobredimensionar demasiado el volante, emplean servomecanismos de asistencia.

En todo el sistema direccional, la relación de desmultiplicación ( $R_d$ ) viene determinada por la relación que existe entre el ángulo (A), descrito por el volante y el ángulo (B), obtenido en las ruedas directrices.

$$R_d = \frac{A}{B}$$

El valor de  $R_d$  depende del peso del vehículo y de la carga que gravita sobre las ruedas directrices, oscila entre 12 y 24, según el vehículo.

**b. Varillaje de la dirección.** Los elementos que la integran tienen como misión transmitir a las ruedas el movimiento obtenido en el mecanismo de la dirección, constituyendo el sistema direccional para la orientación de las mismas.

El sistema está formado por unas palancas o brazos de acoplamiento montadas sobre las manguetas, perpendiculares al eje de las ruedas y paralelas al terreno. Estas palancas llevan un cierto ángulo de inclinación para que la prolongación de sus ejes coincida aproximadamente con el centro del eje trasero (sistema de Jeantaud) y tienen por misión el desplazamiento lateral de las ruedas directrices.

**1) Barra de acoplamiento.** La unión de las dos ruedas se lleva a cabo por medio de una o más barras de acoplamiento. Estas barras de acoplamiento enlazan los dos brazos de forma que el movimiento de las ruedas sea simultáneo y conjugado, al producirse el desplazamiento lateral de una de ellas. Están formadas por un tubo en cuyos extremos van montadas unas rótulas, cuya misión es hacer elástica la unión entre los brazos de rueda y

adaptarla a las variaciones de longitud debidas a las incidencias del terreno. Sirven además para la corrección de la convergencia de las ruedas, acortando o alargando la longitud de las barras.

**2) Barras de mando.** El movimiento direccional de este conjunto de acoplamiento a las ruedas, se transmite por medio de una barra de mando unida, por un lado, a la palanca de ataque y, por el otro, a la palanca de mando de la dirección. En otros sistemas, el árbol de la dirección ataca directamente al sistema de acoplamiento de las ruedas, como ocurre en las direcciones de cremallera.

**c. Sistemas de acoplamiento.** Existen varias disposiciones utilizadas por distintos fabricantes, utilizando los elementos dentro de la estructura de montaje para el acoplamiento de la varillaje de la dirección y sin romper las normas básicas direccionales, entre los que sobresalen los siguientes:

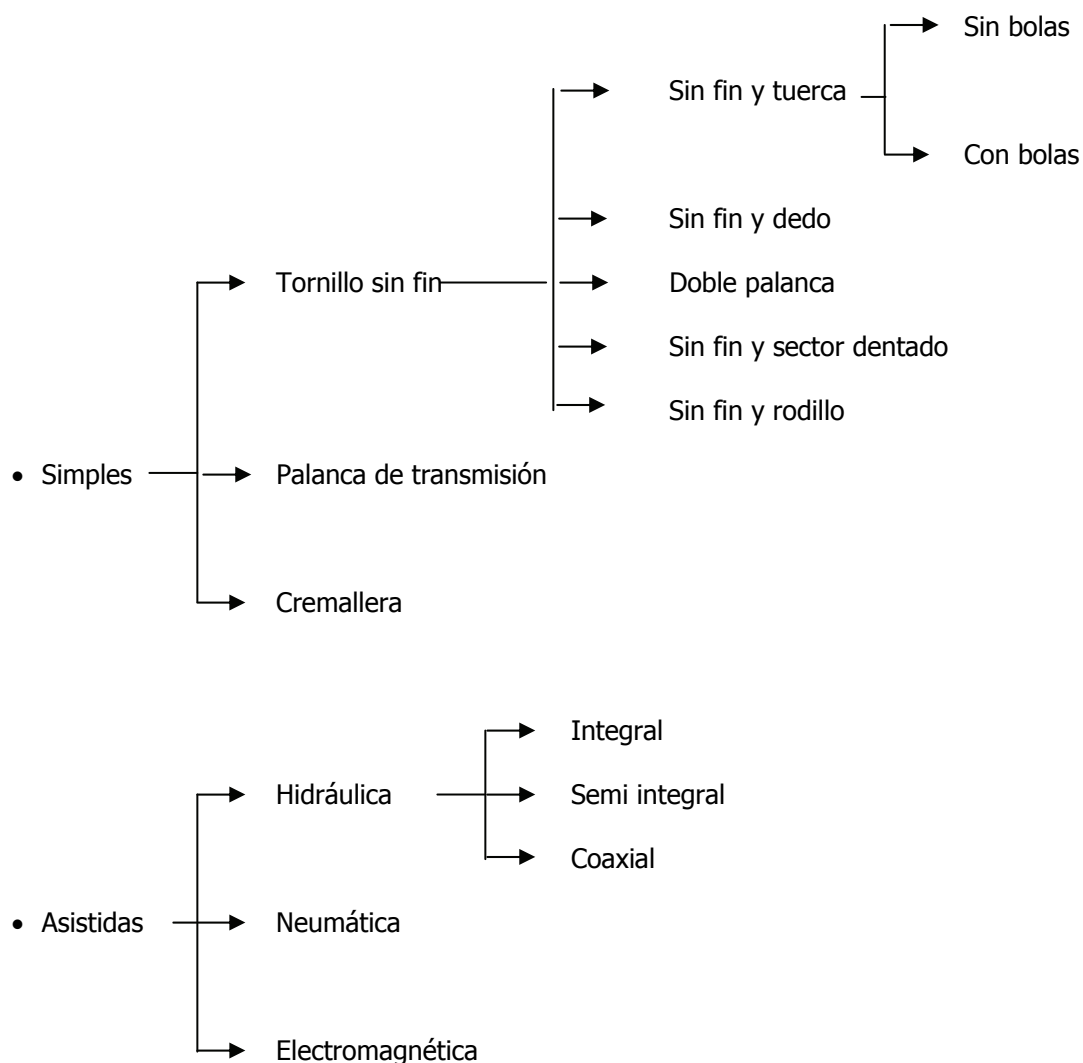
**1) Barra de acoplamiento única.** En este sistema la barra va unida a los brazos de la rueda y a la palanca de ataque o palanca de mando. Este sistema es el más tradicional y es usado generalmente en vehículos con eje delantero rígido.

**2) Barra de acoplamiento tripartida.** Este sistema se utiliza en vehículos con suspensión independiente en las ruedas delanteras. Suprime la palanca de ataque y, a veces la bieleta de empuje, y une directamente la palanca de mando a las barras de acoplamiento.

**3) Barra de acoplamiento en dos secciones.** En esta disposición las barras de acoplamiento van unidas directamente a la palanca de mando.

**4) Acoplamiento directo.** Este sistema es utilizado en las direcciones de cremallera.

**6. Mecanismo de dirección.** El mecanismo de la dirección constituye el elemento desmultiplicador de giro del volante y está formado por una serie de engranajes encerrados en el cárter del árbol de la dirección. Según la forma y los elementos empleados en este mecanismo, así como la adición de dispositivos especiales acoplados para transmitir el esfuerzo de giro a las ruedas, se clasifican en los tipos siguientes:



## C. La suspensión

Desde los orígenes de la historia del automóvil y con el desarrollo de los medios de transporte y su continua evolución, pronto se vio la necesidad de aislar el cuerpo del vehículo de las irregularidades de la carretera, por lo que desde un carro tirado por animales hasta un turismo dotado de sistemas de suspensión activa hay todo un mundo de elementos elásticos y amortiguantes con los que se intenta conseguir un equilibrio entre la estabilidad y confort, cuya misión es hacer la conducción más segura y confortable.

**1. Definiciones y fundamentos de la suspensión.** Al conjunto de muelles, amortiguadores y otros dispositivos que unen el bastidor a los ejes de las ruedas se le da el nombre de suspensión, denominándose suspensión delantera a los muelles y amortiguadores del eje o las ruedas delanteras y suspensión trasera al conjunto de elementos de suspensión del eje o ruedas traseras. Font Mezquita define la suspensión de un vehículo como el conjunto de órganos mecánicos que en un vehículo unen las ruedas a la estructura principal y los sistemas de mando hidráulico, neumático y/o electrónico que los rigen.

La principal finalidad de los muelles es la de aumentar la comodidad de los ocupantes del vehículo cuando está en marcha. Si no existiesen estos muelles al recorrer el automóvil un camino con una superficie irregular, todos los elementos mecánicos del vehículo, junto con la carrocería y los pasajeros, estarían sometidos a una serie continua de movimientos de subida y bajada, choques y vibraciones, que provocarían una serie de esfuerzos anormales en la estructura del bastidor, carrocería y elementos mecánicos, que se traducirían en desgaste y roturas. Por otra parte, si todo el conjunto del vehículo estuviese rígidamente unido a las ruedas, sobre un terreno irregular, las ruedas perderían contacto con el suelo, haciéndose entonces la dirección y manejo del vehículo inseguros y peligrosos.

**a. Movimientos de la carrocería.** Seis son los movimientos básicos de la carrocería de un vehículo con respecto al suelo sobre el que transita.

**1) Cabeceo.** Se denomina cabeceo al movimiento de rotación del vehículo alrededor del eje transversal del mismo. Consiste básicamente en un hundimiento de la parte anterior del vehículo y un levantamiento de la parte posterior o viceversa. Es un movimiento típico de frenada y aceleración.

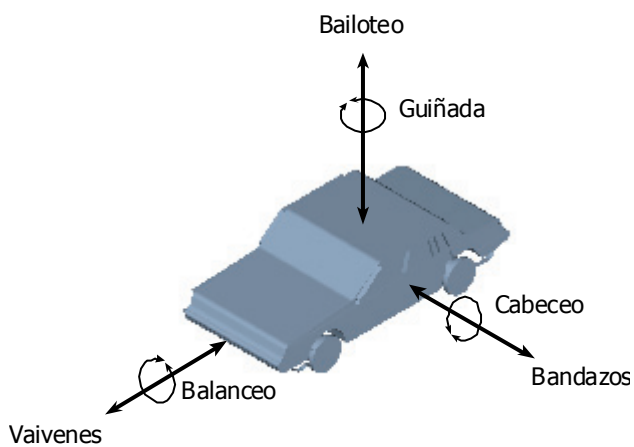
**2) Balanceo.** Es el movimiento de rotación en torno al eje longitudinal del vehículo. Es un movimiento típico que se produce al describir una curva.

**3) Guiñada.** Se denomina al movimiento de rotación en torno al eje vertical del vehículo. Este es un movimiento que puede producirse en situaciones de cambios bruscos de dirección.

**4) Bailoteo.** Es el movimiento de toda la caja del vehículo paralelo al terreno (oscilaciones rectilíneas en el sentido del eje vertical del automóvil). Este es un movimiento típico que se produce en carreteras levemente onduladas.

**5) Bandazos.** Se denomina así al movimiento oscilatorio rectilíneo en el sentido del eje transversal. Este movimiento suele ser provocado por la acción del viento lateral.

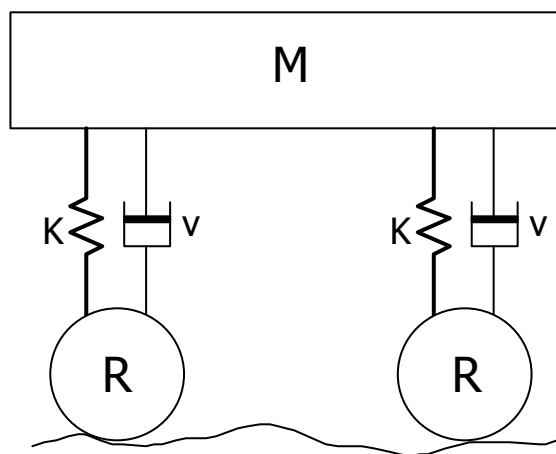
**6) Vaivenes.** Es el movimiento oscilatorio rectilíneo en el sentido del eje longitudinal. Las causas principales de estos bandazos frontales se suelen encontrar en fallos del motor o en frenos en mal estado.



**Figura 17.** Tipos de movimiento en un vehículo

Al conjunto de órganos del vehículo que forman la caja (chasis, carrocería y carga), que no está en contacto con la superficie del terreno por la que circula el mismo, se le denomina *Masa suspendida*, M en la figura 18. A los elementos del vehículo que están en contacto directo con el terreno y deben seguir el perfil del mismo en todas las circunstancias (ruedas, ejes, semiejes, dispositivos de freno) se conoce como *masas no suspendidas* del vehículo, simbolizado como R en la figura 18.

El mecanismo de la suspensión es el conjunto de elementos elásticos (K) y viscosos (v) que se interponen entre las masas no suspendidas y las suspendidas y que confieren a esta unión un comportamiento flexible y amortiguado al mismo tiempo. También forman parte de la suspensión los elementos estabilizadores y estructurales que posicionan las ruedas respecto a la caja del vehículo.



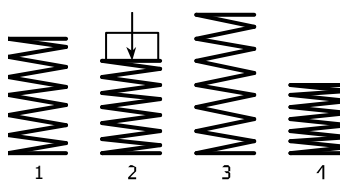
**Figura 18.** Esquema de la suspensión

**b. Oscilaciones de los muelles y su amortiguación.** Una de las cosas que se debe tener en cuenta cuando se emplean muelles, es el hecho de que cuando un muelle ha sido comprimido o estirado por una fuerza exterior y esta fuerza cesa, el muelle se pone en

movimiento para volver a su forma primitiva, pero el movimiento no cesa cuando el muelle alcanza esta forma, sino que continúa deformándose en sentido contrario (ver figura C.3), al cesar el movimiento del muelle en este sentido, queda deformado como si se hubiese aplicado una fuerza, pero no existiendo ésta vuelve a ponerse en movimiento para lograr su forma primitiva, sobrepasando de nuevo esta posición, aunque no tan marcada como la primera vez, y así se va repitiendo este ciclo de deformaciones hasta que el muelle queda en reposo.

El fenómeno que acabamos de explicar tiene sus consecuencias en los muelles utilizados en los automóviles, ya que si bien el bastidor (o chasis) no sufre ningún cambio en su movimiento en el instante en que la rueda pasa por una irregularidad del terreno, en cambio, después, la vibración propia del muelle hace que la distancia entre el eje y el bastidor varíe acortándose y aumentándose sucesivamente, dando lugar a un movimiento de subida y bajada del bastidor cada vez menos marcado hasta que el muelle quede en equilibrio. Por otra parte, cuando un muelle se ha distendido al encontrar un punto bajo en el camino, el automóvil queda falto de apoyo en aquella rueda y tiende a caer hacia aquel punto, pero en el momento en que está cayendo se produce el movimiento de recuperación del muelle que hace que la rueda tienda a moverse hacia arriba, con lo cual se produce un sobreesfuerzo en el muelle que puede incluso llegar a romperlo.

**Figura 19.** *Funcionamiento de un muelle*

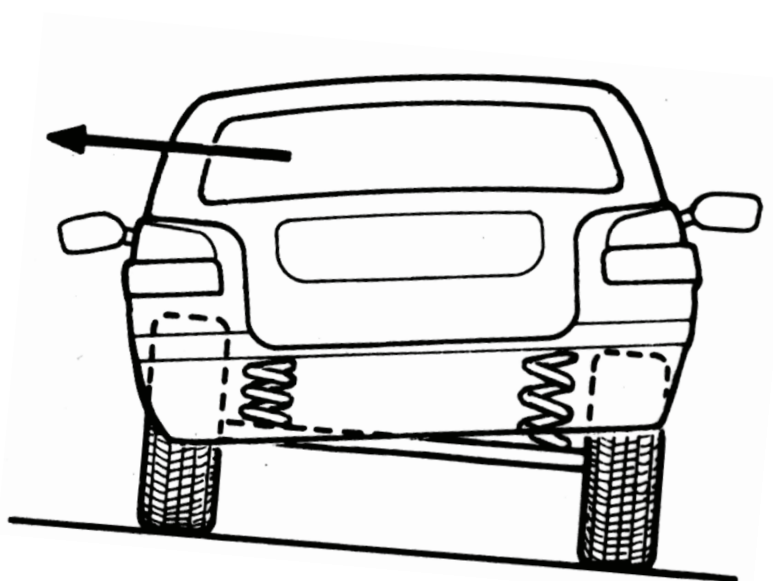


1. Muelle sin carga.
2. Muelle cargado.
3. Distensión del muelle al retirar la carga.
4. Contracción del muelle que se produce después de la distensión de 3.

Para eliminar en lo posible los efectos de los movimientos oscilatorios de los muelles, se colocan entre el bastidor y el eje dispositivos que se oponen a la oscilación denominados *amortiguadores*.

**c. Efecto de vuelco.** Cuando el automóvil toma una curva se produce una fuerza que tiende a inclinar el coche hacia la parte de fuera de la curva, estando el vehículo apoyado sobre muelles esta tendencia obliga a comprimirse a los muelles del lado exterior de la curva, mientras se distienden los muelles de la parte interior de la curva, con lo cual el vehículo se inclina, con peligro de vuelco o rotura de muelles si la curva se toma a gran velocidad.

Para evitar estos riesgos se coloca en los automóviles, generalmente en la parte trasera, un dispositivo denominado *barra estabilizadora*, cuya misión es la de impedir que el muelle de un lado se comprima excesivamente mientras el del otro lado se distiende.



**Figura 20.** *Inclinación de la carrocería por efecto de la fuerza centrífuga al tomar una curva*

**2. Funciones principales de los sistemas de suspensión.** La finalidad y razón de ser de un vehículo no es otra más que el transporte, el cual resultará tanto más eficiente cuantas menos incomodidades acarree. Los condicionantes básicos sobre los que se diseña una suspensión no sólo conciernen a la sensibilidad humana hacia las perturbaciones propias de las vibraciones del vehículo o irregularidades del suelo; también es preciso tener en cuenta la interacción entre las ruedas del vehículo y el suelo. El mantenimiento del contacto entre las ruedas y el suelo, por ejemplo, resulta de vital importancia para asegurar la estabilidad del vehículo.

Así pues, son dos las funciones fundamentales que debe cumplir la suspensión:

- Confort de marcha
- Estabilidad del vehículo

**a. Confort de marcha.** La suspensión debe absorber las reacciones producidas en las ruedas por las irregularidades del terreno, asegurando la comodidad de las personas así como la protección de la carga y de los órganos mecánicos del vehículo.

La absorción de estas reacciones se consigue por la acción combinada de neumáticos, la elasticidad de los asientos y el sistema elástico de la suspensión. Los neumáticos sólo absorben las pequeñas asperezas de un suelo en buenas condiciones y su misión más importante es la de asegurar un buen agarre sobre la carretera y conservar silenciosa la marcha del vehículo.

Cuando las irregularidades son grandes, son absorbidas por el sistema elástico de la suspensión generando las oscilaciones de las ruedas, que serán más grandes cuanto más blanda sea la suspensión. Estas oscilaciones, de las masas no suspendidas, deben ser amortiguadas rápidamente para asegurar el contacto permanente de la rueda con el terreno. Esta función queda encomendada a los sistemas de amortiguación.

La experiencia ha demostrado que el margen de comodidad para una persona es de 1 a 2 oscilaciones por segundo, es decir, de 60-100 oscilaciones por minuto. Por encima de estos

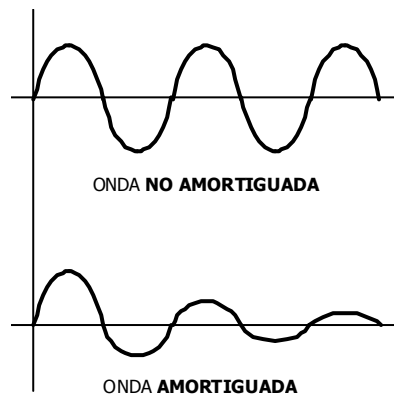
valores se excita el sistema nervioso, y por debajo se puede producir mareo. Partiendo de estos datos se puede calcular la flexibilidad adecuada para cada vehículo, aplicando la fórmula

$$N = \frac{1}{2\sqrt{e_0}}$$

Donde:

$N$  = Frecuencia que debe estar entre 60-100 Hz/minuto.

$e_0$  = Flecha o cedimiento (en metros) que experimenta el sistema bajo carga estática.



**Figura 21.** Oscilación de las ruedas con y sin amortiguación

**1) Irregularidades en la carretera.** Antes de hacer un análisis más detallado de los sistemas de suspensión de un vehículo es interesante conocer al menos el peso probable de las irregularidades del terreno contra las que se pretende que actúe el sistema. En general se acepta ondulaciones con amplitudes cuyos valores superen los 0.019 m a 0.025 m llegarán a ser molestos a velocidades normales de marcha; entre menor sea la amplitud por debajo del rango dado mayor será la calidad de la superficie del suelo.

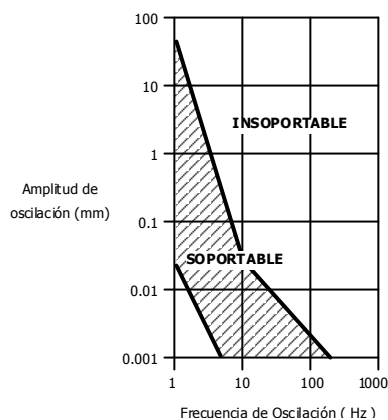
El mantenimiento de las condiciones óptimas de servicio y durabilidad de los distintos componentes del sistema de la suspensión es uno de los factores más críticos del diseño del

vehículo y control dinámico en carretera. A la hora de diseñar estos componentes, el primer paso es suponer el estado bajo tensión del sistema, tomando como referencia las condiciones extremas de trabajo de los distintos elementos.

**2) Sensibilidad humana a las vibraciones.** Como conclusiones generales a la multitud de estudios realizados sobre la influencia en el cuerpo humano de las vibraciones a las que puede estar expuesto, cuando se esta circulando en de un vehículo, podemos resumir:

- El hombre acusa de manera diferente las vibraciones, según el sentido de éstas. El cabeceo, por ejemplo, produce sensación de náuseas y alteraciones en el laberinto auditivo.
- Las oscilaciones de frecuencia inferior a 0.5 Hz producen un malestar de mareo.
- Las frecuencias de 5-6 Hz causan fatiga general, debido a la resonancia de los músculos.
- Frecuencias del orden de 20 Hz son perjudiciales para las vértebras cervicales.
- El campo en el cual las vibraciones son aceptables está restringido a frecuencias comprendidas entre 1 y 3 Hz.

Un papel fundamental en la sensación de confort es el jugado por el asiento, cuyos muelles deben tener frecuencias naturales alejadas de las frecuencias de las oscilaciones transmitidas al casco de la carrocería por las suspensiones, para evitar los fenómenos de resonancia.



**Figura 22.** *Gráfica de vibraciones soportables en función de amplitud y frecuencia, delimitadas por el umbral de percepción y el de molestia*

**b. Estabilidad.** La estabilidad del vehículo, hace referencia a la necesidad de que las ruedas estén constantemente en contacto con el suelo, ya que el vehículo se “apoya” sobre la huella del neumático y la adherencia del mismo es función de dos factores:

- El rozamiento de la interfase neumático-suelo.
- El peso que gravita sobre ese neumático.

De tal manera que podemos expresar la siguiente fórmula para la fuerza de Adherencia:

$$A = \mu \cdot N$$

donde:

**N** = La componente normal del peso del vehículo sobre la rueda.

**$\mu$**  = El coeficiente de rozamiento del neumático.

Si en las oscilaciones de la suspensión, la rueda deja de estar en contacto con el suelo tendremos un valor  $A = 0$ . De ahí la importancia de reducir rápidamente las oscilaciones, con amortiguadores adecuados a cada vehículo. Lo importante a la hora de comprobar el estado de una suspensión, es verificar la adherencia residual mínima que se obtiene al excitar el sistema de suspensión en un banco apropiado.

Después de estas consideraciones queda claro que las dos funciones de la suspensión son en cierto modo contrapuestas, ya que una suspensión muy “suave” con grandes deformaciones, serán muy confortables pero poco estables, por el peligro de quedarnos sin adherencia, y al contrario, las suspensiones muy “duras” con escasa amplitud, serán poco confortables pero muy estables (tipo deportivo). Los fabricantes deben adoptar, por tanto, soluciones según el tipo de vehículo a que vaya destinada la suspensión.

**1) Influencia del tamaño de las ruedas.** Los efectos sobre la estabilidad o el confort de la superficie de la carretera no pueden ser evaluados de forma independiente, sin tener en cuenta otros muchos factores que pueden resultar decisivos. Entre estos otros factores

cabe destacar las dimensiones de las ruedas y los neumáticos que posea el automóvil, por la influencia que esto tiene en cómo afectan las irregularidades del terreno en el comportamiento del vehículo.

Mientras que una rueda más grande implica que serán necesarios esfuerzos menores para subir escalones o bordillos, una rueda pequeña se adaptará con mayor facilidad a pequeños baches o irregularidades en el suelo. Una rueda rígida no puede seguir el contorno del terreno cuando éste presente un radio efectivo menor que el de la propia rueda. Este efecto será tanto más acusado cuanto mayor sea la desproporción entre el tamaño de la rueda y el radio efectivo del terreno.

**2) Importancia de las masas suspendidas.** Un elemento muy importante que está por encima de la investigación cinemática y dinámica de las suspensiones, es el representado por la relación existente entre las masas suspendidas y las no suspendidas que posee el vehículo.

Cuanto más ligeros son todos los elementos relacionados con el contacto con el terreno (ruedas, neumáticos, frenos, órganos de elasticidad, y parte de los amortiguadores) respecto a la carga que gravita sobre cada rueda, tanto menores resultan los rebotes del neumático sobre el terreno. Es lógico que, cuanto más tiempo está el neumático en contacto con el suelo, respecto al tiempo que no lo está, más aumenta su adherencia, prescindiendo de otros factores ya descritos.

Resumiendo, y en comparación con los automóviles de competencia, se puede decir que el vehículo de turismo (convencional o de ciudad) debe ofrecer sobre todo confort y seguridad de marcha en todas las posiciones y terrenos, además de una dirección rigurosamente precisa. En las curvas se exige una notable estabilidad, mientras que la adherencia en la carretera puede ser limitada a aceleraciones laterales de 0.6 g – 0.7 g, y una conducción ligera y no fatigable, cualidades ligadas a los parámetros característicos de las suspensiones, en cambio, en un vehículo de carreras se exige una gran adherencia en todas las posiciones, gran velocidad en las curvas y elevadas aceleraciones laterales de hasta 1.6 g, además de una gran precisión de

conducción, aunque el automóvil resulte duro, rígido y poco confortable. Todo esto se consigue con suspensiones de rótulas esféricas o articulaciones metálicas, gran rigidez de los elementos de las suspensiones y del chasis, un ***mecanismo de la dirección muy sencillo***, y una barra estabilizadora muy eficaz y muy rígida.

**3. Elementos de las suspensiones.** La suspensión deberá estar formada por un conjunto de elementos diversos, que pueden presentar diferentes formas y combinarse de distintas maneras según el diseño del vehículo y el criterio del constructor.

Como componentes fundamentales podemos considerar:

- Los elementos elásticos o muelles.
- Los amortiguadores.
- Los elementos de estabilización (barras estabilizadoras).
- Los elementos de empuje y los de posicionamiento.

Los muelles empleados en la suspensión de los automóviles son de varios tipos:

- Muelles helicoidales.
- Barras de torsión.
- Muelles de láminas, denominados ballestas u hojas de resorte.

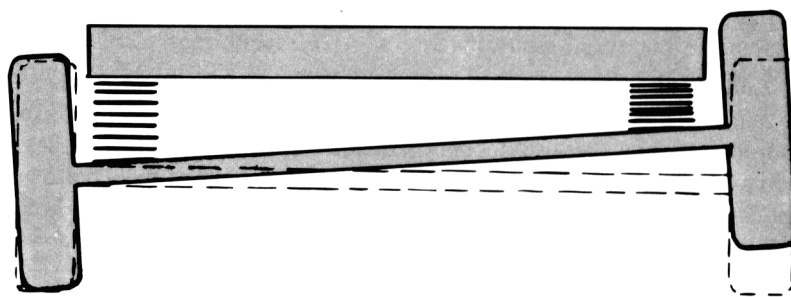
También se emplean amortiguadores de diversos tipos, siendo los más usados los denominados amortiguadores telescópicos, ya sea hidráulicos o de gas.

En cuanto a los elementos de estabilización, empuje y posicionamiento sus formas son variables según la disposición de la suspensión.

**4. Suspensiones delanteras.** La disposición del sistema de suspensión varía fundamentalmente según se trate de suspensión de ejes rígidos o de suspensión de ruedas independientes.

**a. Suspensiones delanteras de eje rígido.** Con este tipo de suspensiones nos aseguramos el mantenimiento del ancho de vía constante en las ruedas delanteras. No obstante, las ruedas delanteras, por el hecho de que generalmente son motrices y siempre directrices, no suelen disponer de este tipo de suspensión que provoca efectos giroscópicos que inestabilizan de forma notable la conducción y el comportamiento del vehículo.

Antiguamente la mayoría de los automóviles llevaban cada par de ruedas, montados sobre un eje rígido, uniéndose cada eje al bastidor mediante dos muelles, uno en cada extremo del eje. Esta disposición de eje rígido presenta el inconveniente de que al elevarse o descender una de las ruedas por efecto de las irregularidades del camino, produce una inclinación o bamboleo de las ruedas y un resbalamiento lateral de las mismas, que da lugar a un mayor desgaste de los neumáticos y, además, en las ruedas delanteras, hace insegura la dirección.



**Figura 23.** *Movimiento lateral y vertical de las ruedas con eje rígido*

**b. Suspensión delantera independiente.** Al irse haciendo los automóviles cada vez más veloces, se han estudiado y puesto en práctica disposiciones en las cuales se prescinde del eje que une las ruedas y cada una de ellas está sostenida por su propio sistema de suspensión y unión al bastidor. Se da a tal disposición el nombre de suspensión independiente.

Con la suspensión independiente el movimiento de subida y bajada de una de las ruedas por efecto de las irregularidades del terreno no afecta al movimiento de la otra, evitándose así el bamboleo de las ruedas y su resbalamiento lateral. Para las suspensiones delanteras nos encontramos con dos alternativas de suspensión independiente, estas son:

- Suspensión independiente de barras transversales
- Suspensiones independientes del tipo Mac Pherson

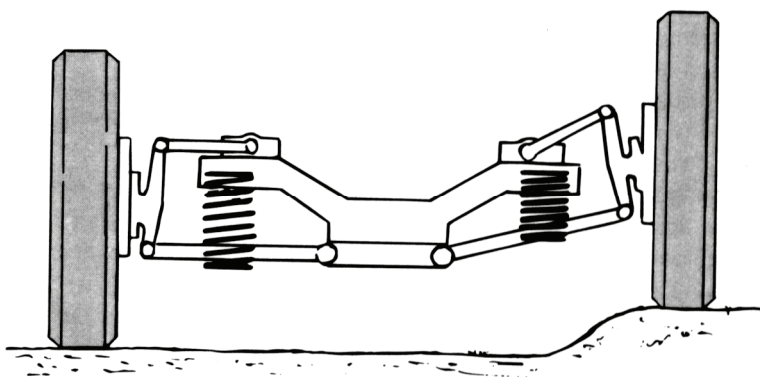
**1) Suspensiones delanteras con barras transversales.** En este tipo de suspensiones cada rueda es guiada mediante una barra superior y una inferior, donde el otro extremo de las barras está articulado en la carrocería del vehículo. Las barras transversales se rigen por el principio de barras paralelas, el cual nos permite poder controlar los desplazamientos verticales que se generan en las llantas. Los brazos de suspensión con longitud igual provocan un desplazamiento horizontal que no es muy apropiado cuando el auto se ladea por la acción de la fuerza centrífuga en una curva, en cambio los brazos con diferentes longitudes, siendo la longitud del brazo inferior mayor a la longitud del brazo superior ayudan al equilibrio del auto al momento de entrar en una curva. Por esto prácticamente los sistemas con brazos superiores e inferiores de longitud igual no se utilizan en los automóviles modernos.

La relación de longitudes así como los ángulos de las barras son determinados de forma que se consiga la combinación óptima entre los siguientes enunciados:

- Reducir en aproximadamente un 50% el bamboleo de las ruedas delanteras (variaciones en la caída) provocadas por los movimientos verticales de la suspensión.

- Minimizar en la medida de lo posible las variaciones en el ancho de vía que el vehículo pueda experimentar. Variaciones que pueden llegar a ser considerables si las longitudes de las barras transversales fueran similares.
- Permitir que las ruedas permanezcan lo más próximo posible a la verticalidad a pesar del movimiento de balanceo del vehículo, lo que evita desgastes anormales en los neumáticos y posibles pérdidas de adherencia en las curvas. Este efecto se hace cada vez más deseable con los modernos neumáticos de perfil bajo, en los que la pérdida de la verticalidad supondría la pérdida de contacto entre la banda de rodadura y el firme. El contacto tendría lugar con el flanco del neumático y, aún suponiendo que la adherencia fuera suficiente como para evitar el deslizamiento del vehículo, el desgaste del flanco supondría la rápida degradación del mismo.
- Permitir ciertas ventajas constructivas derivadas principalmente de buscar la menor intromisión posible en el compartimiento del motor y habitáculo.

La suspensión independiente tiene además la ventaja de que disminuye el peso de la parte del automóvil no suspendida mientras aumenta el peso de la parte suspendida, lo cual mejora las condiciones de comodidad y seguridad del vehículo.

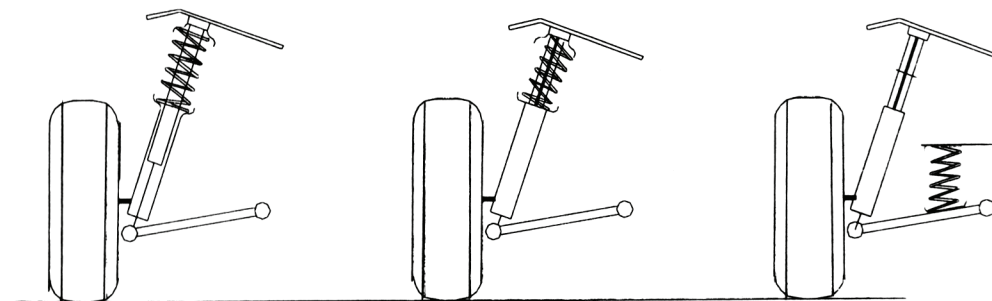


**Figura 24.** Suspensión independiente de barras transversales desiguales

**2) Suspensión delantera independiente Mac Pherson.** Mediante el sistema de suspensión ideado por E. S. Mac Pherson cada rueda es guiada sobre los posibles obstáculos mediante un tirante o puntal que comprime a un amortiguador telescópico unido por un extremo a la rótula de salida de la barra transversal y por el otro a la carrocería mediante una unión flexible. En su forma original, la más utilizada incluso en los vehículos modernos, los muelles helicoidales de la suspensión se disponen encerrando al amortiguador en su interior mientras que la unión flexible con la carrocería tiene lugar mediante un elemento cónico de goma, que se diseña de manera que además absorba posibles ruidos y vibraciones.

Para reducir efectos de flexiones y fricción en la suspensión se suelen disponer los muelles y el amortiguador de forma que sus ejes formen un cierto ángulo, para de esta forma contrarrestar la tendencia de la rueda a oscilar hacia dentro durante la marcha en línea recta del vehículo.

Algunas modificaciones efectuadas en ciertos vehículos actuales, disponen los muelles de forma que el amortiguador no queda en el interior del muelle sino que el muelle se apoya directamente sobre el brazo inferior de la suspensión y sobre el otro extremo del muelle se apoya directamente la estructura portante del vehículo. Esta distribución presenta considerables ventajas derivadas de: por un lado un mayor espacio disponible para la ubicación del motor, muy conveniente en los vehículos con motor delantero transversal, y por otro una mayor comodidad para reemplazar el amortiguador en caso de una eventual avería. En la figura C.8 se puede observar la evolución de la geometría de este tipo de suspensiones.



**Figura 25.** Evolución del sistema clásico de suspensión Mac Pherson

### 3) Análisis comparativo de los dos sistemas de suspensión delantera

**independiente.** Varios son los aspectos que caracterizan un tipo de suspensión frente a la otra entre los que cabe destacar los siguientes:

- Mientras que el sistema de brazos desiguales fue ideado para vehículos de bastidor independiente, el sistema Mac Pherson estuvo orientado desde un principio a vehículos dotados de carrocerías autoportante. Como consecuencia de ello el sistema Mac Pherson resulta mucho más ligero además de que concentra menos carga en la parte frontal del vehículo, lo que permite aligerarla consiguiendo así un mejor reparto de pesos entre los ejes.
- En principio, el sistema Mac Pherson precisaba de unos requerimientos de espacio inferiores a los de las suspensiones de brazos desiguales. Modificaciones introducidas principalmente por los constructores japoneses permiten elevar los brazos superiores de las suspensiones por encima de las ruedas, lo que supone dejar mayor espacio para la colocación de los motores transversales superando incluso en este aspecto a las suspensiones Mac Pherson.
- Una desventaja inherente a las suspensiones Mac Pherson es que las fuerzas de fricción provocadas por el deslizamiento de los elementos que hacen las veces de guía en los amortiguadores son mucho mayores que las que resultan en los sistemas de suspensiones de brazos desiguales, en los que las funciones del varillaje están desempeñadas únicamente por las barras y los amortiguadores no participan de misión estructural alguna por lo que no soportan en ningún momento esfuerzos de flexión.
- La variación en el ángulo de caída como resultado de los movimientos verticales de la suspensión es generalmente menor con un sistema Mac Pherson que con uno de brazos desiguales; en cambio las variaciones en el ancho de vía son mayores en este sistema especialmente cuando las ruedas caen como consecuencia de un rebote hacia una posición más baja, conservando un ángulo menor con la vertical.

## **D. Vehículos eléctricos fórmula ELECTRATÓN**

**1. Historia y antecedentes.** El primer auto eléctrico se construyó en Escocia en 1834. Las carreras de vehículos eléctricos se iniciaron en 1889, y en 1899 el auto eléctrico "La Jamais Contente" fue el primer vehículo en rebasar la velocidad de 100 Km/hr.

En 1978, la Asociación de Vehículos Eléctricos de Inglaterra inició una competencia cuyo objetivo era estimular que la gente construyese sus propios vehículos, por lo cual se creó una categoría sencilla y no costosa. Este primer Electratorón fue llamado "The Lucas Electric Vehicle Endurance Run". El Presidente de la Asociación de Vehículos Eléctricos de Australia presenció este evento y en 1980 organizó uno similar en su país. Para 1983 aerodinámicos vehículos alcanzaban velocidades de 80 Kms/hr.

En 1990 se introdujo la categoría Electratorón en California, Estados Unidos, siendo las principales organizaciones promotoras NERA (New Electrathon Racing Association ) y Clean Air Revival (CAR). La "Copa Electratorón 1990" desencadenó creciente entusiasmo, multiplicación de vehículos y subsecuentes carreras. Más adelante se creó un proyecto ingenieril de Electratorón para colegios de nivel bachillerato.

Además de la categoría "Fórmula Electratorón" conformada por el reglamento desarrollado en Australia, se creó una nueva categoría, "Fórmula Electratorón Experimental" (F/Ex), cuya mayor apertura propicia audaces innovaciones en el diseño y mejoras en el desempeño de los vehículos. En 1993, simultáneo al proyecto del Primer Auto Solar de carreras Mexicano, Fórmula Sol comienza a promover ELECTRATÓN MÉXICO.

**2. Electrón en Guatemala.** A mediados de 1997, la mexicana Beatriz Padilla, trae consigo la idea de Electrón a Guatemala, promoviéndola en todas las universidades del País. Con mucho entusiasmo logra llevar a cabo el proyecto y en Junio de 1998 da el banderazo de salida de la primera carrera del 1er. Campeonato F/Ex Guatemala, con la participación de 14 vehículos.



**Fotografía 1.** *El Enigma en Cobán*

La Universidad del Valle a través de sus dos vehículos participantes, Air droopy y Enigma logran copar los primeros puestos del campeonato, siendo el Air droopy ganador absoluto del campeonato en una emocionante última carrera en la plaza de la Constitución (parque central) donde la UVG hace el 1 y 2 en esta prueba final. Adicionalmente el Enigma fue galardonado con tres premios:

- El diseño más innovador, por su sistema de aceleración en el volante.
- El vehículo con mayor progreso, por su constante mejoramiento, desde la primera carrera hasta la última siempre fue quedando en mejores posiciones y su desempeño general nunca tuvo retrocesos.



**Fotografía 2.** *Enigma en Parque Central*

- El vehículo más confiable, dado que en las últimas tres carreras fue el único vehículo que no realizó ningún ingreso a los pits de reparación durante la competencia, y terminó las carreras con la energía suficiente, sin desmayar al final.



**Fotografía 3.** *Enigma en la meta en última carrera*

Luego de finalizado este exitoso campeonato, los esfuerzos por continuar este proyecto se desvanecieron debido a la falta de entusiasmo de los nuevos dirigentes y el proyecto básicamente se quedó estancado y durmiendo, esperando que algún día podamos volver hacer andar este fabuloso proyecto.



**Fotografía 4.** *Enigma y Air Droopy al ganar el campeonato.*

### **III. SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DEL ENIGMA**

Como se ha visto en las secciones anteriores, la suspensión y la dirección forman una parte esencial en la elaboración de cualquier vehículo. En el caso de los vehículos fórmula Electratrón experimental, en adelante F/Ex, estos sistemas se simplifican bastante, debido a que por lo liviano de los F/Ex, estos elementos mecánicos no pueden ser muy complejos ni pesados.

#### **A. Especificaciones y requisitos**

Como todo diseño mecánico, éste debe basarse en algunos requisitos indispensables, para el buen funcionamiento del mismo. Para poder construir un vehículo F/Ex existe un reglamento de diseño y competencia, al cual se tienen que ceñir todos los vehículos participantes en esta categoría. A continuación se detallan los incisos que afectan directamente el diseño y construcción de la suspensión.

**1. Reglamento de diseño y competencia categoría Electratrón.** Las normas establecidas en este reglamento son de tipo general, y aunque no definen formas, configuraciones ni sistemas a emplear, si es muy concreto en definir ciertos requisitos que se deben cumplir indistintamente de los elementos y conjuntos mecánicos a utilizar.

Dentro de este reglamento, en el capítulo II "Reglamento de diseño", en el inciso B, "Sistema Mecánico", define muy claro los elementos básicos para poder construir el vehículo.

Estos son:

**a. Ruedas y ejes.**

- El peso de los vehículos deberá estar apoyado en un mínimo de tres ruedas.
- Las ruedas y ejes deberán ser lo suficientemente fuertes para someterse a las pruebas de escrutinio para frenos y maniobrabilidad. Las ruedas deberán estar cubiertas si existe la posibilidad que el piloto tenga un contacto inadvertido con las ruedas.

**b. Dirección.**

- Para las partes de dirección se han establecido tamaños mínimos con el fin de disminuir la probabilidad de fallas. Los brazos de dirección, las rótulas y los soportes utilizados para montar todos los componentes de la dirección, deberán ser no más débiles que una barra de acero de 5/16" de diámetro. El uso de espárragos de acero dulce no está permitido.
- El giro de la dirección debe tener topes físicos que limiten su carrera para evitar un exceso de giro en las ruedas.
- Todas las tuercas que sirvan como fijación de piezas móviles (tales como rótulas o ejes) deberán ser de seguridad. En caso de no conseguirlas, podrán utilizarse tuercas normales, siempre y cuando éstas estén alambradas con los tornillos o barras utilizados.
- Los tornillos que fijan el volante al poste de la dirección deben quedar ocultos o tener cabeza de bola para proteger al piloto contra lesiones
- Los pernos guía (king pins) deberán estar hechos de un material tan resistente o más que una barra sólida de acero de 1/2" a 5/8".

- Los vehículos deberán tener un radio máximo de giro no mayor a 5 metros.
- El vehículo debe ser capaz de esquivar diez conos espaciados entre sí por 8 metros, en menos de 20 segundos (prueba de estabilidad).

Además en el inciso C, "Seguridad", define otros puntos necesarios para tomar en cuenta a la hora de completar el diseño.

**c. Dimensiones.**

- La longitud máxima de un vehículo Electrón es de 4 metros, el ancho máximo es de 1.5 metros.

**d. Protección contra choques.**

- Todos los vehículos deberán tener miembros estructurales y acojinamientos que protejan al conductor en caso de colisiones frontales, laterales o traseras. La medida mínima de tales miembros estructurales deberá ser tubo redondo o cuadrado de  $\frac{3}{4}$ " con el calibre correspondiente, según las siguientes especificaciones:
  - Si el tubo es de acero dulce, calibre 16 (1.62mm)
  - Si el tubo es de acero al cromo molibdeno 4130, calibre 1.4 mm
  - Si el tubo es de aluminio, calibre 12 ó cédula 40 (2.1 mm)
- Las estructuras que no estén construidas de ninguno de los materiales descritos anteriormente, podrán ser permitidos a criterio de los oficiales.

**2. Otras especificaciones.** En el capítulo II, sección B.2, se definieron los requisitos indispensables de una buena dirección, como lo son reversibilidad controlada, suavidad, precisión y estabilidad. Aunque ya he hablado con anterioridad de las siguientes definiciones, en este punto defino ciertas características y especificaciones propias para un vehículo Electratorón basadas en la experiencia de varios constructores alrededor del mundo.

**a. Sistema Ackermann.** Para un buen desempeño del sistema directriz, es necesario aplicar el sistema Ackermann, descrito en el inciso B.4.b.2 en detalle. Si el giro fuera paralelo, la llanta exterior rozaría con el pavimento provocando severas pérdidas por fricción; sin embargo, por medio de una barra de acoplamiento basado en el sistema Ackermann se logrará evitar dicho problema. Esta barra de acople debe tener una longitud menor a la barra de soporte en cuyos extremos se encuentran los centros de giro de los pernos maestros de las ruedas. Esta longitud se determina trazando una línea imaginaria del centro del eje trasero hacia los centros de los pernos maestros; dichas líneas generan un ángulo con respecto al eje longitudinal del auto. Este ángulo nos muestra la posición en la que deben colocarse los brazos Ackermann de la dirección determinando así, la longitud de la barra de acoplamiento.

**b. Ángulo de caída o Camber.** Este ángulo debe ser positivo para permitir un fácil manejo del automóvil y evitar un desgaste en las piezas que integran el mecanismo de la dirección. Solo hay que tomar en cuenta que si el ángulo es excesivo, puede provocar un desgaste excesivo en el neumático. Este va directamente relacionado al ángulo de salida o de inclinación.

**c. Ángulo de inclinación o salida (steering).** Es la inclinación del pivote de la dirección con respecto a la vertical. La prolongación del eje del pivote, por medio de una línea imaginaria, debe cortar con el eje longitudinal de la rueda en el piso, lo cual se logra inclinando la

rueda, el pivote o ambos. El ángulo de salida de la rueda, con respecto a la vertical, no debe pasar de 5° cuando el vehículo se encuentra totalmente cargado.

**d. Ángulo de convergencia o Toe In.** Estos ángulos sirven para mantener el paralelismo de las ruedas cuando el auto va en marcha y no deben ser mayores a los 4°. Es necesario mencionar que en un auto eléctrico es indispensable mantener dicho paralelismo para evitar al máximo las pérdidas por arrastre.

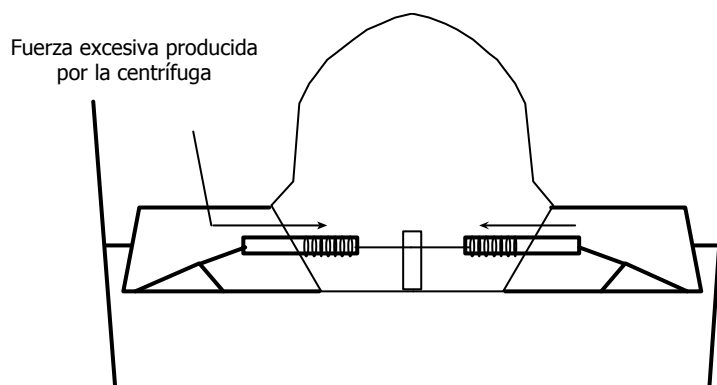
**e. Ángulo de avance o Caster.** Este ángulo se determina rotando el eje del pivote de tal manera que el eje vertical de la rueda, quede por detrás del punto de corte de la prolongación del eje del pivote sobre el piso. Este ángulo no debe exceder los 6° de inclinación, porque de llegar a hacerlo, podrían presentarse oscilaciones violentas en las ruedas directrices provocando inestabilidad en el vehículo.

**f. Desmultiplicación de la dirección.** Esta relación es la que existe entre los ángulos de rotación del volante con respecto a la de las ruedas. Para un vehículo de poco peso, como un Electratón, es recomendable una relación entre 9:1 a 15:1. Además los vehículos deben contar con unos topes físicos para limitar el movimiento de giro.

**g. Suspensión.** El diseño se basa en el sistema de suspensión delantera independiente con brazos transversales desiguales. Es indispensable que los brazos inferiores sean más largos que los superiores para ayudar al equilibrio del vehículo en las curvas.

## B. Diseños preliminares

Inicialmente la idea era desarrollar un vehículo que se autonclinara en las curvas. La búsqueda de este mecanismo dio como resultado un primer diseño que se sustentaba en el sistema de barras transversales desiguales y un mecanismo de amortiguadores con muelles horizontales, como se muestra en la figura 26.



**Figura 26.** Esquema del primer sistema de suspensión

Al hacer un primer análisis del vehículo bajo carga normal y en reposo, incluyendo al piloto, la suspensión parecía comportarse muy bien, siendo factible lograr una pequeña inclinación positiva hacia el centro de giro, con solo apoyar el cuerpo de ese lado. En velocidades muy bajas tenía una buena adaptación a cualquier terreno, pero al desarrollar velocidades altas la estabilidad del vehículo disminuía a causa de la suspensión suave, volviéndose peligrosa la conducción de este.

Inclusive el vehículo no pudo pasar la prueba de slalom establecida en el reglamento de diseño del Electratón, ya que de las tres veces que realizó la prueba no bajó de los 20 segundos máximos que exigían como requisito para superar la prueba y poder participar en las competencias.



**Fotografía 5.** *Enigma con el primer sistema de suspensión*

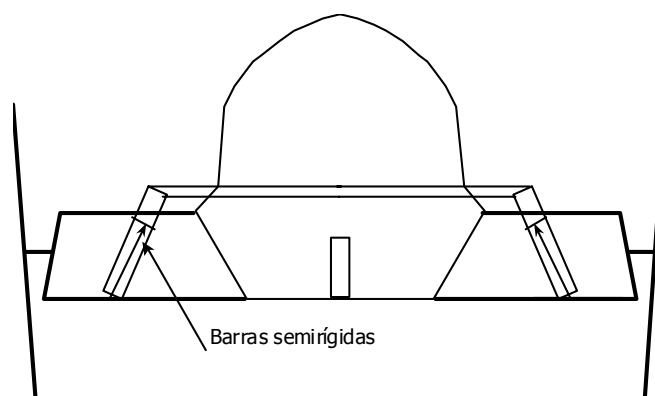
En la fotografía superior se observa cómo quedó este sistema en el Enigma. Al centro se observan los amortiguadores, en posición horizontal. Uno de los mayores problemas era que cuando se ponía bajo carga, los amortiguadores se inclinaban hacia abajo, dejando de aplicar una fuerza de apoyo al conjunto, provocando así inestabilidad, haciéndose más evidente en las curvas.

Al comprobar que no cumplía el requisito de estabilidad mínimo se optó por un segundo sistema, partiendo de este mismo.

Para contrarrestar el problema de la suspensión, se eliminaron los amortiguadores horizontales y se sustituyeron por unos amortiguadores verticales de gas que ya habían dado su vida útil. Con esto lo único que se buscó fue hacer parcialmente rígido el sistema, ya que al no tener ninguna presión el amortiguador, bajo carga el sistema se comportaba como un sistema sin suspensión y solo se mostraba una pequeña compensación a la hora de ingresar en las curvas, pues al levantarse el vehículo por la acción de la fuerza centrífuga el émbolo del

amortiguador descendía ligeramente y permitía una recuperación de la adherencia un poco mejor que en el primer vehículo.

Su desenvolvimiento en terrenos no uniformes, provocaba una fuerte vibración que era transmitida hasta el volante de dirección haciendo que el manejo del vehículo produjera fatiga al piloto. A pesar de este inconveniente, el vehículo logró superar las pruebas de estabilidad, con tiempos por debajo de los 19 segundos, ingresando de manera satisfactoria a las competencias de Electrátón.



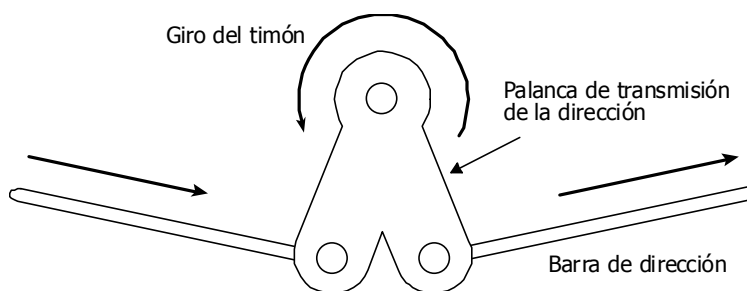
**Figura 27.** Esquema del segundo diseño

En la fotografía inferior se observa claramente el detalle de los amortiguadores unidos por un puente soldado a la estructura tubular del vehículo. Los amortiguadores se colocaron de manera que los brazos de suspensión del vehículo se mantuviera horizontales, incluyendo los brazos de suspensión, al estar apoyados sobre ellos. Esto era para evitar pérdidas por fricción, derrape en las curvas y para mantener las geometrías de los distintos ángulos como el caster, camber, etc.



**Fotografía 6.** *El enigma con el segundo sistema de suspensión*

El sistema de dirección inicial seleccionado fue el de palanca de transmisión en el cual se tenía una relación de 1.10:1. Esto significa que para girar  $30^\circ$  las llantas hay que girar  $32^\circ$  el volante o timón del vehículo. Esta dirección es sencilla y liviana, pero hace difícil el control de la dirección, causando imprecisión en los movimientos.



**Figura 28.** *Esquema de la dirección con palanca de transmisión*

## C. Evaluación de alternativas

Luego de analizar detenidamente estos dos diseños preliminares, se puede observar que muestran suspensiones completamente opuestas, una muy suave, y la otra muy rígida.

Frente a este panorama era necesario implementar un sistema de suspensión adecuado, eficiente y sencillo. Lo ideal sigue siendo poder crear un sistema autoinclinable, pero luego de múltiples evaluaciones de mecanismos que pudieran realizar el movimiento de inclinación hacia adentro contrario a la fuerza centrífuga, el sistema se vuelve muy complejo agregándole múltiples mecanismos que supondrían un mayor peso al vehículo, y aunque eso redundaría en una mayor estabilidad, hace mucho menos eficiente el consumo de energía, alejándose del objetivo principal que es el mejor aprovechamiento de la energía. Adicionalmente la necesidad de una fuerza que contrarreste a la fuerza centrífuga repercute directamente en la dirección haciendo a esta mucho más dura y difícil de controlar sin los mecanismos necesarios como los sistemas servo asistidos, algo que esta fuera de contexto dentro de la categoría Electrón ya que se busca la simplicidad de todos los mecanismos.

Luego de estudiar a fondo los distintos sistemas de dirección y los sistemas de suspensión, el sistema que mejor se presta para este tipo de vehículo es en definitiva el de barras transversales desiguales. Hay que agregar que en el sistema de brazos, el ancho de vía al subir la suspensión varía muy poco en comparación al sistema Mac Pherson. Aunque tiene algunas desventajas sobre el Mac Pherson, como utilizar más elementos, haciéndolo más pesado, esto ayuda en alguna medida a disminuir el tiempo que las ruedas puedan estar suspendidas, ya sea por efecto del terreno no uniforme, o de la fuerza centrífuga en las curvas.

Consecuentemente, al elegir un sistema de suspensión independiente, el sistema de dirección debe ser del tipo Ackermann para obtener una buena relación Suspensión-Dirección.

La transmisión de la dirección se cambiará a una de piñón y cremallera, para desmultiplicar la relación de la dirección a efecto de suavizar la conducción del vehículo, en sustitución de la palanca de transmisión que es un sistema muy duro e impreciso.

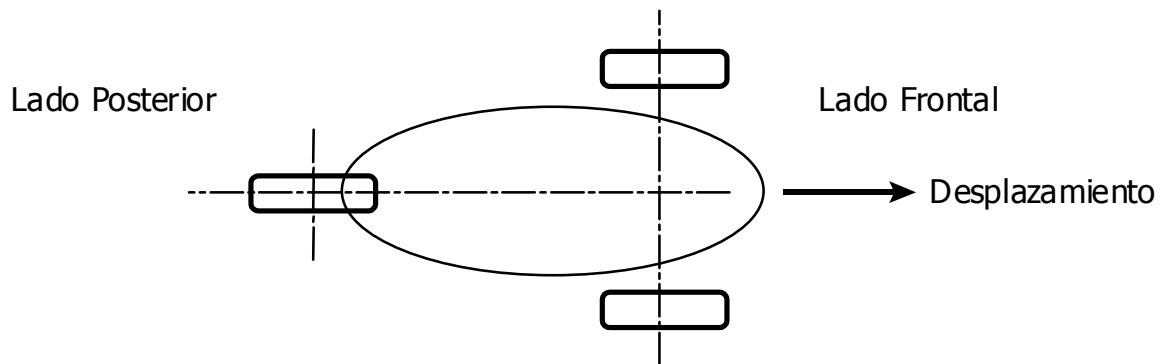
## D. Diseño final

Luego de haber evaluado las alternativas y los diseños preliminares, continua el proyecto con la elaboración del diseño final previo a su construcción. Es indispensable definir algunos factores importantes y necesarios para poder dimensionar el sistema de dirección-suspensión, tales como el tipo de chasis, tipo de amortiguadores y tipo de dirección entre otros. A continuación se detallarán los diferentes cálculos y dimensiones elegidos para la elaboración del sistema suspensión – dirección.

**1. Chasis.** El chasis es de suma importancia, ya que este va a definir la disposición del resto de elementos en el vehículo como la suspensión y la dirección. Entre las características del chasis esta el tipo y la configuración.

**a. Tipo de chasis.** Se utilizará el chasis tubular ya que ofrece rigidez, ligereza y su construcción es sencilla. El material usado en esta estructura es tubo de acero proceso, que tiene buenas características mecánicas, es fácil de soldar y su precio aún es accesible. Se utilizó tubo de 1.5", 1.0" de 0.75" dependiendo de la carga a que estuviera expuesto.

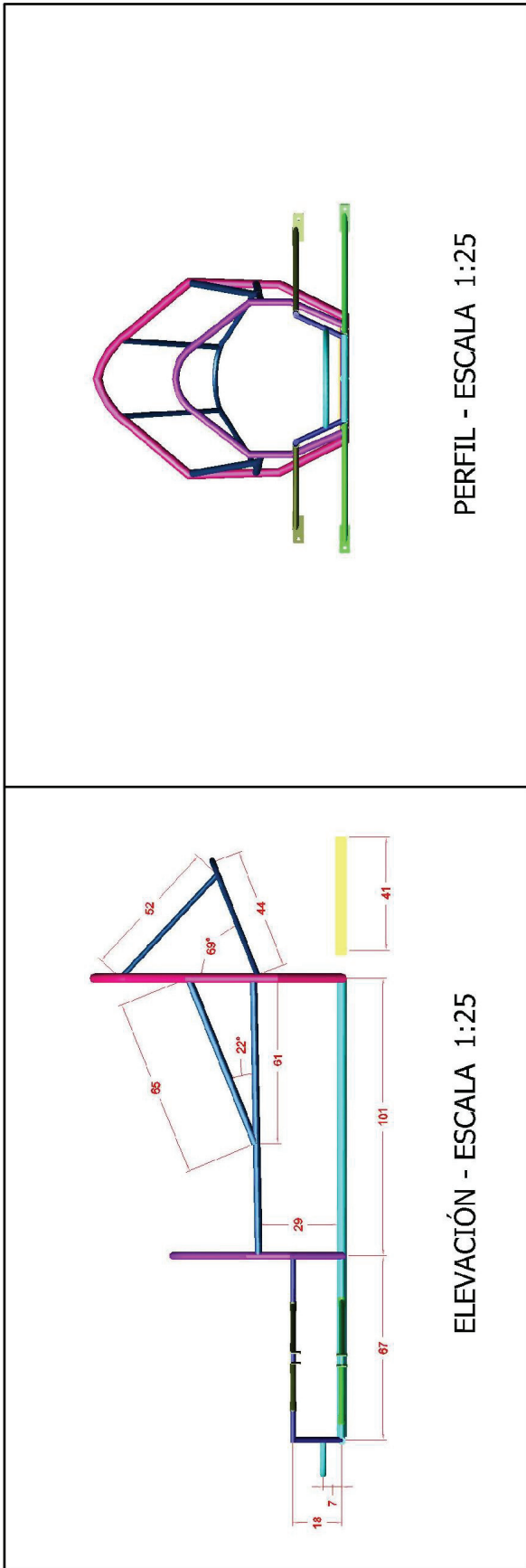
**b. Configuración.** Se eligió el sistema de triciclo invertido por múltiples razones. Esta configuración ofrece mucho mejor estabilidad que un triciclo en flecha y mantiene también sus ventajas sobre el de cuatro ruedas. Al contar con una sola rueda trasera se simplifica el sistema de transmisión, sin embargo, para desarrollar el sistema de dirección y suspensión es necesario introducir los diferentes conceptos de la geometría de suspensión, los cuales son importantes para el desempeño eficiente del vehículo. Otra gran ventaja que presenta la configuración de triciclo es la reducción de la resistencia al rodamiento en comparación a un chasis de cuatro ruedas.



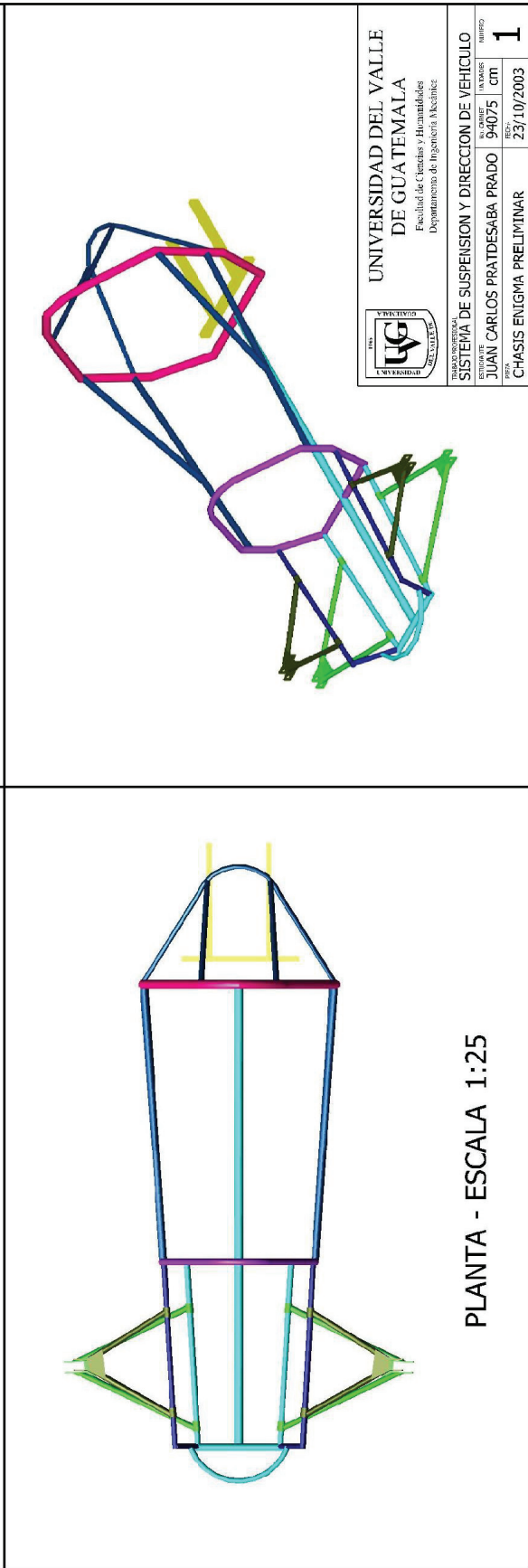
**Figura 29.** Esquema de la configuración de chasis en triciclo invertido

En las páginas siguientes encontrará planos del chasis, tanto del diseño preliminar, plano No. 1, como el del diseño final, plano No. 2. Para lograr un mayor espacio y comodidad del piloto y mantener básicamente la misma cantidad de tubos y crear un diseño más aerodinámico se modificó la estructura del chasis trasladando la mitad del marco intermedio hacia adelante y colocándole unas extensiones del chasis para reforzarlo y no perder rigidez en la estructura. Además como se baja el nivel del marco delantero, aumenta el campo visual del piloto dando un mayor grado de seguridad en la conducción del vehículo.

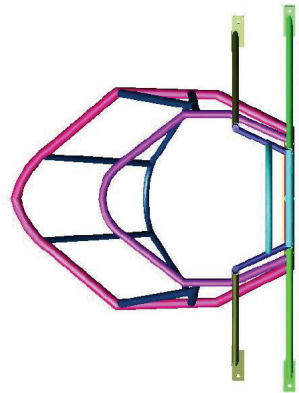
Al trasladar parte del marco hacia adelante, este se utilizará como soporte para los amortiguadores, ahorrándose una estructura adicional. En la parte frontal se le agregó una pequeña barra estructural que aumenta la aerodinámica al momento de colocarle la carrocería, además de utilizarse como soporte del eje del timón.



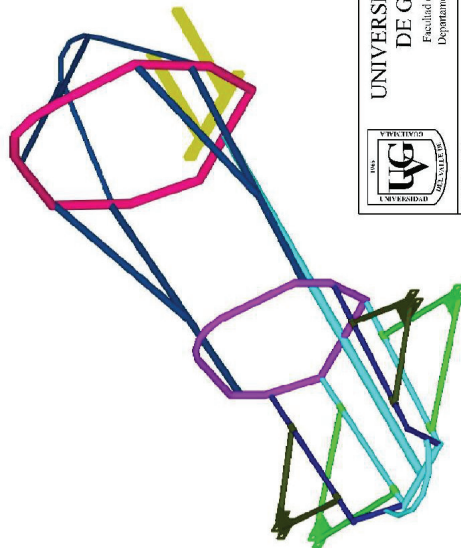
ELEVACIÓN - ESCALA 1:25



PLANTA - ESCALA 1:25

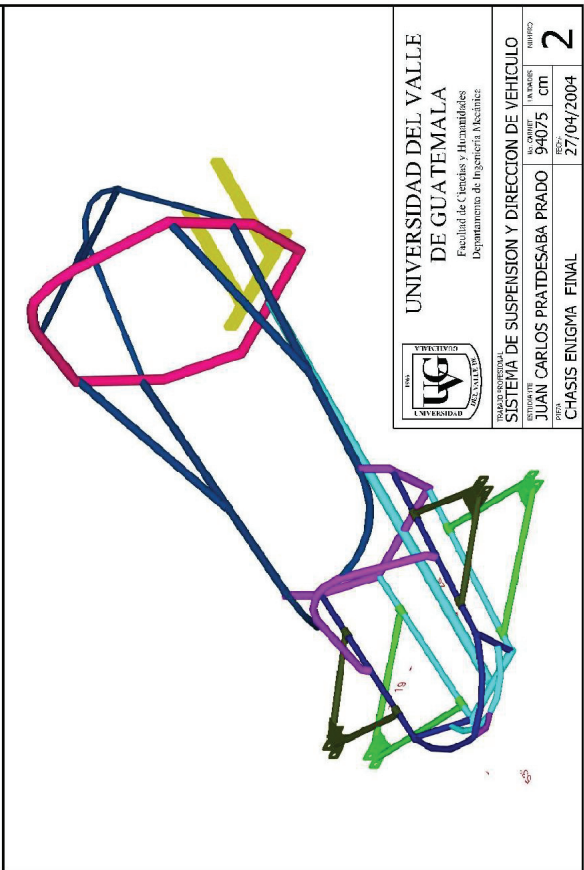
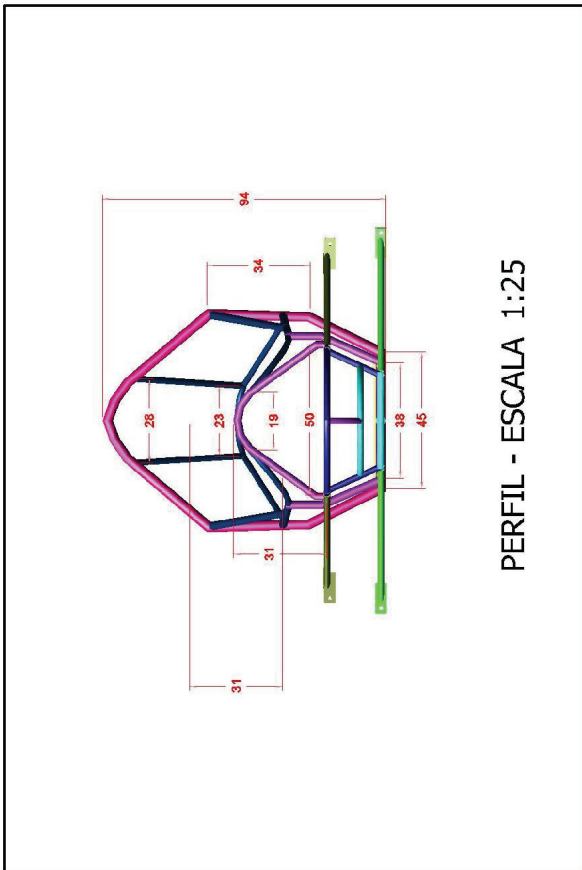
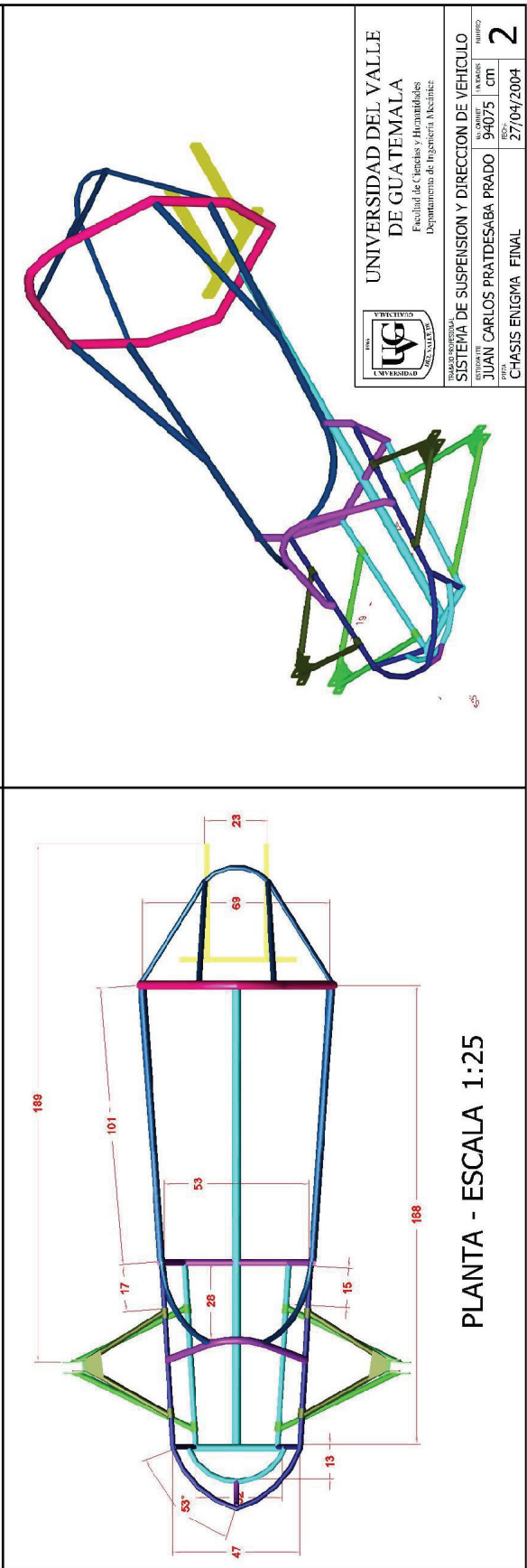
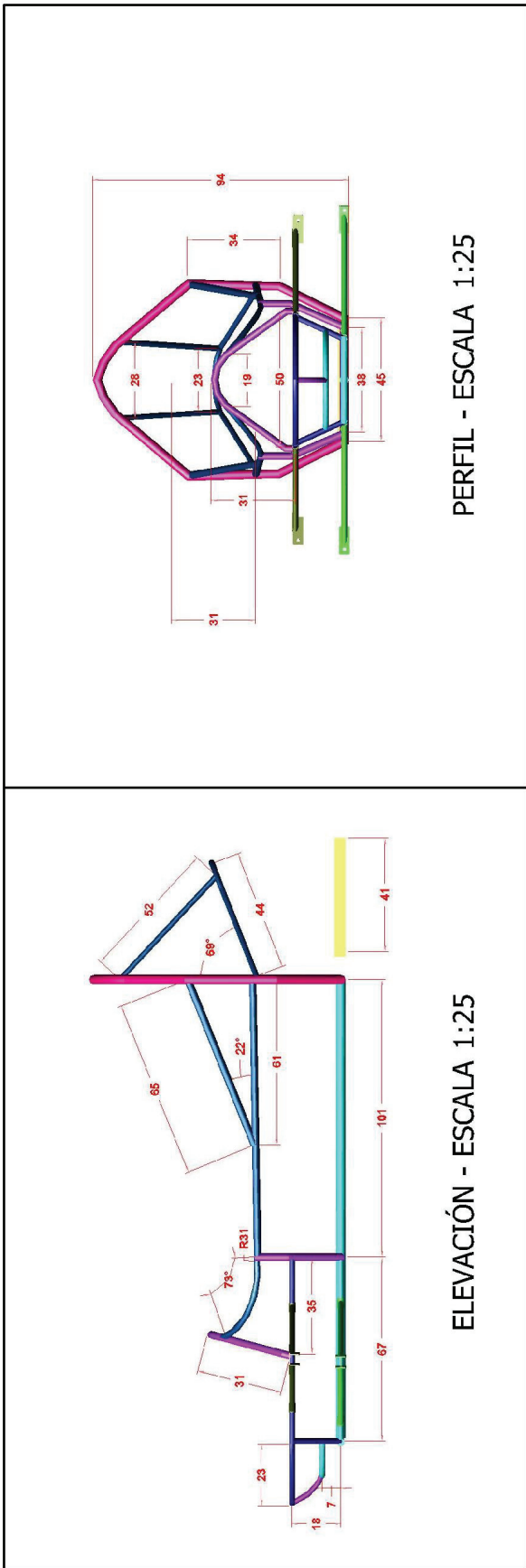



PERFIL - ESCALA 1:25



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO	
PROFESOR	NUMERO
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO	94075   cm
FECHA	NUMERO
23/10/2003	1
CHASIS ENIGMA PRELIMINAR	




**UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA**  
 Facultad de Ciencias y Humanidades  
 Departamento de Ingeniería Mecánica

SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO	
ALUMNO	NUMERO
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO	94075
FECHA	REVISIÓN
27/04/2004	2
CHASIS ENIGMA FINAL	

**2. Suspensión.** De las alternativas preliminares sólo se utilizarán los mismos brazos de suspensión. Las barras transversales desiguales están debidamente dimensionadas en los planos No. 3 y No.4. En este caso la muleta superior se hizo más corta para obtener una mejor respuesta en las curvas y en las irregularidades del terreno ya que ayuda al equilibrio del vehículo. Para evitar que las angulaciones de la dirección se vean afectadas, se hizo más estrecho el chasis del vehículo al nivel de la muleta inferior.



**Fotografía 7.** Vista de los brazos transversales desiguales.

Sobre la muleta inferior va colocada en el extremo externo la mordaza fija que sostiene la parte baja del pivote de la dirección. Un poco más adentro, se encuentra la base para colocar los amortiguadores. En el chasis y sobre el primer arco, se coloca la base superior del amortiguador. Los amortiguadores utilizados en la parte delantera son del tipo convencional con muelle helicoidal, diseñados para motocicletas. Estos son capaces de soportar hasta 188 Kg cada uno. En el planos No. 5 esta la disposición de las muletas en el chasis junto con el amortiguador.

En este tipo de vehículos, los F/Ex, no es necesario el uso de barras estabilizadoras o de torsión, debido a que son vehículos livianos y no están diseñados para todo terreno, además que estas complican más el sistema.

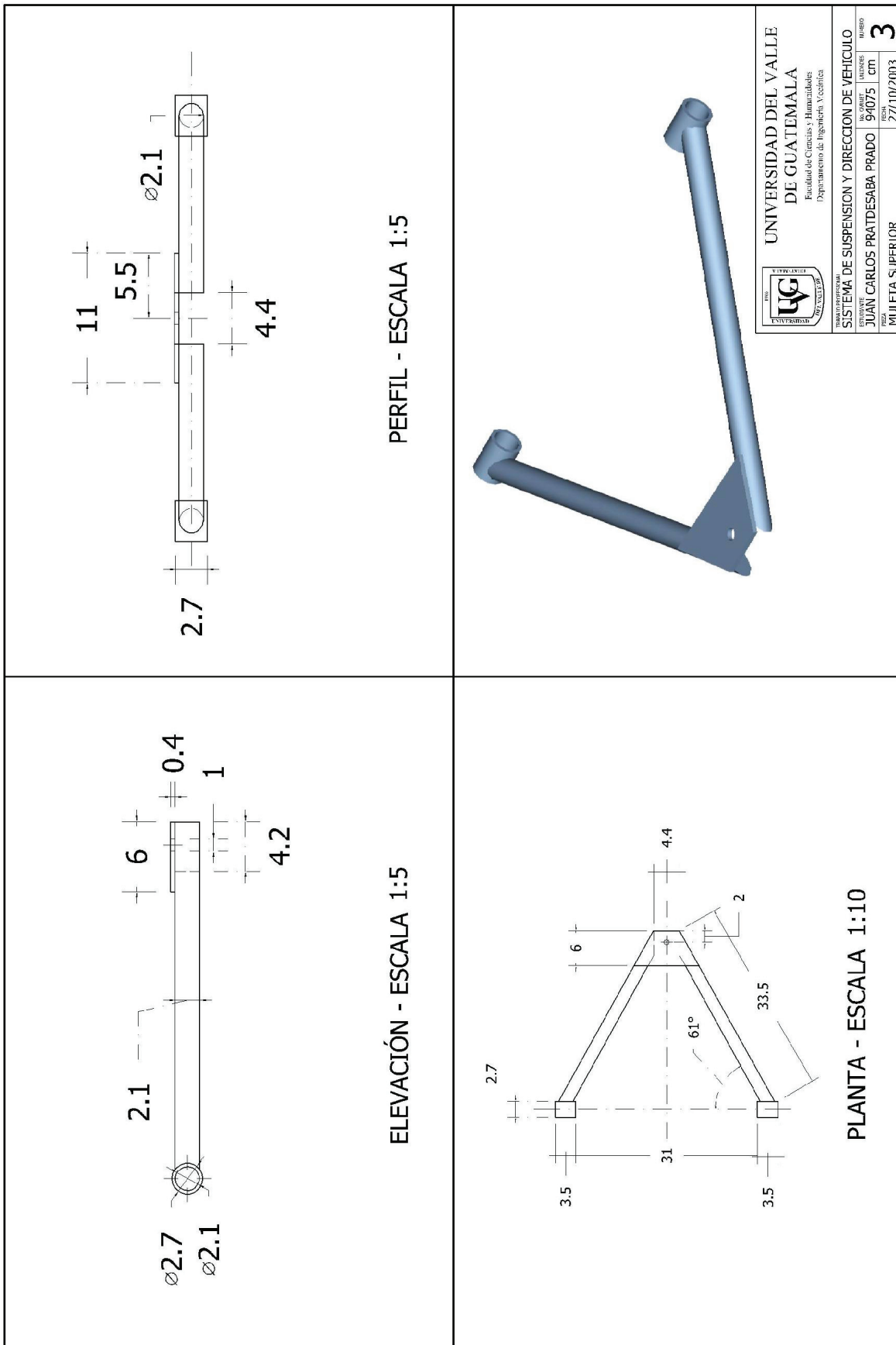
La suspensión trasera está compuesta por dos amortiguadores para motocross en su graduación máxima para endurecerla, ya que están diseñados para todo terreno. La base es una muleta convencional de motocross pivotada al chasis del vehículo. Debido a que únicamente se adaptó un sistema ya existente, no voy a entrar en detalles de la suspensión trasera.



**Fotografía 8.** Suspensión trasera. Vista lateral.



**Fotografía 9.** Suspensión trasera. Vista trasera.

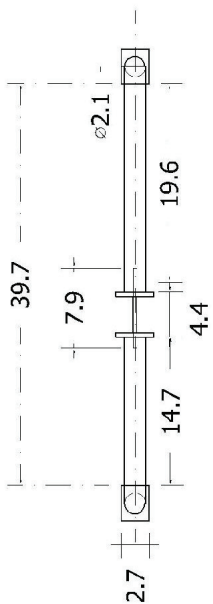


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 Facultad de Ciencias y Humanidades  
 Departamento de Ingeniería y Tecnología

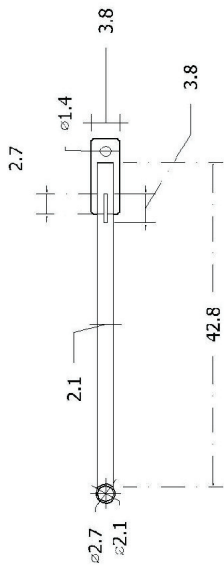
SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO  
 TÍTULO: 94075  
 AUTOR: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO  
 FECHA: 27/10/2003

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO  
 TÍTULO: 94075  
 AUTOR: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO  
 FECHA: 27/10/2003

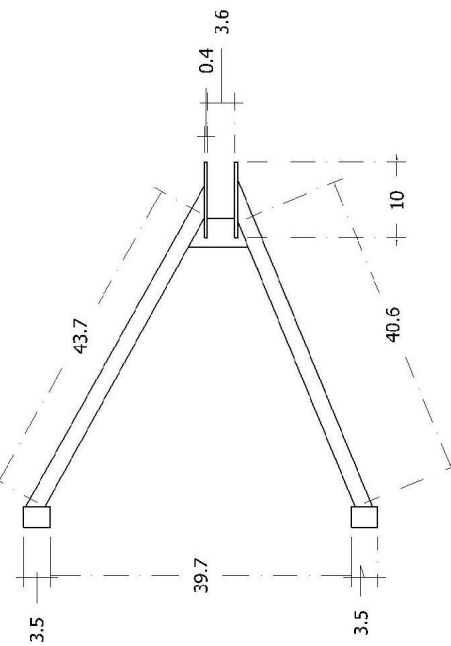
3



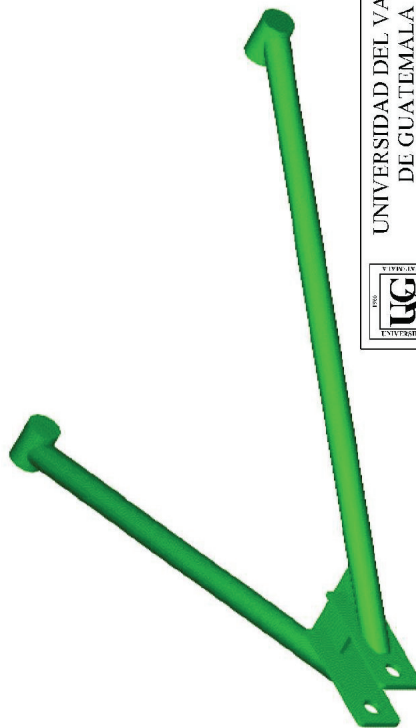
PERFIL - ESCALA 1:7.5



ELEVACIÓN - ESCALA 1:10




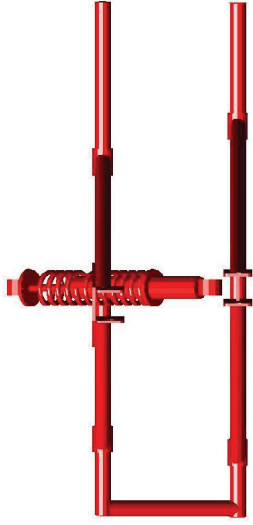
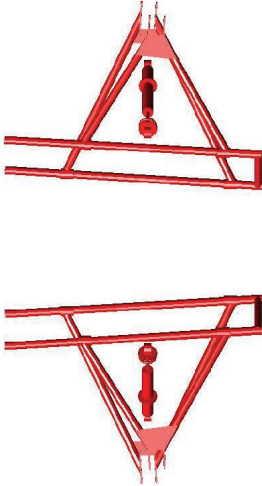
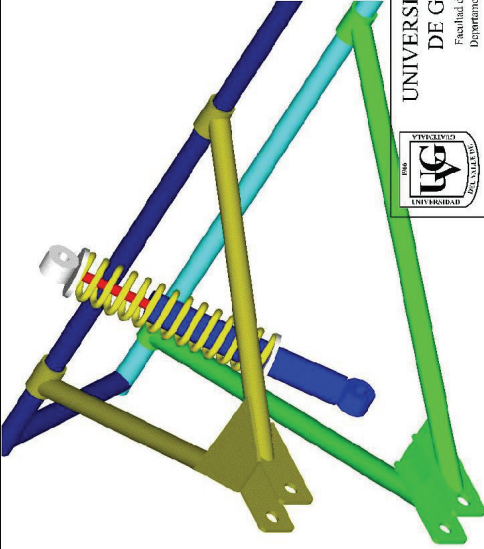

PLANTA - ESCALA 1:10



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
 Facultad de Ciencias e Ingenierías  
 Departamento de Ingeniería Mecánica

SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA  
 AUTOR: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO  
 CODIGO: 94075  
 FECHA: 27/10/2003

FIGURA: 4

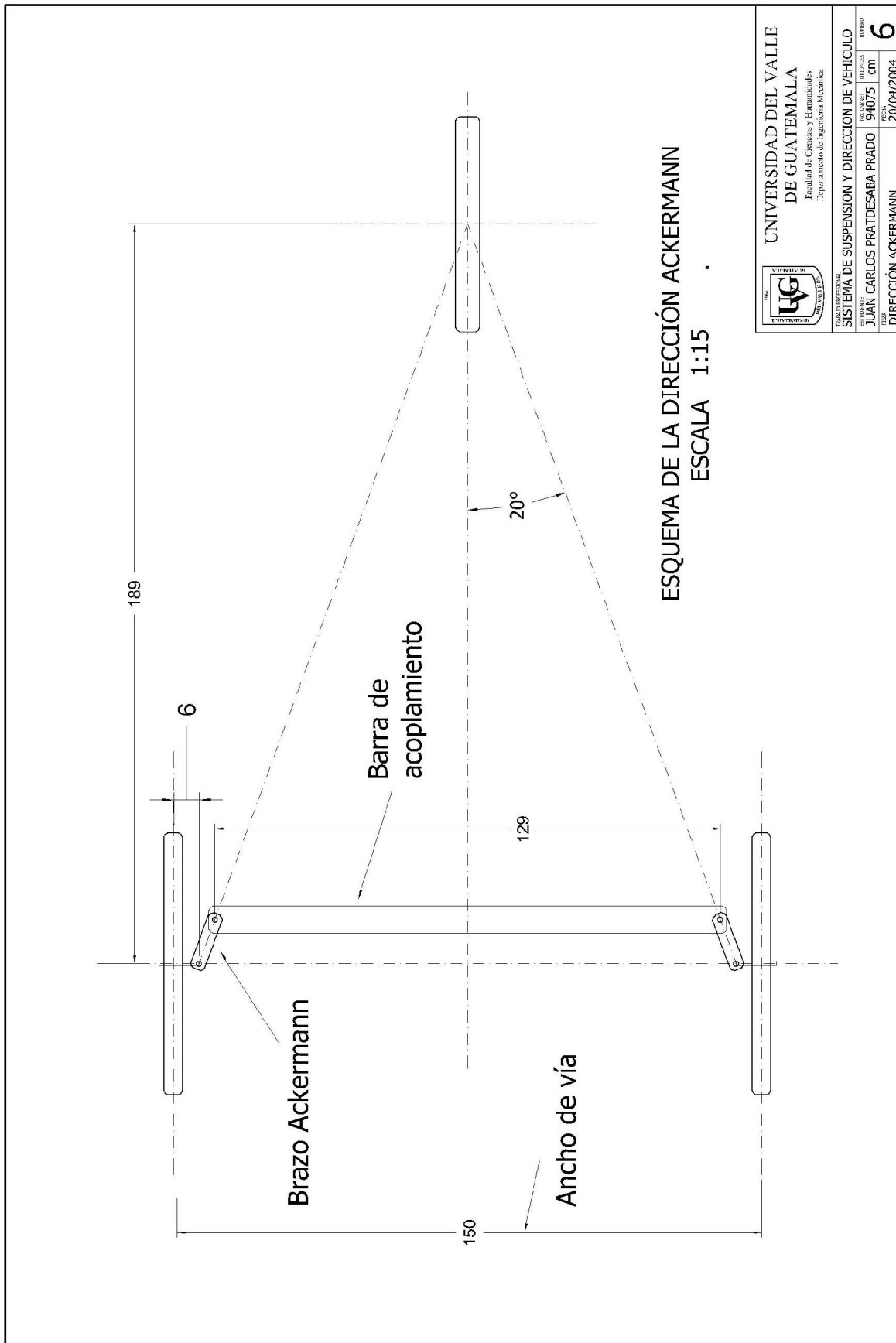
 <p data-bbox="760 1276 797 1654">ELEVACIÓN - ESCALA 1:20</p>	 <p data-bbox="760 443 797 758">PERFIL - ESCALA 1:10</p>
 <p data-bbox="1352 1325 1390 1654">PLANTA - ESCALA 1:20</p>	 <div data-bbox="1247 216 1333 499"> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA Facultad de Ciencias y Humanidades Departamento de Ingeniería Mecánica</p> </div> <div data-bbox="1247 520 1333 604">  </div> <div data-bbox="1339 216 1425 604"> <p>TÍTULO PROFESIONAL: SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHÍCULO CATEDRÁTICO: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO PROYECTO: CONJUNTO DE SUSPENSIÓN</p> </div> <div data-bbox="1339 615 1425 814"> <p>N.º VALORES: 94075   cm FECHA: 23/10/2003</p> </div> <div data-bbox="1382 216 1425 237"> <p>5</p> </div>

**3. Dirección.** Después de haber evaluado el diseño preliminar y las diferentes alternativas, seleccioné un nuevo sistema de dirección basado en el sistema de piñón y cremallera. Esta dirección se caracteriza por la sencillez de su mecanismo de desmultiplicación y su simplicidad de montaje al eliminar gran parte de los eslabonamientos direccionales de otros sistemas. Va unida sobre los brazos de acoplamiento de las ruedas y tiene un gran rendimiento mecánico. Debido a su precisión en el desplazamiento angular de las ruedas su uso en automóviles está muy extendido, ya que disminuye notablemente los esfuerzos en el volante y proporciona suavidad en los giros y tiene gran rapidez de recuperación haciendo que la dirección sea muy estable y segura.

Como ya se definió el tipo de mecanismo de dirección a utilizar, se procede a realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento de los elementos de la dirección.

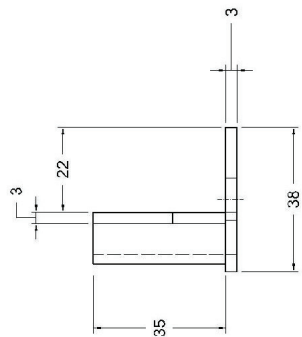
**a. Principio Ackermann.** Este principio indica que de la prolongación del eje de las ruedas tiene que nacer un centro común al radio de giro. Esto significa que, cuando las llantas de un vehículo giran para producir una vuelta, no lo hacen de forma paralela, sino que describen ángulos desiguales de acuerdo con su radio de giro.

Según se observa en plano No. 6, en la siguiente página, dada ya la estructura del vehículo preliminar, nos da un ángulo de  $20^\circ$  entre el eje imaginario longitudinal del vehículo y la prolongación de los pivotes de las llantas delanteras y el eje de la llanta trasera. A partir de este ángulo se definió la angulación del brazo Ackermann con respecto del eje de pivotamiento de la dirección, como se puede observar en el plano No. 7.

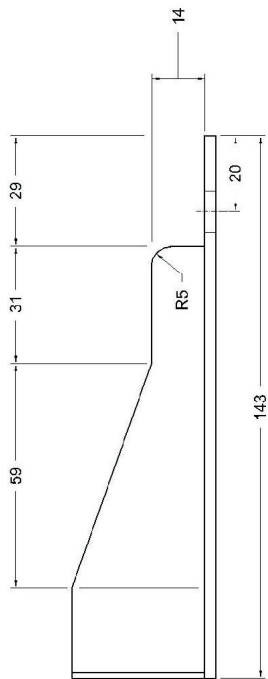


UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

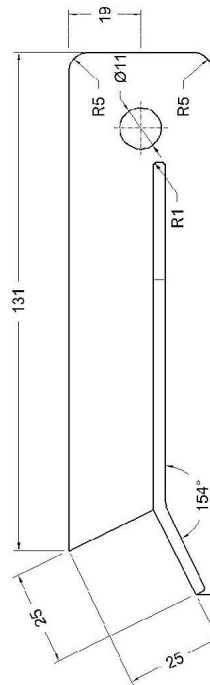
TÍTULO DEL PROYECTO		SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHÍCULO	
PROFESOR	NO. DE C.A.P.E.	UNIDADES	SEMESTRE
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO	94075	cm	
FECHA	20/04/2004		
DIRECCIÓN ACKERMANN		<b>6</b>	



PERFIL - ESCALA 1:2




ELEVACIÓN - ESCALA 1:2



PLANTA - ESCALA 1:2



BRAZO ACKERMANN

 <b>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</b> Facultad de Ciencias e Ingenierías Departamento de Ingeniería Mecánica	
<b>SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO</b>	
TÍTULO:	CURSO:
AUTOR:	FECHA:
TEMA:	NÚMERO:
BRAZO ACKERMANN	7
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO	54075
23/10/2003	7

**b. Relación de transmisión.** Es la razón que existe entre el ángulo de giro  $\beta$  del volante y el correspondiente de viraje  $\alpha$  de la rueda directriz. En este nuevo diseño voy a establecer la relación de manera que con dos giros completos del volante, las llantas directrices giren de su extremo derecho hacia su extremo izquierdo, para tener una dirección suave y precisa, de manera que esta se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Giro del volante: } \beta = 720^\circ$$

$$\text{Giro de las llantas: } \alpha = 60^\circ, \text{ limitado por la geometría del vehículo.}$$

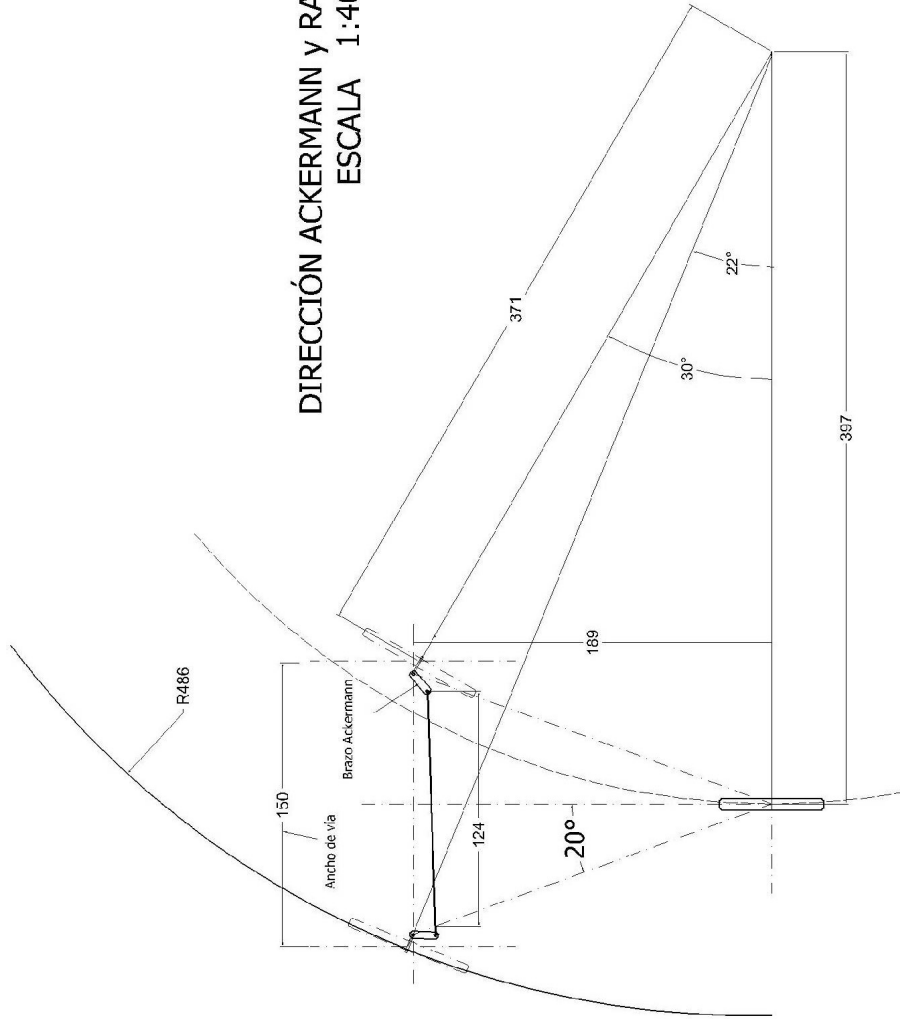
$$\text{Relación de transmisión: } R_t = \beta/\alpha = 720 / 60 = \mathbf{12}$$

Por tanto la relación de transmisión es 12:1.

Como una observación, por lo general la relación de transmisión de la dirección no es igual a lo largo de todas las vueltas del volante. En la posición centrada del volante (conducción en línea recta) el movimiento de las palancas articuladas (varillaje de la dirección) tiene más desmultiplicación que con el volante bien metido a la derecha o a la izquierda. De esta manera se mantiene fácil el vehículo por su carril en los tramos rectos y se pueden virar las ruedas con mayor rapidez en las curvas cerradas.

**c. Radio máximo de giro.** En el plano No. 8 se observa la geometría de giro del Enigma, para su giro máximo de llanta de  $30^\circ$ , con lo cual da un radio interno, a la llanta motriz, de 3.97 m. y un radio máximo a la llanta directriz más externa de 4.86 m. con lo cual se cumple la especificación enunciada en el reglamento de construcción (*vid supra*), donde el radio máximo no debe exceder los 5 metros.

DIRECCIÓN ACKERMANN Y RADIO MÁXIMO DE GIRO  
 ESCALA 1:40



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
 DE GUATEMALA  
 Facultad de Ciencias y Humanidades  
 Departamento de Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA		NÚMERO	
SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO		8	
AUTOR		FECHA	
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO		20/04/2004	
TÍTULO		CARRERA	
RADIO MÁXIMO DE GIRO		INGENIERÍA MECÁNICA	

**d. Ángulos de la dirección.** Para obtener una dirección bien equilibrada y que proporcione una conducción suave y confiable, es importante definir todos sus ángulos dentro de las especificaciones requeridas. A continuación los valores asignados a los diferentes ángulos de la dirección del Enigma:

- Ángulo de caída (Camber): 4.5° con camber positivo.
- Ángulo de salida (steering): 4.5° (graduable).

Estos dos ángulos están directamente relacionados y calculados de manera que no excedan las especificaciones y además coincide la línea de acción del eje del pivote con la inclinación de la rueda justo a nivel del suelo. La relación entre estos dos ángulos está fija, ya que el ángulo entre los ejes es de 9°, pero el diseño permite graduar el ángulo de salida con respecto de la vertical, ya que la mordaza que sostiene al pivote en la barra superior de la suspensión posee graduación hacia adentro o hacia fuera, permitiendo con este movimiento la variación del ángulo de salida, ya que la mordaza que sostiene el pivote en la barra inferior esta fijo.

- Ángulo de avance (Caster): 5° .

El Caster está definido un grado menor que el máximo para evitar que se presenten oscilaciones violentas que provoquen inestabilidad en las llantas directrices. Este ángulo está dado al desfasar sobre el chasis las muletas de la suspensión, moviendo hacia atrás la muleta superior. Ya con el ángulo correcto se fijan los topes de la muleta, y queda fijo el Caster.

- Convergencia: 3° (graduable).

Este se modifica acortando o alejando las rótulas de la dirección según sea necesario.

**e. Mecanismo de dirección.** El mecanismo está constituido por una cremallera tallada en una barra que se desplaza lateralmente en el interior de un cárter. Esta barra es accionada por un piñón (plano No. 9), que generalmente es helicoidal, pero en este caso se optó por uno de engrane recto debido a su facilidad de construcción, montado en el eje del y que gira engranado con la cremallera.

Debido a consideraciones de espacio y confort, además de tener ángulos muy agudos, agregué un eje de transmisión entre la flecha del timón y la barra de la cremallera, conectados a través de sproket y cadena del mismo número de dientes, con lo cual no se ve afectada la relación de transmisión, o desmultiplicación, entre el timón y las barras de dirección. Esta flecha regresa la transmisión hacia el piñón. Entre esta barra y la barra con el piñón existe una junta homocinética (junta Hooke o unión universal) que permite corregir el ángulo sin perder la fuerza de transmisión, y sin necesidad de más mecanismos. No se utilizó directamente desde la flecha del timón al piñón, porque el ángulo excedería los 15° máximos recomendados para el uso de juntas universales simples, ya que para ángulo mayores se producen vibraciones fuertes, dado que la velocidad y aceleración angular de salida aumenta, al incrementarse el ángulo entre las flechas. Al acoplar la flecha de transmisión, que está conectada al eje del volante, a la flecha del piñón queda un ángulo de 14°, todavía dentro del límite para este tipo de juntas.

El cálculo del piñón se hizo según el módulo de fresa que tenía, en este caso de paso 0.196" y sabiendo que necesito un desplazamiento  $s$  de 3" por vuelta. Necesitamos saber el Paso Diametral  $P$ , encontrar luego el diámetro de paso  $d$ , calcular el número de dientes y el adendo para obtener el diámetro de la pieza que se va a trabajar.

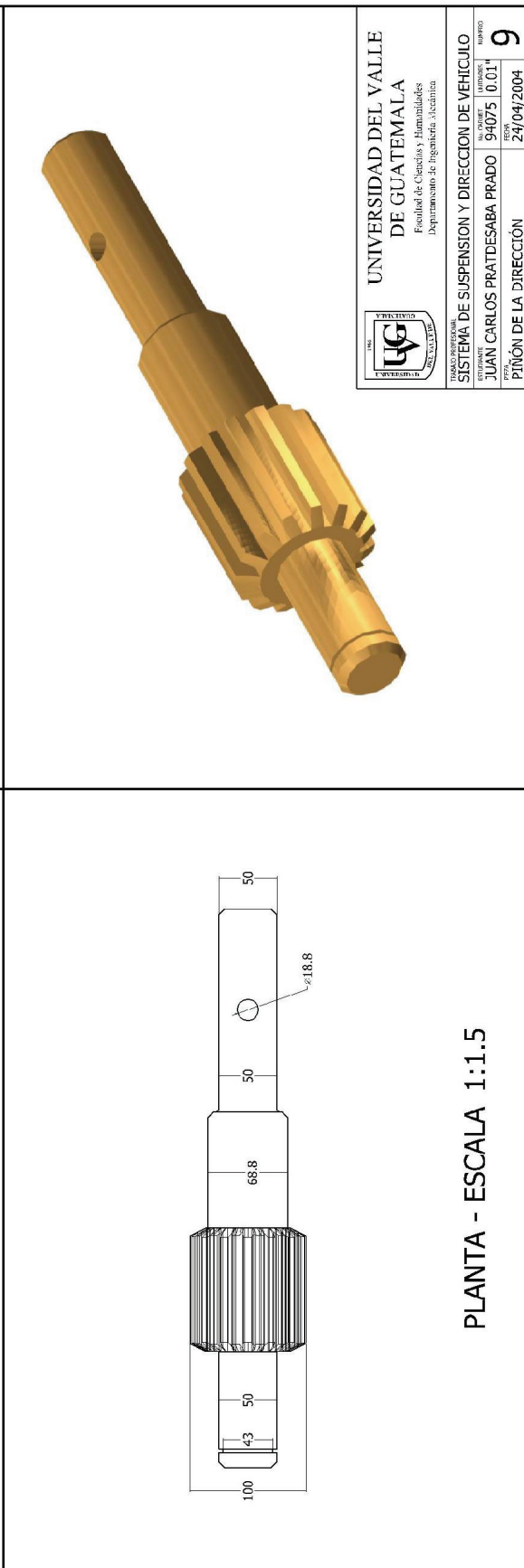
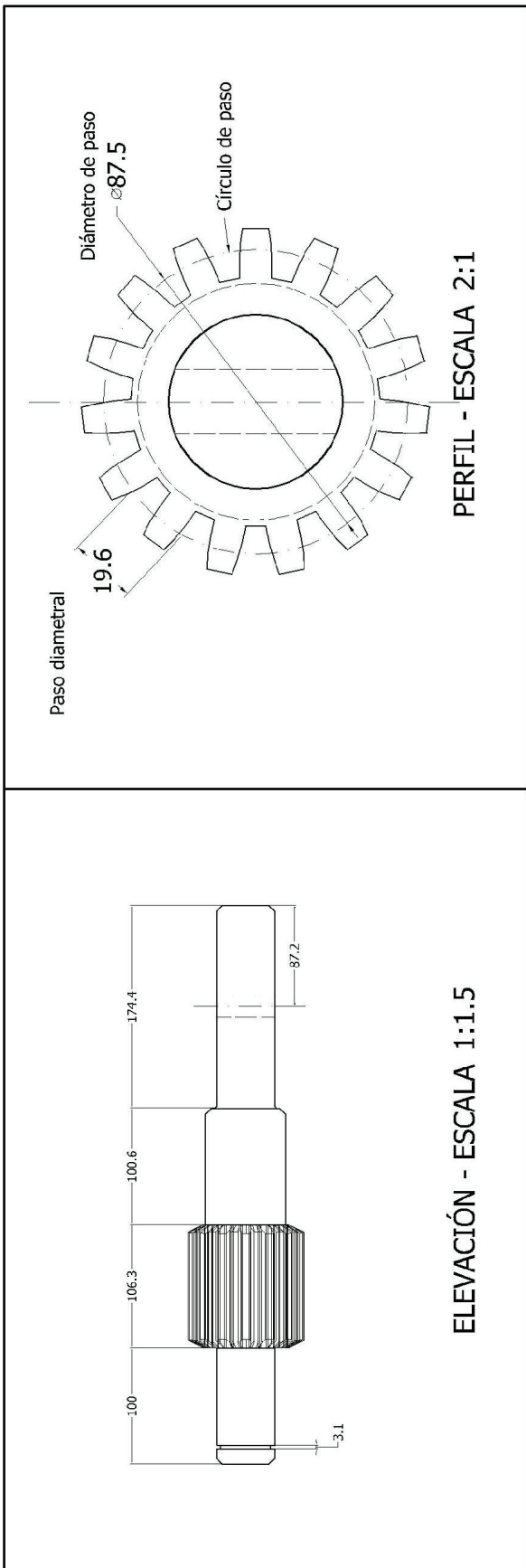
$$P = \pi / p = 3.1416 / 0.196" = 16.02 / \text{pulg} \quad \rightarrow \quad d = s / 3.1416 = 3" / 3.1416 = 0.9549"$$

$$\text{Adendo} = 1 / P = 1 / 16 = 0.0625" \quad \rightarrow \quad \text{Dedendo} = 1.75 / P = 1.75 / 16 = 0.07183"$$

$$\text{Número de dientes: } N_t = P \times d = 16 \times 0.9549 = \mathbf{15 \text{ dientes.}}$$

$$\text{Diámetro de paso corregido: } d = 15 / 16 = 0.9375"$$

$$\text{Diámetro total} = d + 2 \times \text{adendo} = 0.9375 + 2 \times 0.0625" = \mathbf{1.0625" //}$$



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería, Arquitectura

SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO	
ALUMNO	940751001
PROFESOR	JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO
FECHA	24/04/2004
GRUPO	9
PIÑÓN DE LA DIRECCIÓN	

La barra de la cremallera se une directamente a los brazos Ackermann a través de dos brazos de dirección y rótulas de montaje regulables para la corrección de la convergencia, permitiendo al mismo tiempo el movimiento oscilante de las ruedas. Este mecanismo va dotado de una guía de la cremallera para evitar que gire sobre sí. Este elemento consiste esencialmente en un casquillo acoplado a la caja de la dirección y se mantiene a presión por medio de un resorte y un tornillo, que rosca en una platina fijada a la caja. Permite una pequeña graduación de la holgura del piñón y la cremallera, y una vez graduado se fija por medio de una contratuerca.

Para calcular la longitud de la cremallera se utilizó la siguiente fórmula:

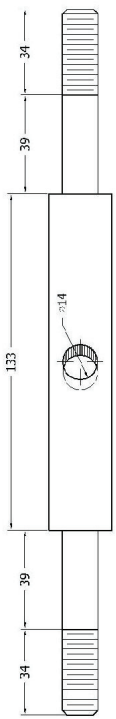
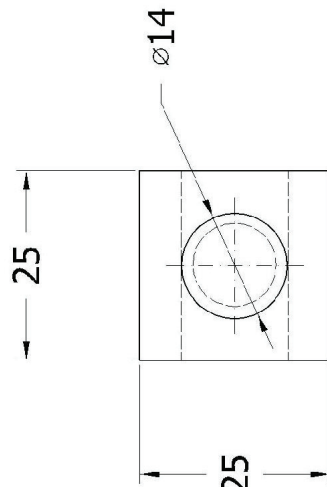
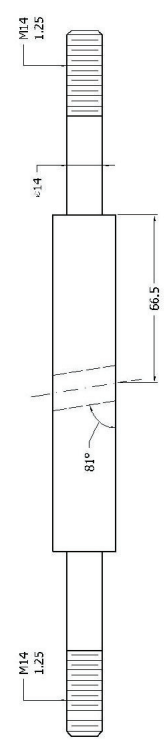
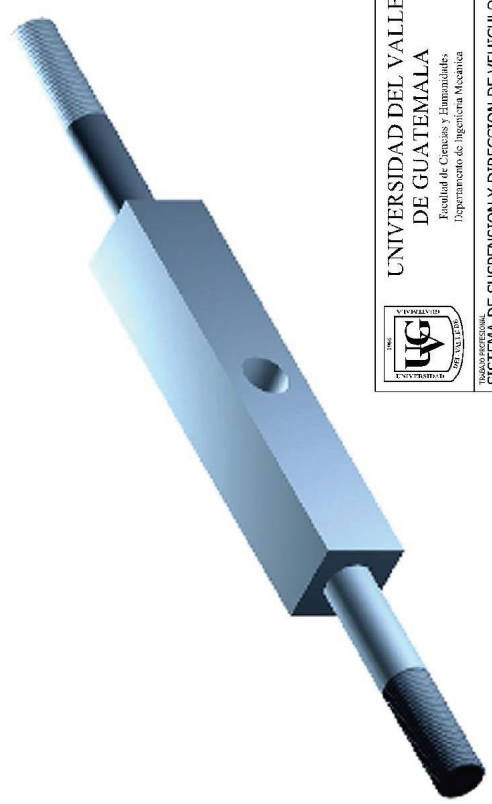

$$s = z * p * \beta / 360^\circ$$

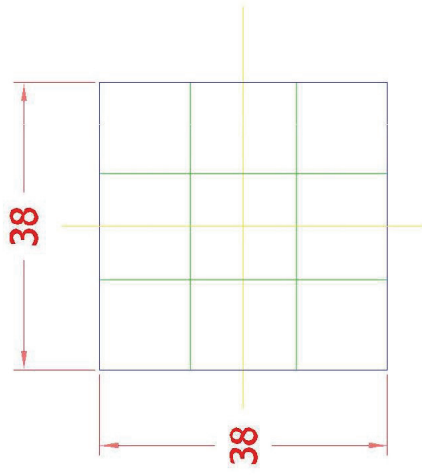
donde  $s$  es el desplazamiento de la cremallera,  $z$  es el número de dientes del piñón y  $p$  el paso del piñón. En este caso como ya se definió anteriormente,  $z = 15$  y  $p = 0.196''$ , y dado que el giro completo del volante es  $720^\circ$ , vamos a calcular el desplazamiento sobre una base de  $780^\circ$ , lo que resulta:

$$s = 15 \times 0.196 \times 780^\circ / 360^\circ = 6.37''$$

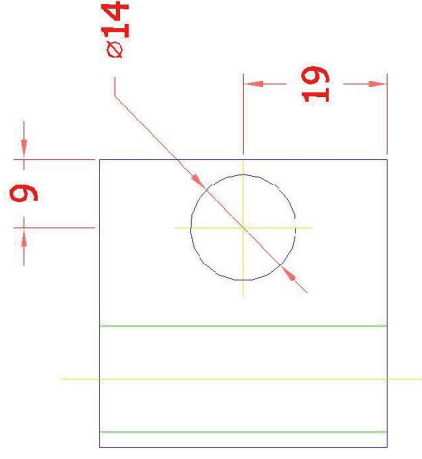
El pivote de la dirección (plano No.10) a la cual está unido el brazo Ackermann es una barra cuadrada con espárragos en sus extremos que van unidos a las muletas de la suspensión a través de unos cubos (plano No. 11) de soporte que permiten un doble pivote, ya que en sentido vertical permiten el giro de la barra de la dirección y en sentido horizontal permiten que el pivote de la dirección gire con respecto de las muletas, ayudando a que se obtenga un desplazamiento de la suspensión y de la dirección más suave.

El king pin (plano No. 12), o eje de la rueda va insertado al pivote de la dirección con el ángulo adecuado, para obtener un buen ángulo de salida y de caída. Se escogió un marco de llanta, de las usadas en los triciclos de reparto, ya que están diseñadas para soportar carga. El cambio de la masa de la rueda, por una que resistiera mayores esfuerzos axiales y transversales fue la única adaptación que se hizo a la rueda. Todo el mecanismo se detalla a continuación en los planos No 10 al 14.

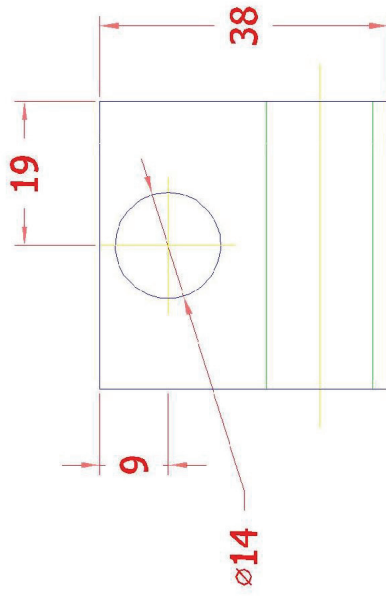
 <p>ELEVACIÓN - ESCALA 1:3</p>	 <p>PERFIL - ESCALA 1:1</p>
 <p>PLANTA - ESCALA 1:3</p>	 <div data-bbox="1234 235 1429 661"> <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA Escuela de Ciencias y Humanidades Departamento de Ingeniería Mecánica</p>  <p>SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO SOLICITANTE: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO CARRERA: INGENIERIA MECANICA MATERIA: MECANICA DE VEHICULOS FECHA: 23/10/2003 GRUPO: 10</p> </div>



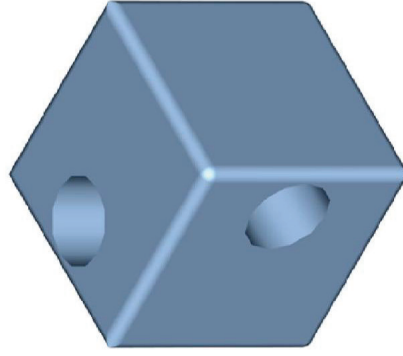
ELEVACIÓN - ESCALA 1:1

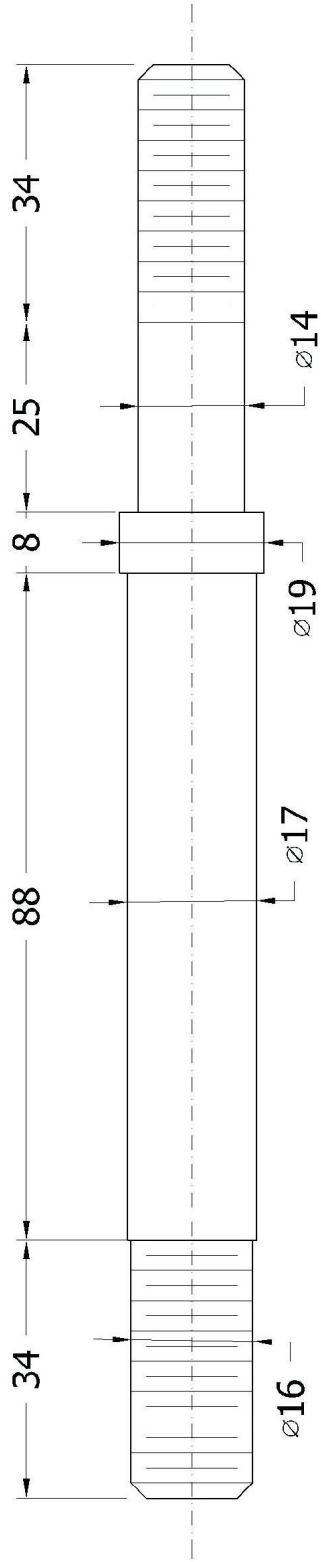


PERFIL - ESCALA 1:1

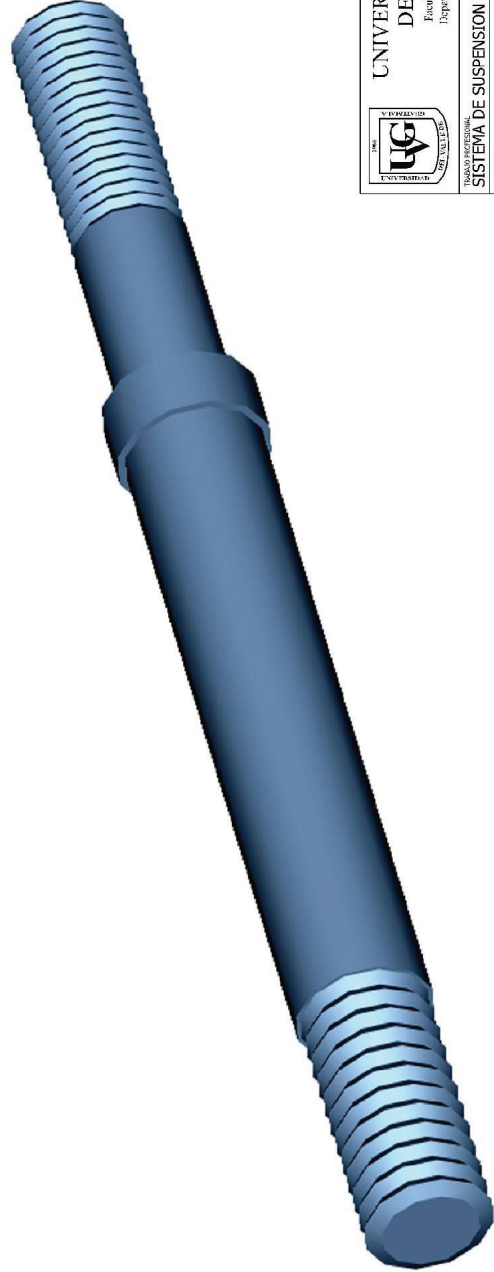


PLANTA - ESCALA 1:1



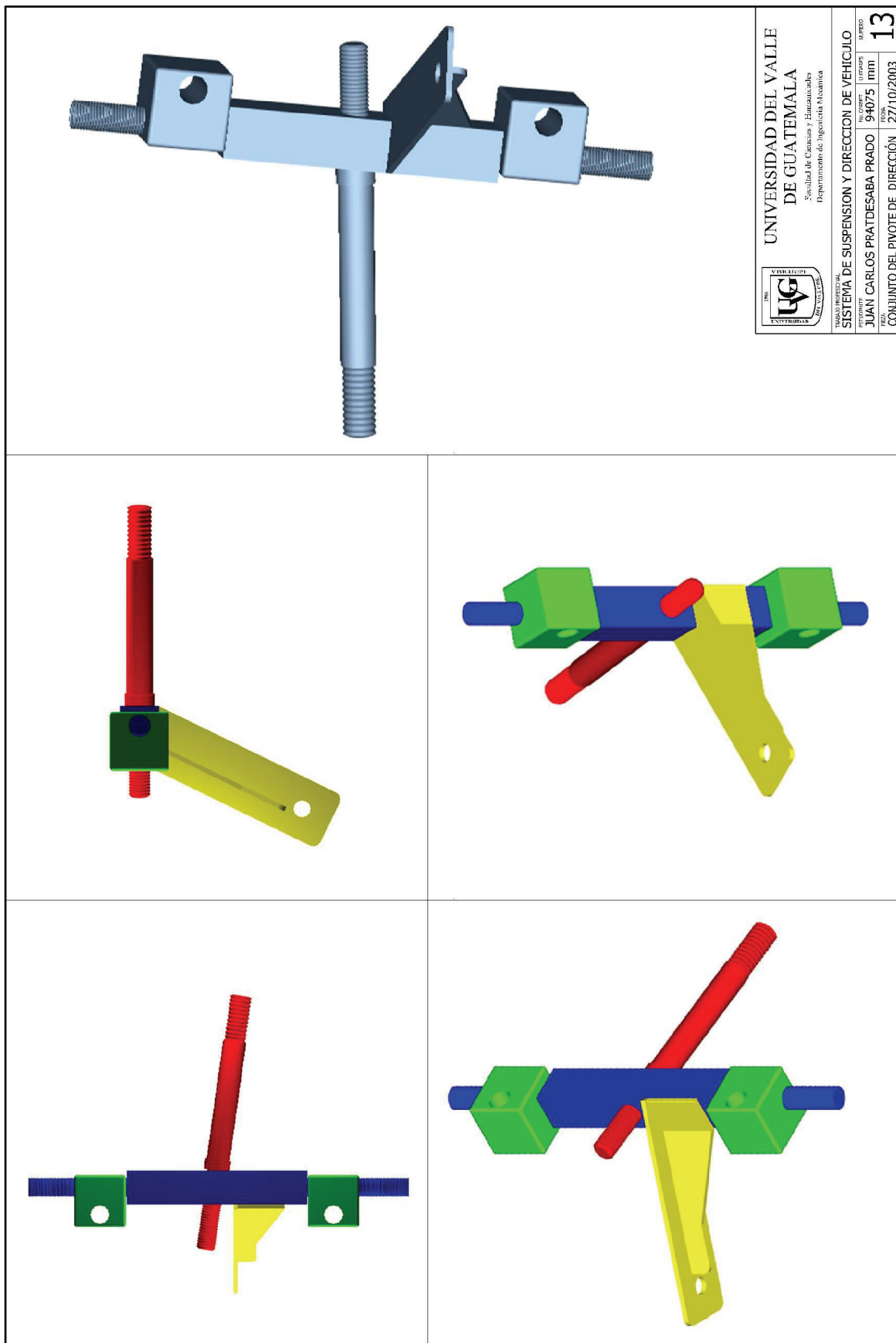


ELEVACIÓN - ESCALA 1:1



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Escuela de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

TÍTULO PROFESIONAL		SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO	
ESTUDIANTE	NO. OCAJET	UNIDADES	GRUPO
JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO	94075	1	12
FECHA	FECHA		
24/10/2003	24/10/2003		



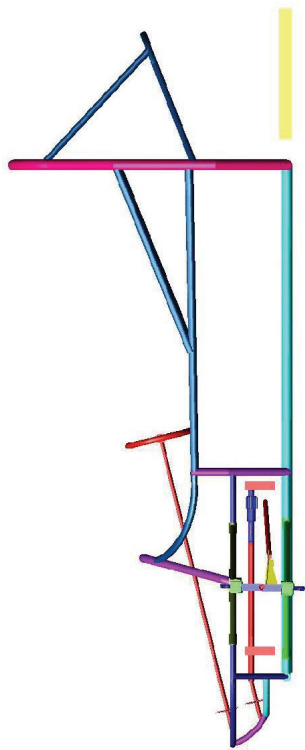
UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Escuela de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

TAMBO PROFESIONAL  
UNIVERSIDAD DEL VALLE

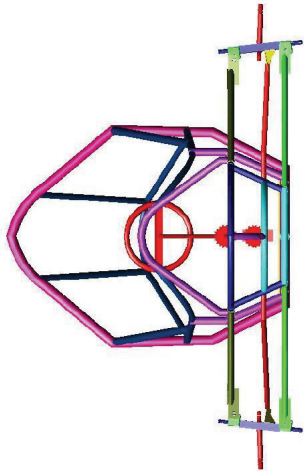
SISTEMA DE SUSPENSION Y DIRECCION DE VEHICULO  
AUTOR: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO  
No. COMP: 94075  
UNIDADES: mm

FECHA: 27/10/2003  
MATERIAL: CONJUNTO DEL PIVOTE DE DIRECCION

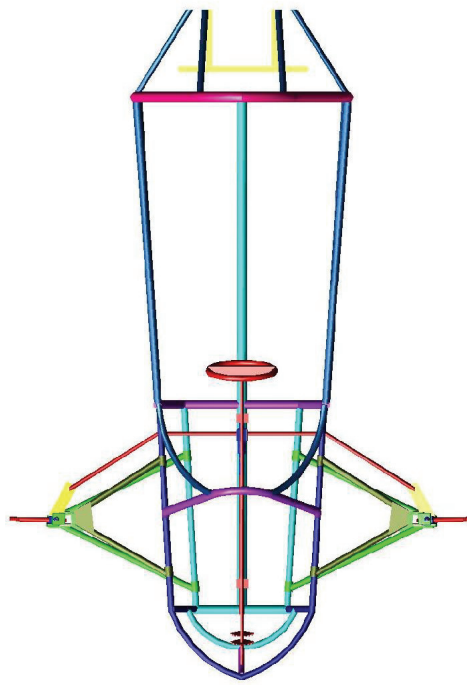
13



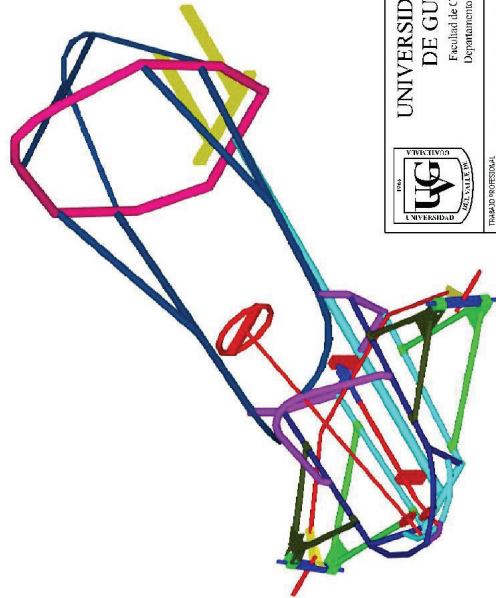
ELEVACIÓN - ESCALA 1:25



PERFIL - ESCALA 1:25



PLANTA - ESCALA 1:25



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
DE GUATEMALA  
Facultad de Ciencias y Humanidades  
Departamento de Ingeniería Mecánica

SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y DIRECCIÓN DE VEHICULO  
AUTOR: JUAN CARLOS PRATDESABA PRADO  
CARRERA: INGENIERIA MECANICA  
ID: 94075 cm  
FECHA: 27/04/2004

## E. Construcción del prototipo

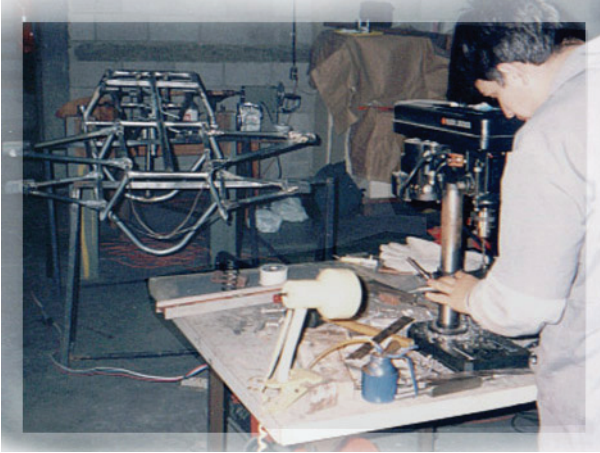
En la elaboración de este vehículo se utilizaron distintos procesos y materiales dependiendo de las piezas y de la maquinaria con que contaba. Para el chasis se empleó tubo de acero proceso de 1 ½", 1", y ¾".

Los materiales usados en el pivote de la dirección, los cubos y las masas de las ruedas es cold rolled, mientras que los diferentes ejes están hechos de Acero 705, especialmente fabricado para resistir grandes esfuerzos de torsión. Para el engranaje se utilizó bronce fosforado y para las diferentes chumaceras se usó bronce grafitado, mientras que las bases de las chumaceras son de acero 705 y algunas de cold rolled. Las muletas se hicieron de tubo galvanizado de ¾" y las mordazas de hembra de 1 ½" x 1/8". El eje del timón se hizo de acero inoxidable con buena resistencia a la torsión.

Para armar el chasis se utilizó soldadura eléctrica convencional y los arcos se doblaron con una prensa hidráulica adaptada para esto. En la fabricación de los mecanismos de dirección se usaron distintas máquinas herramientas entre éstas, un torno de 9" de volteo y 40" de bancada, un torno fresador de 15 cm de volteo y 50 cm de bancada, un cepillo mecánico de 7" de carrera, así como taladro, pulidora y otras. A continuación una serie de fotografías donde se aprecia el trabajo realizado.



**Fotografía 10.** Construyendo el chasis preliminar

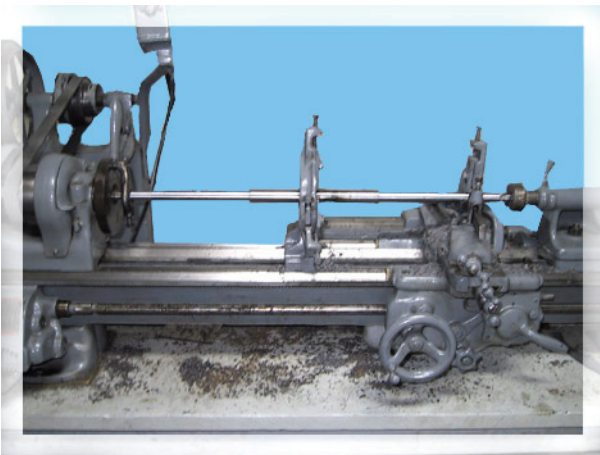
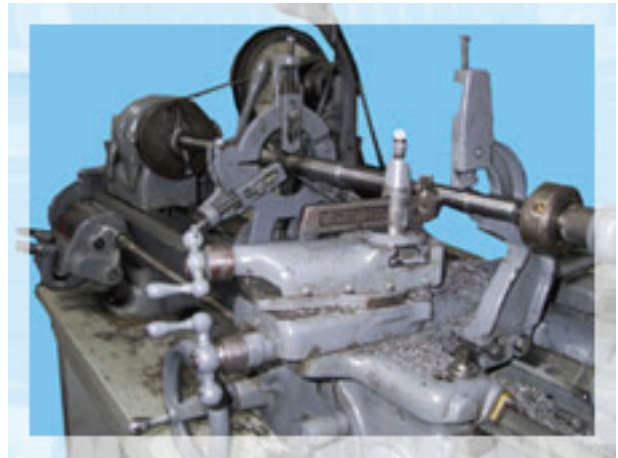


**Fotografía 11.** Taladrando los pivotes

Se puede observar el chasis al fondo

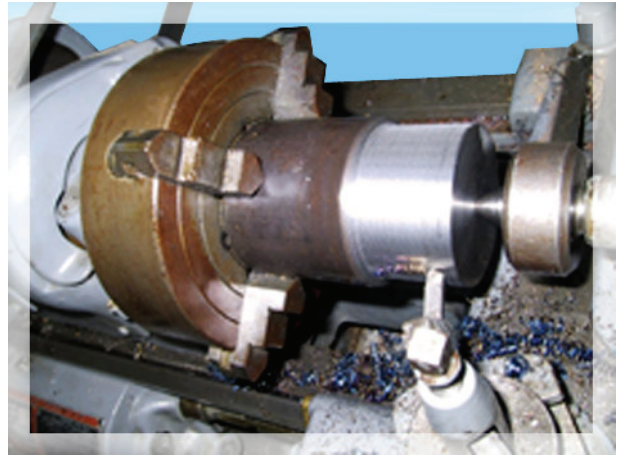
**Fotografía 12.** Torneando la barra para la cremallera

Para un buen torneado se usa la luneta que se aprecia al fondo y la media luneta al frente, como soporte de la barra.



**Fotografía 13.** Vista de frente del torneado de la barra para la cremallera

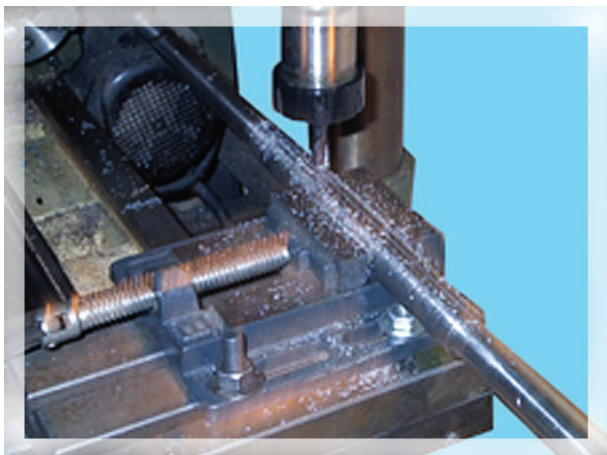
**Fotografía 14.** Torneado de bases para chumaceras



**Fotografía 15.** Torneando piezas del Enigma.

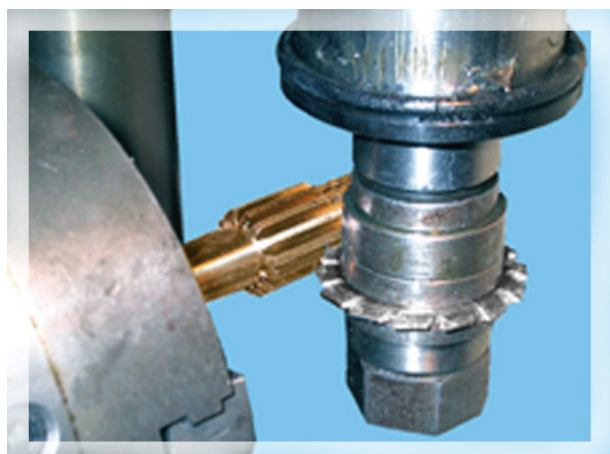
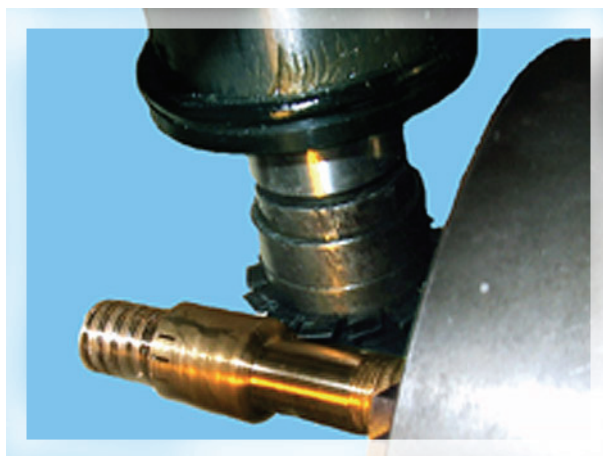
**Fotografía 16.** Aplanado de canto de barra con fresa de 5/16".





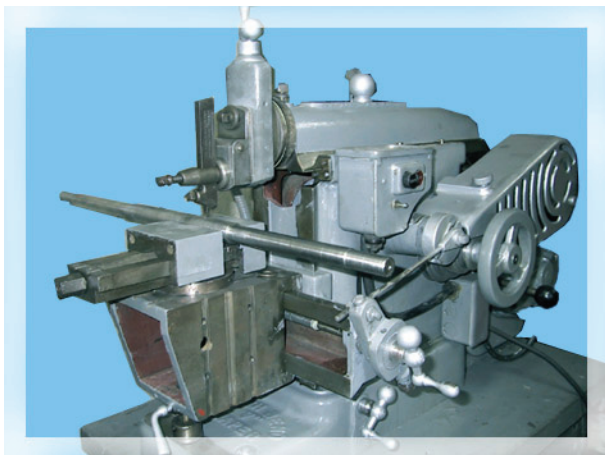
**Fotografía 17.** *Fresado de la barra.*

**Fotografía 18.** *Fresado del piñón. Inicial*



**Fotografía 19.** *Fresado del piñón. Final*

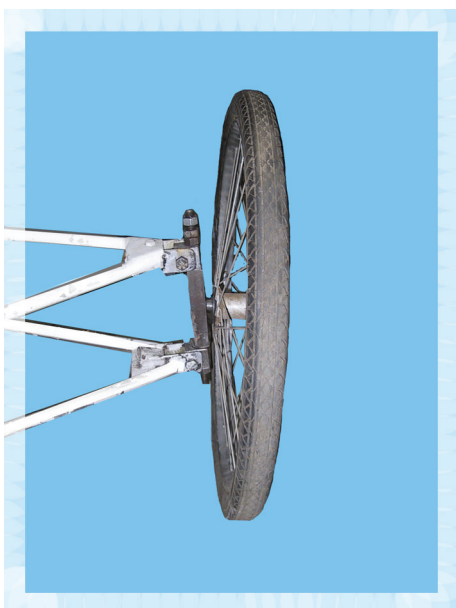
En esta etapa ya se observa casi terminado todos los dientes.



**Fotografía 20.** Cepillado de la cremallera.

Por razones de tamaño de la fresadora, la cremallera se tallo en el cepillo mecánico.

**Fotografía 21.** Vista aérea del chasis final



**Fotografía 22.** Muleta delantera, pivote de dirección y llanta.

Se observa claramente el ángulo de salida y el camber positivo de la llanta.



**Fotografía 23.** *Diseño final del vehículo.*

## IV. CONCLUSIONES

1. El sistema de barras transversales desiguales es el mecanismo de suspensión que más ventajas da sobre los otros sistemas, especialmente en vehículos livianos como los fórmula Electrón experimental, ya que mejoran la estabilidad, disminuyen la altura del centro de gravedad, mejora el confort del piloto y hay una disminución del peso suspendido, permitiendo que las ruedas permanezcan lo más próximo posible a la verticalidad y al suelo, a pesar del movimiento de balanceo del vehículo, lo que evita desgastes anormales en los neumáticos y falta de adherencia en las curvas, haciendo que su conducción sea más segura.
2. Aunque, en principio, el sistema de suspensión Mac Pherson requiere espacios menores a los de las suspensiones de brazos desiguales, algunas modificaciones introducidas en este último sistema han permitido contar con mayor espacio, aunque son menos ligeras que las Mac Pherson, ya que utilizan más elementos.
3. Es muy importante que los diferentes ángulos del sistema de dirección (camber, caster, steering y convergencia) estén bien definidas y dentro de los parámetros establecidos. Cuando alguno de estos ángulos está fuera de los límites provocan diferentes fallas al sistema, desde endurecimiento de la dirección en el manejo, hasta vibraciones y oscilaciones violentas, provocando inestabilidad y dificultando la conducción del vehículo.
4. Existen varios sistemas de dirección, pero los más comunes y de fácil adaptación son los de palanca de transmisión y los de piñón y cremallera. El de palanca es más sencillo, pero su baja relación de transmisión endurece la dirección, mientras que el de piñón y cremallera implica más elementos y una mayor carga, pero suaviza mucho la conducción dado su alta relación de transmisión.
5. Existe la capacidad y creatividad de diseñar y construir vehículos ligeros y sencillos en nuestro país, y especialmente a un costo considerablemente más bajo que cualquier vehículo comercial.

## V. RECOMENDACIONES

- 1.** Uno de los pocos defectos que encuentro en este diseño es que adapta un eje adicional de transmisión del volante hacia el piñón de la cremallera, haciendo más pesado y menos eficiente el sistema de dirección. Este mecanismo se podría eliminar, colocando los brazos Ackermann hacia el frente de los pivotes y muy probablemente extendiendo el king pin, para que el ángulo del brazo no interfiera con los rayos de la llanta. Debido a que los pivotes de la dirección ya estaban contruidos con anterioridad para el sistema de palanca, al adaptarse el sistema de piñón y cremallera se buscó un mejor ángulo del timón para una conducción con mayor confort y seguridad.
- 2.** Ampliar los estudios de los diferentes sistemas de suspensión y dirección, para lograr encontrar un sistema autoinclinable que sea sencillo y funcional, para aumentar la estabilidad del vehículo en las curvas. En este proyecto no logré desarrollar un sistema que tuviera esas características.
- 3.** Retomar la organización de eventos como Electratón Guatemala, ya que estimula la creatividad de los estudiantes universitarios y los expone a un gran reto, como es desarrollar este tipo de vehículos donde se ponen en práctica gran cantidad de conocimientos de ingeniería, especialmente del área de mecánica y eléctrica.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alejos, Carlos. 2002. **Consideraciones para el Diseño mecánico y construcción de un vehículo eléctrico.** Tesis Universidad del Valle. Guatemala, 129 págs.
- Birch, Thomas. 1993. **Automotive Suspension & Steering Systems.** 2a. ed. EE. UU. Saunders College Publishing. 592 págs.
- Deutschman, Aarón, et al. 1995. **Diseño de Máquinas.** México. Compañía Editorial Continental, S. A. de C.V. 973 págs.
- de Castro Vicente, Miguel. 1998. **Nueva Enciclopedia del Automóvil: Transmisiones y bastidor.** Barcelona. Grupo Editorial Ceac, S. A. 355 págs.
- **Diseño y construcción de vehículos eléctricos.** 1997. Fórmula Sol. México. 87 págs.
- Font Mezquita, José; Dols Ruiz, Juan F. 2001. **Tratado sobre automóviles.** México D.F. Universidad Politécnica de Valencia. Tomo II, 450 págs.
- French, Thomas; Vierck, Charles. 1968. **Dibujo de Ingeniería.** México. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. 733 págs.
- Kindler, Hans; Kynast, Helmut. 1987. **Cálculos técnicos para el automóvil.** 8ª. ed. Barcelona. Editorial Reverté, S. A. 240 págs.
- Kulakowski, Bohdan. 1994. **Vehicle road interaction.** Philadelphia. ASTM. 267 págs.
- **Reglamento de Diseño y Competencia: Categoría Fórmula Electrónica Experimental.** 1997. Fórmula Sol. México. 20 págs.
- <http://www.dibujotecnico.com>
- <http://www.rqriley.com/suspensn.html>