



ING. AUTOMOTRIZ

AUTORES:

Sebastián Alexander Larco García
Francisco Andrés Herrera Velasco

ANÁLISIS DE LA PERDIDA DE POTENCIA EFECTIVA EN UN OFF ROAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DIÁMETRO DE RUEDAS, CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EMISIONES CONTAMINANTES EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Yo, **Sebastián Alexander Larco García**, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí escrito es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



Firma

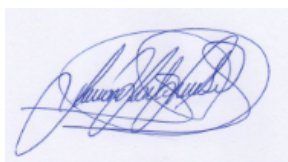
Yo, **Francisco Andrés Herrera Velasco**, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



Firma

Yo, **Ing. Juan Carlos Rubio**, Certifico que conozco al autor de la presente investigación, siendo responsable exclusivo tanto en su originalidad, autenticidad, como en su contenido.



Firma

DEDICATORIA

Abuelito Gonzalo Heriberto García Erazo culmine el presente proyecto perdiéndote, sé que estas muy orgulloso de verme terminar mi carrera, muchas gracias por todo el apoyo que me diste, por tus grandes consejos. Me enseñaste a ser un hombre de bien, fuiste un gran ejemplo para mí. Este proyecto va dedicado a ti abuelito, estarás siempre en mi memoria.

Dedico este logro alcanzado a mis padres Patricio Larco y Soledad García, quienes desde un inicio me apoyaron para llegar a mi sueño. Fueron 5 años de mucha responsabilidad, disciplina y constancia, donde en cada momento me dieron la fortaleza y motivación para seguir. Ustedes siempre serán mi guía, muchas gracias por confiar en mí y sobre todo por estar siempre conmigo.

Abuelitos me dieron grandes consejos durante toda mi vida, ustedes son parte de las razones por las que he llegado hasta esta importante etapa de mi vida. Gracias por su apoyo.

Hermanos Mauri y Edu, mi fortaleza e inspiración para seguir siempre adelante, siempre han estado conmigo dándome un cariño incondicional, gracias por la motivación para no rendirme ante nada y lo más importante el amor que me dan. Este logro va para ustedes.

Sebastián Alexander Larco García

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis abuelos por creer en mí y por haber sido mi fuente de inspiración y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Gracias por inculcarme valores que me han guiado en mi vida, por esas palabras de aliento y consejos. Querido abuelito Vicente Velasco, aunque ya no estás conmigo físicamente, sé que desde donde estás, estás orgulloso de verme culminar esta etapa importante de mi vida. Siempre recordaré tu pasión por los autos, que compartimos mi hermano y yo, y tu apoyo incondicional hacia todos en la familia, gracias por haber sido una gran influencia en mi vida y por haberme enseñado la importancia de ser feliz, apasionado y perseverante. Tu legado vive en mí, y este logro es también tuyo.

También quiero agradecer a mi familia por su paciencia, comprensión y por estar a mi lado en todo momento. A mi mamá, quien ha sido mi guía y apoyo incondicional, y quien me ha enseñado la importancia de la perseverancia y el esfuerzo, y a mi hermano, quien me ha brindado su ayuda y consejos valiosos en todo momento.

A mi papá, por haberme brindado su apoyo, y por haberme enseñado el valor del trabajo duro y la responsabilidad.

A mi amigo y antiguo jefe, quien me brindo su conocimiento y experiencia en el campo laboral. Gracias por haberme enseñado tanto en tan poco tiempo y por haber confiado en mis habilidades. Su orientación y guía han sido fundamentales en mi formación profesional.

A mi tutor, quien me ha guiado y apoyado en cada etapa de este proceso. Gracias por su dedicación y paciencia en cada revisión, por compartir sus conocimientos y por ayudarme a alcanzar mis objetivos.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por haber sido parte de mi vida y de este proyecto. Esta tesis va dedicada a ustedes con todo mi cariño y gratitud.

Francisco Andrés Herrera Velasco

AGRADECIMIENTO

Gracias a mis padres Patricio Larco y Soledad García por todo el apoyo incondicional que me ayudó a superarme a nivel personal y profesional. Gracias por enseñarme valores éticos y morales. Gracias por ser pacientes durante todo este proceso de mi carrera y nuevamente gracias por hacer todo esto posible, los amo muchísimo papá y mamá.

Hermanos Mauri y Edu, gracias por las fuerzas que me dieron para seguir con mis estudios, por los consejos de superación personal y por los ánimos de continuar creciendo a nivel personal.

Abuelitos Gonzalo, Fabiola, Manuel y Eva estoy sumamente agradecido por su guía durante mi vida, agradecido por compartir sus conocimientos y consejos. Muchas gracias por su cariño y apoyo.

Maritza Graciela Serrano Mera sumamente agradecido por estar siempre apoyándome y dándome consejos, por compartirme tus experiencias a nivel profesional y personal. Gracias por estar en cada momento conmigo, y por todo el amor y cariño que me has dado.

A mi Tutor de tesis Ing. Juan Carlos Rubio por su guía en todo el proceso del artículo, por compartir todos sus conocimientos y experiencias profesionales. Gracias por su tiempo y paciencia, aprecio mucho la gran ayuda que nos brindó para alcanzar este sueño anhelado.

Gracias a la Universidad Internacional del Ecuador y docentes por ayudarme a adquirir los conocimientos profesionales.

Sebastián Alexander Larco García

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proyecto.

En primer lugar, a mis abuelos Francisco Herrera, Alba Vásquez, Martha Moya, por haber creído en mí desde el principio y por su constante apoyo en todo momento. Gracias por enseñarme a luchar por mis sueños. Siempre estaré agradecido por su amor incondicional y por su sabiduría.

A mi familia, en especial a mi mamá Cristina Velasco, mi hermano Rafael Herrera y mi papá Francisco Herrera, por su inquebrantable apoyo, paciencia y comprensión. Gracias por haber sido mi roca y por haberme brindado su fuerza. Sin su apoyo, no hubiera sido posible completar este proyecto.

A mi amigo y antiguo jefe, Fernando Iza, por haberme brindado la oportunidad de trabajar en su empresa y por su constante orientación y apoyo en el campo laboral que nos apasiona. Gracias por enseñarme a trabajar en equipo y por haber confiado en mis habilidades.

A mi tutor, Ing. Juan Carlos Rubio, por su dedicación, paciencia y conocimiento. Gracias por guiarme en el proceso de realización de este artículo, por haberme enseñado a investigar y desarrollar mi capacidad crítica. Tu ayuda ha sido fundamental para alcanzar este logro.

Finalmente, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que de una u otra forma me brindaron su apoyo y confianza. Sus consejos, palabras de aliento y ánimos me ayudaron a superar las dificultades en el camino.

Una vez más, gracias a todos de corazón. Este logro no solo es mío, sino también de todas las personas que me apoyaron en el camino. ¡Mil gracias!

Francisco Andrés Herrera Velasco

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----|
| CERTIFICACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | vi |
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| MARCO TEORICO | 4 |
| Ángulos de ataque en los 4X4 | 5 |
| La suspensión | 6 |
| Suspensión Independiente | 7 |
| Suspensión multilink | 8 |
| Suspensión Mcpherson | 8 |
| Suspensión Dependiente | 9 |
| Suspensión Doble Horquilla | 10 |
| Suspensión Eje rígido | 10 |
| Suspensión Activa | 11 |
| NEUMÁTICOS | 12 |
| MATERIALES | 13 |
| VEHÍCULO VITARA 2001 JX 8 VALVULAS | 13 |
| NEUMÁTICOS..... | 13 |
| DINAMOMETRO SAENZ..... | 14 |
| REVISIÓN TÉCNICA VEHÍCULAR..... | 14 |
| METODOLOGIA..... | 15 |
| DISCUSION | 21 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 22 |
| ANEXOS | 23 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Off Road | 4 |
| Figura 2 Ángulos de ataque | 5 |
| Figura 3 Chevrolet Vitara 3 Puertas | 7 |
| Figura 4. Suspensión Independiente | 7 |
| Figura 5. Suspensión Multilink (brazos múltiples) | 8 |
| Figura 6. Suspensión McPherson | 9 |
| Figura 7. Suspensión doble Dependiente | 9 |
| Figura 8. Suspensión doble horquilla | 10 |
| Figura 9. Suspensión eje rígido ballestas | 11 |
| Figura 10. Suspensión activa o inteligente | 11 |
| Figura 11. Descripción de los neumáticos | 12 |
| Figura 12. Llantas utilizadas para el estudio | 13 |
| Figura 13. Banco Sáenz rodillo inercial para competición | 14 |
| Figura 14. Fijación del vehículo en el dinamómetro | 15 |
| Figura 15. Comparativo de potencia de motor y potencia a la rueda | 19 |
| Figura 16. Diferencia de costos y consumo | 20 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Ficha Técnica Chevrolet Vitara 1.6L 8 Válvulas | 13 |
| Tabla 2. Parámetros para a Revisión Técnica Vehicular | 14 |
| Tabal 3. Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 165 R15 | 16 |
| Tabla 4. Los datos obtenidos de potencia máxima a las ruedas a 5300 rpm, 165 R15 | 16 |
| Tabla 5. Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 235 R15 | 17 |
| Tabla 6. Los datos obtenidos de potencia máxima de la rueda a 5300 rpm 235 R15 ... | 17 |
| Tabla 7. Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 30*9.5 R15..... | 18 |
| Tabla 8. Los datos obtenidos de potencia máxima de la rueda a 5300 rpm 30*9.5 R15.... | 18 |

ANÁLISIS DE LA PERDIDA DE POTENCIA EFECTIVA EN UN OFF ROAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES DIÁMETRO DE RUEDAS, CONSUMO DE COMBUSTIBLE, EMISIONES CONTAMINANTES EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN.

Ing. Juan Carlos Rubio Terán. MBA, Sebastián Alexander Larco García, Francisco Andrés Herrera Velasco

Pregrado Ingeniería Automotriz - Universidad, Titulo Obtenido, jrubio@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, selarcogal@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, frherrerave@uide.edu.ec, Quito–Ecuador

RESUMEN

La industria automotriz desde sus inicios llamó la atención no solo como movilidad de personas, o transporte de carga, se ha caracterizado por ser una industria que llamo la atención del deporte y se ha caracterizado por la infinidad de eventos que se han desarrollado por medio de esta industria, por citar varios de ellos tenemos la Fórmula Uno el evento más importante en las carreras de circuito del mundo, el Rally Dakar un evento que cubre varios aspectos de la competición deportiva que cruza varios países y por lugares complejos como los desiertos, las competencias de 4x4 a nivel mundial, entre otras que serían innumerables por las variante que se desprende de ellas. El Off – Road es un término inglés que significa transitar fuera de carretera, o caminos donde no hay vías transitables, es un deporte que tiene un sin número de variantes, al ser vehículos todo terreno o fuera de camino se necesita ir copiando las irregularidades del terreno, compensar con el vehículo la falta de adherencia en lugares fangosos, permitiendo la marcha pese las inclemencias del terreno, para el efecto los vehículos de fábrica toman como referencias características fuera de camino manteniendo el confort, la durabilidad y prestaciones para condiciones no muy severas, las condiciones de un off road hace que las características constructivas sean mucho más agresivas para su mejor desempeño en condiciones muy severas. Las personas aficionadas al mejor desempeño de éstos 4x4 realizan una serie de modificaciones que a criterio de muchos de ellos, o porque no decir la mayoría se dedican al performance del 4x4, pero dejan de lado las condiciones de potencia al dedicarse solo a la suspensión para tener una mejor adherencia y mejor altura para surtir las adversidades del terreno. Estas mejoras constructivas permiten un desempeño en competición logrando una mayor adherencia, copiar la superficie terrestre irregular con suelos sueltos, con piedras agresivas, con suelos fangosos por completo siendo los caminos muy agresivos para probar las habilidades del auto como la destreza de los pilotos, esto ajustes sacrifica potencia del motor hacia el sistema de transmisión. Estas modificaciones acunan el presente estudio permitiendo identificar la pérdida de potencia en el eje posterior, la **Metodología** comparativa – deductiva utiliza el sistema ANOVA para la cuantificación de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, así como las pruebas de ruta, analizar los diferentes parámetros objetos de la comparación de datos medios, la utilización de un vehículos Vitara 4X4 estándar y posterior de la modificación de los parámetros de suspensión sin intervenir al motor de combustión interna. Los resultados obtenidos dan cuenta de que la pérdida de potencia del motor hacia la transmisión y la fuerza de empuje a las ruedas por la modificación en diámetros de rueda tiene un impacto importante que son analizados a detalle en el estudio. Los datos obtenidos y las pruebas de ruta realizadas generan como **conclusión** que las modificaciones para obtener mejores prestaciones de tracción en caminos fuera de

carretera o extremos genera una pérdida de potencia del motor aplicada a la transmisión y un consumo más elevado de combustible, el Ecuador bajo sus normas permiten un análisis estáticos de la emisión de gases del combustible lo que no permite identificar si este mayor esfuerzo genera una mayor contaminación, al ser pruebas estáticas la fuerza generada del motor se la mide en vacío. Los **resultados** de las pruebas de laboratorio demuestran una caída de la potencia del motor transferida al eje propulsor, así como las pruebas de ruta evidencia un mayor consumo de combustible, no es menos cierto que en todo momento en motor genera la misma emisión pese a los cambios de neumáticos esto en el laboratorio al hacer las pruebas de emisiones de gases, esto en parte se debe a los catalizadores y la electrónica del auto que va corrigiendo algunos parámetros, pero al consumir más combustible en las pruebas de ruta el motor emite también más volumen de emisiones pese que se cumple la norma.

Palabras claves: Off Road, Potencia, emisiones, consumo, todo terreno, transmisión, modificaciones, laboratorio.

ABSTRACT.

Since its inception, the automotive industry has attracted attention not only as mobility of people, or cargo transportation, it has been characterized as an industry that has attracted the attention of sports and has been characterized by the infinity of events that have been developed through In this industry, to cite several of them, we have Formula One, the most important event in circuit racing in the world, the Dakar Rally, an event that covers various aspects of the sports competition that crosses several countries and through complex places such as deserts, mountains, 4x4 competitions worldwide, among others that would be innumerable due to the variants that emerge from them. The Off - Road is an English term that means to travel off-road, or roads where there are no passable roads, it is a sport that has a number of variants, being all-terrain or off-road vehicles, it is necessary to copy the irregularities of the terrain, compensate with the vehicle the lack of adherence in muddy places, allowing the march despite the inclemencies of the terrain, for this purpose the factory vehicles take off-road characteristics as references, maintaining comfort, durability and performance for not very severe conditions , the conditions of an off road makes the constructive characteristics much more aggressive for its best performance in very severe conditions. The people who are fond of the best performance of these 4x4s carry out a series of modifications that, at the discretion of many of them, or why not say the majority, are dedicated to the performance of the 4x4, but they leave aside the power conditions by dedicating themselves only to the suspension to have better adherence and better height to overcome the adversities of the terrain. These constructive improvements allow performance in competition, achieving greater adherence, copying the irregular ground surface with loose soils, with aggressive stones, with completely false soils, being very aggressive roads to test the skills of the car as well as the skill of the drivers, this adjustments sacrifice engine power to the transmission system. These modifications cradle the present study allowing to identify the loss of power in the posterior axis, the comparative - deductive Methodology uses the ANOVA system for the quantification of data obtained in the laboratory tests, as well as the road tests, analyze the different parameters Objects of the comparison of average data, the use of a standard Vitara 4X4 vehicle and I have to modify the parameters of the suspension if I run into the internal combustion engine. The results obtained show that the loss of power from the engine to the transmission and the thrust force to the wheels due to the change in

wheel diameters have an important impact that are analyzed in detail in the study. The data obtained and the road tests carried out lead to the conclusion that the modifications to obtain better traction performance on off-road or extreme roads generate a loss of engine power in the transmission and a higher fuel consumption, low Ecuador Its regulations allow for a static analysis of the emission of fuel gases, which does not allow us to identify whether this greater effort generates greater pollution, since these are static tests, the force generated by the engine is empty. The results of the laboratory tests show a drop in the engine power transferred to the propeller shaft, as well as the road tests show a higher fuel consumption, it is no less true that at all times the engine generates the same emission despite the This changes in the laboratory when doing the gas emissions tests, this is partly due to the catalytic converters and the electronics of the car that correct some parameters, but by consuming more fuel in the road tests the engine also emits more volume of emissions.

Keywords: Off Road, Power, emissions, consumption, off-road, transmission, modifications, laboratory.

1. INTRODUCCIÓN.

El deporte a nivel mundial siempre ha buscado nuevos retos para expandir su espectro en busca de satisfacer las inquietudes de los usuarios, la industria automotriz no ajena de esta realidad ha permitido que mediante sus diseños ir incorporando algunos deportes que basados en la búsqueda de satisfacer necesidades de movilidad y de tener acceso a lugares poco admisibles, romper record de velocidades, llegar a lugares donde no son accesibles como desiertos, ríos, montañas, etc. Como definición importante sobre la conducción de un auto motor se debe determinar que es una actividad hoy en día indispensable para la movilidad, el transporte de mercaderías de todos los tipos, la generación de plazas de empleo, es una actividad que se la debe entender en primer lugar como responsabilidad social al ocupa espacios públicos como vías, carreteras, caminos donde se encuentra la sociedad y su cotidianidad, es una actividad que en la actualidad puede causar bienestar por la facilidad de transportase, por otro lado puede causar afectaciones a la salud por el estrés que genera el tráfico vehicular, la contaminación entre otras. La movilidad de los seres humanos es una necesidad que cada vez va en crecimiento permitiendo llegar a lugares que antes eran inalcanzables o eran aun no vivibles, en esta circunstancia se va desarrollando habilidades que permiten llegar a estos lugares, con la ayuda de vehículos todo terreno pero que en ocasiones aun no son suficientes y la industria automotriz va generando esas alternativas para alcanzar aquellos lugares, así mismo estas habilidades se van desarrollando y los avances periten que se vayan generando nuevas formas de deporte, en las alternativas de los autos fuera de camino los 4X4 siempre ha sido un deporte que ocupa su espacio desde hace muchos décadas, una de las ramificaciones del deporte hoy lo conocemos como Off Road.

Los Off Road son los vehículos todo terreno con tracción a las cuatro ruedas, que como su nombre lo define están contruidos para ser utilizados fuera de camino, y abre la puerta al deporte del conocido como 4X4 que durante el paso de los tiempos se han ido diversificando tomando varios segmentos del deporte, pese a que los vehículos 4X4 son contruidos de fábrica y se lo comercializa como de serie estos vehículos son modificados de acurde a las características de las actividades a las que se van a dedicar, estas modificaciones en su gran mayoría se enfocan en la tracción, es decir mejoras las características de agarre a suelo por medios de neumáticos con mayor diámetro y mejor agarre al suelo fraccionado y fangoso,

las suspensiones reciben cambios significativos que tiene que con una mayor altura, usa suspensión con mayor recorrido que ayudada a las irregularidades agresivas del camino, mejor sistemas de amortiguación permitiendo un mejor apoyo de la superficie del terreno.

Los Off Road al ser modificados en la altura por el mayor radio de neumáticos permite que el auto pueda llegar a lugares donde las irregularidades del piso son mucho agresivas sin que tenga que sufrir un embanque o quedar varado, a medida que se incrementa ésta altura con la ayuda de los neumáticos se genera pérdida de potencia en el tren de empuje a mayor altura del neumático mayor pérdida, el presente estudio demuestra este fenómeno con la ayuda de un banco de laboratorio (dinamómetro), lo que significa que el motor va tener que hacer una mayor esfuerzo para hacer el mismo trabajo requiere de una mayor demanda de energía lo que genera un mayor consumo de combustible y por consecuencia una mayor cantidad de volumen de emisiones al medio ambiente. El estudio contempla estos dos factores últimos y para ello en el caso de la mayor cantidad de consumo de combustible se lo determina con pruebas de ruta con los distintos diámetros de rueda, para la determinación de las emisiones contaminantes con la ayuda de un analizador de gases en pruebas de laboratorio con las normas que se aplican en el país.

Off Road para caminos severos.



Figura #1, fuente autores.

2.0 MARCO TEÓRICO

2.1 Vehículos 4X4 Off Road.

Los vehículos 4X4 o todo terreno tiene como característica importante tracción a las cuatro ruedas, las mismas que pueden ser transmitidas permanentemente o se las puede conectar a criterio del conductor por medio de mecanismos mecánicos o eléctricos en la actualidad, adicional a ello los 4x4 a diferencia de los 4x2 es su mayor altura con respecto al suelo, tener neumáticos con mayor diámetro para condiciones más severas de uso.

Es un vehículo que está diseñado para todo tipo de terreno sin importar que la superficie de grava, lodos, arena, cuerpos de agua, rocas o asfalto, permitiendo su diseño ser flexible con las condiciones adversas del camino, la suspensión juega un papel preponderante al copiar el camino y generar la tracción necesaria para sobrepasar los obstáculos que se encuentren, si bien es cierto que están diseñados para todo tipo de camino no es menos cierto que tienen sus limitaciones y entre ellas hay que tomar en cuenta algunos parámetros.

En un 4x4 es importante conocer que existen cuatro ángulos importantes que permiten al vehículo las características indispensables para su comportamiento, estos permiten abordar

lugares con una determinada altura sin que el vehículo reciba golpes, que pueda pasar los mismo sin que se embanque y que al salir de estos lugares lo haga de forma similar sin inconvenientes, si se modifica la altura del vehículo por cualquier medio también se modifican estos ángulos que viene determinados de fábrica. Los ángulos de un 4X4 están definidos:

ÁNGULO DE ATAQUE OF ROAD

Ángulos de ataque.

Es el que permite al auto tomar una inclinación en ascenso sin que el guardachoque delantero impacte a la pendiente, mientras el ángulo de ataque es mayor el vehículo puede abordar pendientes más inclinadas. Este ángulo se lo toma como referencia al eje de las X como el suelo en posición horizontal, y la línea que sale desde la rueda tangencialmente al proyectarse con el punto más salido del guardachoque como se indica en la figura, es lógico pensar que cada fabricante de autos de este tipo de acuerdo a su diseño y aplicabilidad los ángulos de ataque serán diferentes.

Angulo de Salida

Este ángulo hace la misma función que el ángulo de entrada, con la diferencia que la aplicabilidad está en la parte posterior del auto, y permite que la pendiente tomada al pasar el auto por ella al momento de salir tenga las mismas condiciones de entrada, para que en su salida no presente golpes, de igual forma el ángulo se lo mide desde el eje X como la horizontal del suelo tomando como referencia la tangente que forma la rueda con el para choque delantero.

Ángulo ventral.

Es el ángulo que está comprendido entre el centro de la parte inferior del auto y los neumáticos, con él se puede determinar la distancia que queda libre en la parte inferior del auto y que no permita que el mismo pueda quedar suspendido, es decir si paso una roca el auto podría quedar en balance sin tracción a ninguna de las cuatro ruedas, de ahí la importancia de conocer este ángulo.

Ángulo de un auto 4X4

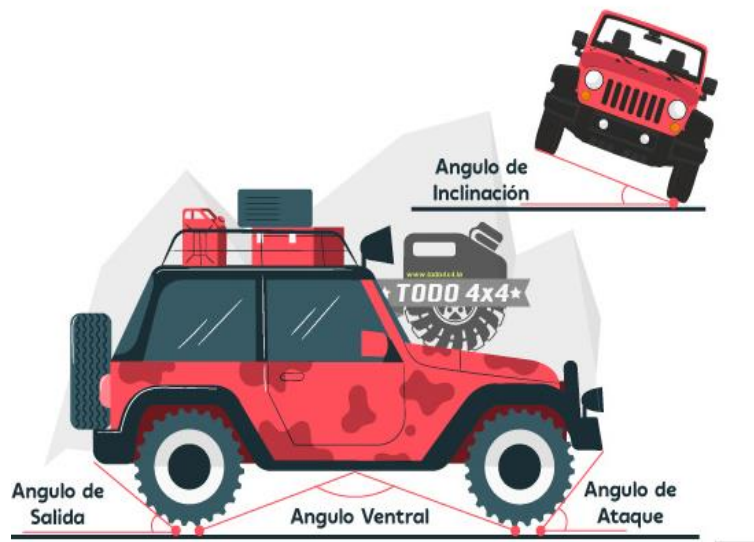


Figura # 2, fuente todo 4X4.

Los ángulos de ataque en todo el auto son los que permiten pasar los diferentes obstáculos de acuerdo al diseño del fabricante, los autos Off Road se permite aumentar estos ángulos permitiendo tener una mayor cobertura de irregularidades del piso, permitiendo que estos vehículos puedan acceder a lugares más agresivos, de ahí que nacen las diferentes competencias de acuerdo a la agresividad del terreno.

2.2 LA SUSPENSIÓN.

La suspensión es el mecanismo encargado de algunas funciones, una de ellas es el confort a los ocupantes del vehículo, la responsable de soportar el peso del vehículo como tal y de las cargas que se puedan agregar haciendo que esta se distribuya lo más uniforme posible a las cuatro ruedas, es la encargada de copiar y minimizar las irregularidades de la calzada para que estas no sean trasladadas al vehículo, compoentes del auto para evitas daños de los mismos, es la encargada de transmitir la potencia generada del motor al piso, la encargada de dar la estabilidad del vehículo en condiciones normales y adversas en cualquier circunstancia de conducción, también es la que permite que el vehículo pueda frenar de forma segura. Adicional a los elementos elásticos de la suspensión se debe tomar en consideración los neumáticos que hacen las veces de elemento elástico ya que es el primero en absorber las irregularidades del firme, así se debe considerar los asientos del automotor que perite un efecto de amortiguación para el confort de los ocupantes. Para entender los elementos de la suspensión del vitara se describen cada uno y su funcionamiento.

La suspensión de los autos va depender de las características constructivas y se aplicación, no es lo mimos la suspensión de un auto de calle que está concebido para un mayor confort de los ocupantes generando altas velocidades de traslado con una buena estabilidad, o de una pickup (camioneta) de trabajo que está enfocada en la capacidad que tiene para cargar y transportar peso, o en el caso del presente estudio una suspensión de un vehículo pensado en la aventura fuera del camino en condiciones extremas, el sistema de suspensión en su conjunto conecta la parte fija del chasis del auto a las ruedas por medio de los mecanismos flexibles de la suspensión.

Uno de los propósitos de la suspensión es generar que en todas las condiciones de conducción él vehículo se lo más maniobrable posible, para ello tiene que tener las condiciones de fuerzas laterales que se apoyen firmemente al firme, para asegura que estas fuerzas estén presentes la suspensión permite ajustar la convergencia, la inclinación de las rudas que se la conoce como la alineación y que esta va en función de las condiciones de rebote y el desplazamiento de la carrocería, “En lo relacionado con las ruedas motrices independientemente de configuración del vehículo (tracción delantera o tracción trasera) asegura un agarre óptimo para la transmisión de potencia proveniente desde el motor hacia las ruedas” (Bello, 2021, p.25). “Los vehículos en la actualidad presentan una gran variedad de tipos de suspensiones, esto varía dependiendo de las condiciones de uso del vehículo y del fabricante. Algunos sistemas comparten componentes similares que cumplen con la misma función” (Bello, 2021, p.25).

Suspensión Chevrolet Vitara 3 puertas.



Figura #3, Fuente autores.

2.2 SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE

La suspensión independiente permite trabajar de forma que no afecte a rueda opuesta, siendo muy comunes en la actualidad en automotores livianos, adicional permite que la suspensión se desplace en forma vertical sin que esto afecte a ninguno de las otras ruedas. Entre los tipos de suspensión independiente más utilizados encontramos McPherson y Multilink, sin mayor utilización encontramos suspensión independiente doble horquilla en la parte delantera del vehículo, estos tipos de suspensión son muy utilizado por los diferentes vehículos 4x4 de acuerdo a la marca y la utilidad que cada una de ellas las asigne.

Suspensión independiente de un Off Road.



Figura #4 Fuente, giovanniperformance.com.br

2.3 SUSPENSIÓN MULTILINK

Es una suspensión multilink también conocida como multibrazo aprovecha el paralelogramo deformable para acunar dos brazos transversales, sobre un bastidor propio y una mangueta de rueda, la ventaja de esta suspensión es que el mecanismo de guía incorpora anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Las variantes de la suspensión permiten modificar la convergencia y la divergencia de la rueda de forma que se ajusta de mejor manera a las condiciones de estabilidad de vehículo en todas las condiciones del automóvil, siendo una configuración muy precisa e independiente de la rueda que se encuentra en la condición extrema de la opuesta.

Suspensión Multilink (brazos múltiples)

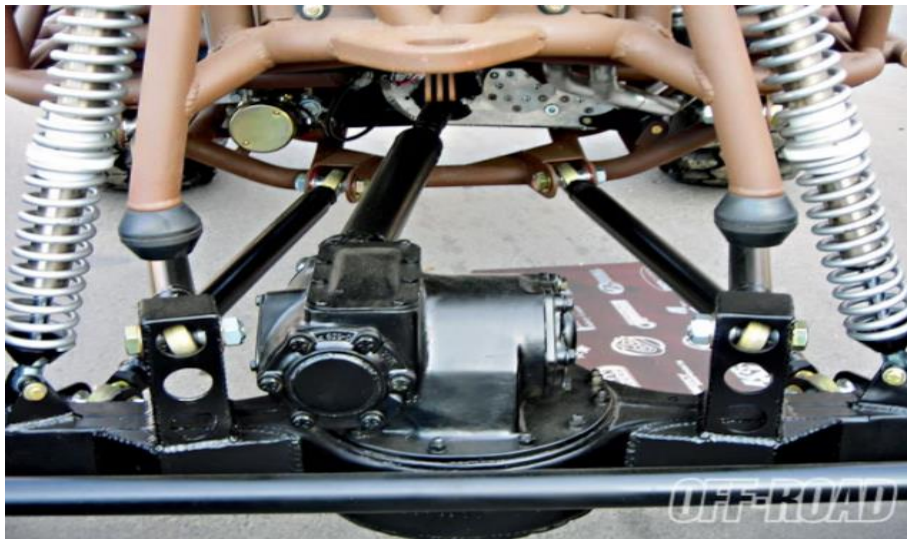


Figura #5, fuente autores.

2.4 SUSPENSION MCPHERSON

Es una suspensión muy utilizada en la actualidad por sus prestaciones como simplicidad, la manera fácil en la instalación ocupando muy poco espacio lo que le hace atractiva además de su bajo costo en comparación de otros sistemas de suspensión, su construcción es sencilla y se puede instalar en la parte posterior de los autos. Sus componentes están constituidos por un brazo oscilante que se une por medio de cojinetes elásticos al bastidor, por el lado contrario utiliza rotulas que se unan a la mangueta, la misma que está unida al amortiguador vertical, que en su parte superior aloja al muelle envolvente y tanto el amortiguador como el muelle se unen a la carrocería, ya se ha mencionado sus ventajas así la desventaja que tienen es un problema geométrico, la configuración de la suspensión no permite que el desplazamiento de la rueda sea vertical sino que hay unos grados de deformación de acuerdo al desplazamiento o recorrido, esto se debe a que la suspensión forman un triángulo articulado el amortiguador – muelle, el bastidor y el brazo inferior, como otro punto de desventaja importante permite transferir de forma directa las irregularidades del camino al chasis y con ello al habitáculo de ocupantes, generando molestias como vibraciones y ruidos que mientras

ha ido avanzado la tecnología se los ha minimizado sin que esto quiera decir que se los haya eliminado por completo.

Suspensión McPherson



Figura #6, Fuente, propia y Fiat 131

2.5 SUSPENSIÓN DEPENDIENTE

La suspensión dependiente es la que permite tener un eje rígido donde las ruedas sean posteriores o delanteras comparte la acción de la uno con la otra y depende de las irregularidades de la calzada, esto impide que las ruedas puedan actuar en forma independiente, “Una de las ventajas que nos ofrece el sistema dependiente es la imposibilidad de variación la alineación de las ruedas por cambios espontáneos” (Navarrete, 2017, p. 6). Es una suspensión que se la utiliza mucho en vehículos 4X4 en el eje posterior, en camiones, transporte de pasajeros, vehículos de turismo de igual forma en el eje posterior habiendo algunos sistemas de suspensión dependiente.

2.5.1 Suspensión dependiente



Figura #7, Fuente autores.

2.6 SUSPENSION DOBLE HORQUILLA

También es conocida como suspensión de doble Horquilla, es una de las suspensiones más utilizadas en la actualidad luego de venir sufriendo varios cambios y actualizaciones. “Este tipo de suspensión consiste en dos brazos transversales a cada lado del vehículo, que se montan para girar en el bastidor, en el subchasis de la suspensión o en la carrocería y en el caso del eje delantero, se conecta por el exterior al pivote de la dirección o a las cabezas giratorias mediante las rótulas. Cuanto mayor sea la distancia efectiva entre los brazos transversales, menores serán las fuerzas en los brazos de control de la suspensión y sus soportes, es decir, la deformación de los componentes es menor así el control de las ruedas es más preciso” (Jornsen Reimpell, 2001, p.8).

Suspensión doble horquilla.



Figura #8, Fuente autores.

2.7 SUSPENSIÓN DE EJE RÍGIDO.

La suspensión de eje rígido incorpora un eje que une las dos ruedas y que cruza el vehículo de lado a lado, puede estar colocada en el eje delantero o posterior con la diferencia que si se lo incorpora en el eje delantero debe tener la capacidad de permitir la maniobrabilidad de la dirección de las ruedas directrices a izquierda y derecha sin ser parte del eje, crucial del eje rígido es compartir las incidencias de una rueda en las condiciones del camino que le permiten tener un buen confort y una buena adherencia en todas las condiciones. Cuando se lo instala en el eje posterior puede ser un cuerpo muy robusto (Carcasa) que contengan los palieres, diferencial y demás elementos de la transmisión que aloja a las ruedas en sus extremos sin que estas tengan libertad de giro, en vehículos livianos de tracción delantera el eje rígido solo conecta las ruedas a sus extremos si tener que acunar el sistema de transmisión, este eje en cualquiera de los dos escenarios va montado elementos elásticos donde podemos encontrar los muelles helicoidales, ballestas que trabajan de la mano con los amortiguadores. “Sin embargo, ya no se encuentran en vehículos turismos de diseño estándar si no sólo en

vehículos de tracción en las cuatro ruedas y sobre todo los vehículos todo terreno (Jornsen Reimpell, 2001, p. 15).

Suspensión eje rígido ballestas



Figura #9 Fuente, Multiservicios Automotrices 3H

2.8 SUSPENSIÓN ACTIVA.

La suspensión activa permite un mejor desempeño en condiciones de manejo porque compensa los esfuerzos realizados de un costado con el otro, para ello se montan sistemas hidráulicos, “Este tipo de suspensiones tiene la particularidad de ser controlada a través de actuadores hidráulicos los cuales son capaces de generar fuerzas que contrarrestan el balanceo y cabeceo del vehículo, manteniendo la estabilidad en cada una de las ruedas, acoplándose individualmente a él perfil de la calzada mejorando los niveles de confort, maniobrabilidad y control del vehículo en todos los ámbitos de conducción” (Guerrero, y otros, 2016, p. 4).

El sistema por medio de señales de sensores identifica las características del terreno, el sistema empieza a trabajar bajo la información y por medio de varios recursos hidráulicos compensa el sistema, la bomba hidráulica genera el flujo necesario para que el actuador por medio de la fuerza del líquido traslade el comportamiento de un costado del auto al otro cuando las condiciones lo necesita para mantener la estabilidad del auto, una de las grandes desventajas de estos sistemas son los altos costo de fabricación por los componentes.

Suspensión activa o inteligente.



Figura# 10, Fuente Autores.

2.9 NEUMÁTICOS

Los neumáticos son los encargados de transmitir la fuerza del motor hacia la calzada, de las condiciones de ella se puede determinar el contacto que debe tener con respecto al firme, así también es el punto clave para que el vehículo pueda seguir las instrucciones del conductor y la respuesta al frenado, no es menos cierto que hay otras primicias a seguir como el estado de la suspensión, ángulos de los neumáticos entre otros, en el mismo sentido los neumáticos y su diferentes tipos dependen de la aplicación para los cuales están contruidos, es decir encontramos neumáticos para asfaltos, para terrenos fuera de camino, para coches de alta velocidad, por la cantidad de carga que están dispuestos a cargar.

La medida de los neumáticos incide directamente en el comportamiento del auto, es decir al colocar diferentes medidas podemos afectar varias condiciones de funcionamiento del auto dependiendo de su fin constructivo, al colocar neumáticos de diferente diámetro a los autos podemos incidir por ejemplo en el centro de gravedad, en la velocidad que marca el velocímetro y distorsionar la velocidad que lleva con la del indicador, la perdida de potencia en el eje de empuje que es objeto de esta investigación. Adicional a ello el neumático es un anillo de caucho inflable que permite mejorar las condiciones de adherencia y es el primer amortiguador de irregularidades del camino ya que por sus características constructivas permite absorber las irregularidades del camino, las características constructivas de los neumáticos son muy variadas para las aplicaciones extremas en las diferentes condiciones y siempre en función de brindar el mejor confort de los ocupantes.

Los neumáticos y sus diferentes compuestos permiten una gran variedad de alternativas, en el caso de los vehículos 4X4 se destila de una gran variedad de labrados para el agarren en caminos fuera de carretera o de ciudad sobre asfaltos, el diámetro y ancho de los neumáticos permite de acuerdo a las condiciones propias de auto poderlos elevar o bajar según requerimientos, en el caso del estudio se suele elevar los autos para poder acceder a lugares más irregulares, en la mayoría de los casos incluso se modifica las condiciones del vehículo en lo referente a la suspensión para lograr un mayor diámetro de rueda.

Descripción de los neumáticos.

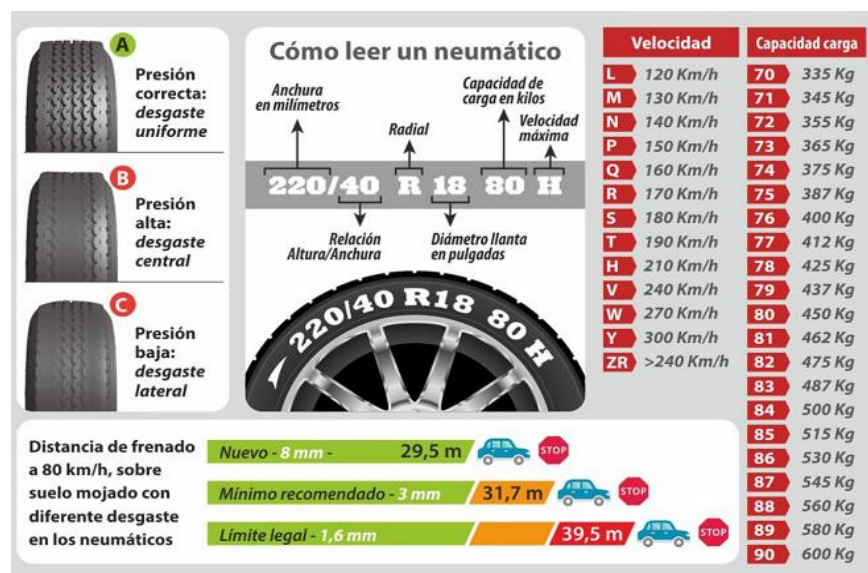


Figura #11 Descripción de los neumáticos, fuente auto estática 2020

3 MATERIALES.

3.1 Vehículo Vitar 2001 JX 8 Válvulas.

El Chevrolet Vitar tres puertas es uno de los autos más cotizados en su segmento por su funcionalidad y precio, un vehículo ensamblado en el Ecuador por AIMESA, con mucha demanda aun en la actualidad por la utilización en deportes extremos de montaña, 4X4 un Jeep tres puertas con una distancia muy corta entre ejes de propulsión que lo hace muy versátil para las distintas aplicación deportivas, un sistema de suspensión independiente en la parte delantera muy amigable para hacer las modificaciones, el eje posterior de eje rígido que le permite acoplarse a las diferentes topografías con una adherencia muy aceptable en todo los terrenos, al reunir estas característica es el vehículo que satisface las necesidades del estudio.

Ficha Técnica Chevrolet Vitar 1.6L 8 Válvulas

| Ficha Técnica Chevrolet Vitar 1.6 L 8 Válvulas | | | |
|--|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| Motor | 1,6 L | Consumos - Medio | 9.9 L/100 Km |
| Combustible | Gasolina | Autonomía | 424 Km |
| Alimentación | MPI | Emisiones de CO2 | - g/Km (estimate) |
| Situación | Longitudinal | Frenos Delanteros | Disco ventilado |
| Cilindrada | 1590 cc | Frenos Traseros | Tambor |
| Diámetro x Carrera | 75 x 90 mm | Neumáticos Delanteros | 195/- R15 |
| Válvulas | 8 | Neumáticos Traseros | 195/- R15 |
| Relación de compresión | 8,9 | Suspensión Delantera | Independent. McPherson |
| Potencia | 80 PS @ 5400 rpm | Suspensión Trasera | De Dion axle. Coil springs |
| Par máximo | 127 Nm @ 3000 rpm | Caja de Cambios | 5 velocidades Manual |
| Tracción | AWD | Peso | 1005 Kg |

Tabla #1, Fuente Chevrolet Vitar 1.6 L 2001

3.2 Neumáticos

Los neumáticos son importantes para el estudio, ya que con ellos se cambia el diámetro de eje de propulsión y con ello cambiamos el par de giro del motor, el cambiar el diámetro de la rueda como tal aumentamos el radio de giro de la rueda, por construcción física $M_o = F \times D$ lo que quiere decir que al aumentar el diámetro por formula vamos a perder el momento torsionante con lo que se pretende demostrar en el presente estudio. La incidencia de los diámetros de los neumáticos en la entrega de energía a las ruedas motrices.

Los neumáticos utilizados para el estudio son; 195-65 /R15, 235-75 /R15 y 30X9.5 R15.

Llantas utilizadas para el estudio



Figura #12, fuente autores

3.3 Dinamómetro Sáenz.

El dinamómetro es la herramienta que nos permite determinar el rango de pérdida de potencia del motor, la potencia a las ruedas y hacia el eje posterior, es una herramienta que permite validar los cambios que se realizan ya sea en los motores o en las componentes de la suspensión por pérdidas de potencia.

Banco Sáenz rodillo inercial para competición.



Figura #13, Fuente página oficial Sáenz 2022

3.4 Revisión Técnica Vehicular

La Revisión Técnica Vehicular es la encargada de certificar anualmente a los automotores que circulan dentro del distrito metropolitano de Quito, esta entidad de base en normas Inen 2202 para motores a Diésel, 2204 motores a gasolina, con algunas modificaciones para el efecto, no es por demás mencionar que las dos normas están fuera de tiempo por ser pruebas estáticas y el mundo realiza hoy en día pruebas dinámicas.

Parámetros para a Revisión Técnica Vehicular

| AÑO | HC en PPM | CO en % | O ₂ en % | TIPO FALTA | RESULTADO |
|----------------------|----------------------|--|---------------------|------------|---------------------------|
| DEL 2000 EN ADELANTE | $0 \leq X < 160$ | $0 \leq X < 0,5$ $0,5 \leq X < 0,8$ | $0 \leq X < 3$ | 0 | APROBADO SIN FALLA |
| | $160 \leq X < 180$ | 0,8 | $3 \leq X < 4$ | 1 | APROBADO CON FALTA TIPO 1 |
| | $180 \leq X < 200$ | $0,8 \leq X < 1$ | $4 \leq X < 5$ | 2 | APROBADO CON FALTA TIPO 2 |
| | $X \geq 200$ | $X \geq 1$ | $X \geq 5$ | 3 | RECHAZADO |
| DE 1990 A 1999 | $0 \leq X < 650$ | $0 \leq X < 3,5$ | $0 \leq X < 3$ | 0 | APROBADO SIN FALLA |
| | $650 \leq X < 700$ | $3,5 \leq X < 4$ | $3 \leq X < 4$ | 1 | APROBADO CON FALTA TIPO 1 |
| | $700 \leq X < 750$ | $4 \leq X < 4,5$ | $4 \leq X < 5$ | 2 | APROBADO CON FALTA TIPO 2 |
| | $X \geq 750$ | $X \geq 4,5$ | $X \geq 5$ | 3 | RECHAZADO |
| DE 1990 A 1999 | $0 \leq X < 950$ | $0 \leq X < 6$ | $0 \leq X < 3$ | 0 | APROBADO SIN FALLA |
| | $950 \leq X < 1100$ | $6 \leq X < 6,5$ | $3 \leq X < 4$ | 1 | APROBADO CON FALTA TIPO 1 |
| | $1100 \leq X < 1200$ | $6,5 \leq X < 7$ | $4 \leq X < 5$ | 2 | APROBADO CON FALTA TIPO 2 |
| | $X \geq 1200$ | $X \geq 7$ | $X \geq 5$ | 3 | RECHAZADO |

Figura #10. Parámetros RTV para Quito, Fuente RTV

4.0 METODOLOGÍA

Es un estudio metodológico **cuantitativo** los datos obtenidos de las herramientas de medición (dinamómetro) permiten hacer una comparación documental de información de laboratorio, **descriptiva** comparativa de los datos generados para llegar a una conclusión que determine si la modificación obtenida del vehículo afecta a potencia que se entregará en el eje posterior. Adicional a ello verificar si con las modificaciones se afecta a las emisiones contaminantes. La metodología cuantitativa determina los valores que cambian en la suspensión, variables alternativas generada por el diámetro de los neumáticos, la cantidad del incremento de combustible por la diferencia de potencia entregada, analizar la pérdida de potencia por los cambios encontrados y también un análisis numérico de los valores de emisiones de gases producto de estos cambios.

5.0 DISCUSIÓN

La toma de datos se basa en “**Protocolo para la utilización del dinamómetro en un lugar de trabajo**” del gobierno de Chile del 2013, que permite tener una metodología de utilización del instrumento de medida. Es por ello que en primer lugar se enciende el equipo y se hace una revisión de sus componentes que no tengan ningún tipo de interferencias tanto en las partes fijas como móviles, se revisa la fecha de vida útil de las eslingas que se utilizan para la sujeción del vehículo, los puntos de apoyo de sujeción que no tengan agrietamientos, deformaciones o inicios de oxidación que puedan cambiar las condiciones del metal.

Se coloca el vehículo en la plataforma del dinamómetro y se ubica las ruedas motrices o el eje a ser tomado la medida sobre el rodillo giratorio, se hacen la colocación de las eslingas, se ajusta el vehículo de tal forma que no se pueda mover en el momento de la toma de medidas, coloca el vehículo se eleva el rodillo para que el auto quede a la altura correcta para la medición, se hacen pruebas de rodadura del vehículo sobre el rodillo y verificar que el vehículo no tenga sobresaltos y tienda a moverse de forma inesperada, luego de los ajustes necesarios y verificados que se encuentran en condiciones óptimas de tomar las lecturas, se procede hacer una o dos pruebas sin tomar datos para asegurar que el motor esté en temperatura de trabajo correcta y las medidas se las puede leer sin contratiempos y en forma segura.

Fijación del vehículo en el dinamómetro.

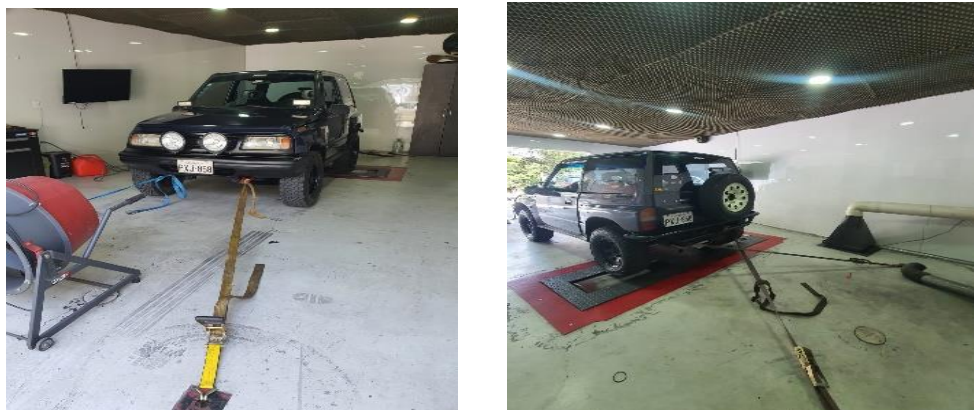


Figura #14, fuente autores, 2023

Las primeras lecturas realizadas en el vehículo Vitara 1.6 L se las realizan en condiciones estándar, es decir con una llanta 195-65 R15 como sale de la fábrica, esto se lo hace para determinar que el auto en estudio cumpla con las características constructivas de origen, entregado la potencia que está en la ficha para iniciar el estudio. Las variables que se quieren determinar es en primer lugar es el torque a las ruedas y la pérdida que se genera por el incremento de diámetro en las ruedas, en segundo lugar, si este diámetro mayor aumenta el consumo de combustible y con ello una mayor emisión de gases contaminantes. Para el análisis de consumo de combustible se realiza pruebas de ruta y las emisiones con la ayuda de pruebas de laboratorio con un analizador de gases,

Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 165 - 65 R15

| Análisis anova potencia máxima motor 5500 rpm | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 69,5 | 70 | 71 | 69,5 | 68 | 70 | 68,5 |
| Potencia rueda | 53,7 | 54,6 | 54 | 54,2 | 54,7 | 54,9 | 54,7 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 486,50 | 69,50 | 0,86 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 380,80 | 54,40 | 0,17 | | | |

Tabla #3, Fuente autores.

Se puede determinar que la medida de potencia máxima del motor se registra a 5500 rpm, y a las ruedas determina su valor máximo a 5300 rpm, razón por la cual existen dos valores medidos a diferentes rangos de revoluciones. Las medidas son tomadas con un neumático de medidas 195-65 /R15. Con una presión de 30 psi, ésta toma de datos se compara con los datos de fábrica para determinar que las condiciones de funcionamiento están dentro de los rangos normales de funcionamiento, hay que determinar los valores están un 12.5% bajo los parámetros de la ficha técnica, entra las causales el estudio realizado mencionar que se lo hace a 2850 metros sobre el nivel del mar en la ciudad de Quito, las condiciones del combustible ecuatoriano no son las mejores, con estos datos confirmar que el vehículo está en condiciones de funcionamiento normal. “Alrededor del 3% por cada 300 metros de altitud, dicho de otra forma, **1% por cada 100 metros**. De esta manera, puedes **perder hasta el 20%** en zonas con una altitud considerable” Memolira.com, (30 marzo 2023). El porcentaje de pérdida de potencia está dentro de lo estipulado.

Los datos obtenidos de potencia máxima a las ruedas a 5300 rpm, 165 65 R15

| Análisis anova potencia máxima a las ruedas a 5300 rpm | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 69,4 | 70,4 | 68,4 | 71,4 | 67,4 | 68,9 | 69,9 |
| Potencia rueda | 54,9 | 55,9 | 55,45 | 54,45 | 54,1 | 55,2 | 55 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 485,80 | 69,40 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 385,00 | 55,00 | 0,31 | | | |

Tabla #4, Fuente Autores

Los datos tomados en la prueba #2 se hace una variante con respecto al diámetro de los neumáticos con el objetivo que el auto logre una mayor altura con ello poder llegar a lugares más irregulares y poder solventar estos caminos fuera de la carreteas, la variante para la toma de datos es pasar de una medida 165-65/R15 a una 235-75/r15 a una presión de inflado de 30PSI.

Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 235 R15

| Análisis anova potencia máxima motor 5500 rpm | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 235 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 67,9 | 68,9 | 66,9 | 69,9 | 65,9 | 67,4 | 68,4 |
| Potencia rueda | 50,7 | 51,7 | 49,7 | 52,7 | 48,7 | 50,2 | 51,2 |
| Resumen | | | | | | | |
| 235 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 475,30 | 67,90 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 354,90 | 50,70 | 1,50 | | | |

Tabla #5, fuente autores

Se hace el montaje de vehículo en el dinamómetro siguiendo los mismos pasos de la primera prueba para que la prueba cumpla con los mismos estándares, determinar la potencia en el eje posterior sin intervenir en el motor, al cambiar el diámetro de los neumáticos se incide en la energía que se entrega al eje posterior y es lo que la prueba cuantifica en el dinamómetro. Siguiendo el procedimiento inicial se hacen dos tomas de lecturas donde se determina la potencia máxima del motor a 5500 rpm.

Los datos obtenidos de potencia máxima de la rueda a 5300 rpm 235 R15

| Análisis anova potencia máxima de la rueda 5300 rpm | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 235 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 67,8 | 68,7 | 66,9 | 69,8 | 65,8 | 68,3 | 67,3 |
| Potencia rueda | 51,8 | 52,8 | 50,8 | 53,8 | 49,8 | 52,3 | 51,3 |
| Resumen | | | | | | | |
| 235 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 474,60 | 67,80 | 1,45 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 362,60 | 51,80 | 1,50 | | | |

Tabla #6, fuente autores

Los datos demuestran un decremento de la potencia del motor potencia del motor en un 2.30% por el simple cambio de diámetro del neumático, mientras que la potencia a las ruedas de igual forma existe una pérdida 9.24% que ya es significativo en el cambio de neumáticos.

Para la tercera prueba se toma como referencia el neumático con uso en caso de Jeep 4X4 para aplicaciones de condiciones extremas de fuera de camino, por el diámetro más amplio disponible y en algunos autos hay que hacer ciertas modificaciones como subir la suspensión, cambiar la suspensión por sistemas de más amplitud de desplazamiento, más fuertes de tensión para apoyar mejor el auto, es por ello que es muy común en los vitara 3 puertas neumáticos de medidas 30*9.50 R15 que se acopla al auto, es el neumático empleado para

Los datos obtenidos de potencia máxima del motor a 5500 rpm 30*9.5 R15

| Análisis anova potencia máxima motor 5500 rpm | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 65,7 | 66,7 | 64,7 | 67,7 | 63,7 | 66,2 | 65,2 |
| Potencia rueda | 43 | 44 | 42 | 45 | 41 | 43,5 | 42,5 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 459,90 | 65,70 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 301,00 | 43,00 | 1,50 | | | |

Tabla #7, fuente autores

La tercera prueba a 5500 rpm proporciona la potencia máxima del motor, es por ello que la toma de la potencia en la rueda se la mide a 5300 rpm que permite identificar su valor máximo. De los datos tomados existe una tendencia a la baja de la potencia. La caída de potencia con respecto a la primera medida es de

Los datos obtenidos de potencia máxima de la rueda a 5300 rpm 30*9.5 R15

| Análisis anova potencia a la rueda 5330 rpm | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 66,4 | 67,4 | 65,4 | 68,4 | 64,4 | 66,9 | 65,9 |
| Potencia rueda | 42,7 | 43,7 | 41,7 | 44,7 | 40,7 | 43,2 | 42,2 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 464,80 | 66,40 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 298,90 | 42,70 | 1,50 | | | |

Tabla #8, fuente autores.

La siguiente figura permite evidenciar la diferencia de potencia y como ésta va bajando tanto en la potencia del motor, pese que en el motor la caída no es muy notoria ésta con la medida de 30*9.5 R15 con relación al primer neumático que tiene 195-65R15 hay una caída del 5.33% mientras el diámetro del neumático va amentando, en los vehículos 4X4 se pretende

brindar un neumático para mejorar las condiciones agarre por eso parte del incremento de neumático tiene que ver con el taco de agarre de acuerdo el tipo de terreno.

Comparativo de potencia de motor y potencia a la rueda con la variable diámetro de rueda.

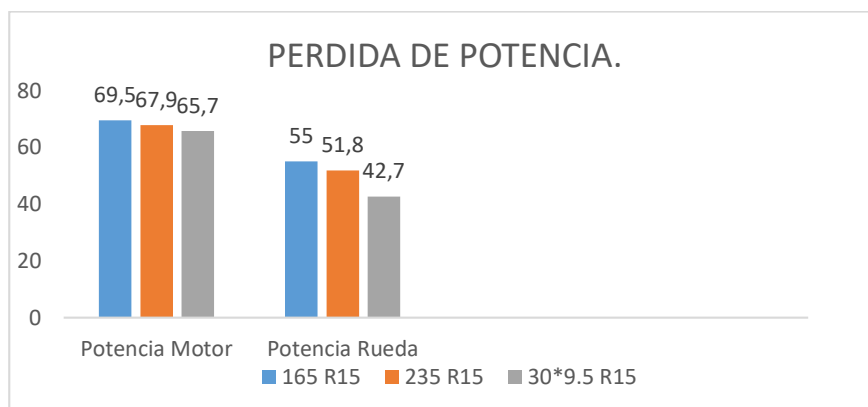


Figura #15, fuente autores.

La diferencia de presión en los neumáticos incide en la potencia entregada a las ruedas es por ello que la toma de datos de las tres medidas de los neumáticos se lo hace con 30PSI, si bien es cierto que la presión cambia la potencia entregada a las ruedas, es un número no muy elevado que no pasa del 5,47% en los casos extremos de mayor y menor medida puede influir en la medida tomada en las pruebas de laboratorio, con este porcentaje podría cambiar la medida final es por ello que se tiene que extremar la medición del neumático antes de las pruebas, con ello lograr que los datos de laboratorio sean los correctos por la objetividad del estudio.

El estudio determina la caída de potencia con un rango de 5,47% que corresponde a 4.37 hp de 80 disponibles, en cambio el dato de la caída potencia a las ruedas refleja un 22.36%, al estar sobre un 20% el cambio es muy significativo y afecta en el desempeño del auto en especial en condiciones adversas fuera de camino o en cuestiones deportivas donde se necesita toda la potencia que se pueda entregar para estar en lugares de privilegio, es por ello que éste estudio demuestra que al cambiar las condiciones del auto tenemos afectaciones en la potencia que deben ser analizadas y asegurar que los cambios realizados y su afectación justifica el desempeño que se desea.

El cambio de las condiciones de conducción de auto también afecta otras condiciones del vehículo, así se ve afectado el consumo de combustible, ayudados de la norma se realiza la prueba de ruta que cumple una distancia de 52 km, al acoplarle la ruta a la norma permite determinar el consumo de combustible, para determinar el consumo de combustible se hace la misma prueba por tres ocasiones para hacer un estándar de conducción y determinar el consumo, la prueba de ruta tiene el objetivo de identificar el consumo real del automotor en las mismas condiciones de manejo y de esfuerzo, la primera prueba de laboratorio inicia en la gasolinera del Ilaló hasta el redondel del ciclista con una distancia de 52 km, para el efecto el vehículo salió con el tanque lleno y a su llegada se lo vuelve a repostar para verificar la cantidad de combustible consumido en litros y en kilómetros, se realiza el mismo procedimiento por tres ocasiones para obtener la media como dato de entrada, este ejercicios

se lo hace con los tres tipos de diámetros de neumáticos para determinar el incremento de consumo de combustible.

Para las tres primeras pruebas de ruta se toma una hora que no pico la misma inicia a las 9:00 am y termina a las 12:30 PM en día sábado tratando que la misma sea lo más real posible y lleve la misma velocidad promedio en ruta, con los tanques llenos las primeras pruebas se las realiza con los neumáticos de mediada 195-65/R15, el recorrido duro un tiempo de aproximadamente una hora el completar la ruta completa. El vehículo recorrió de acuerdo al indicador de kilometraje 57Km con un consumo de \$2.50 y 1.041gl por prueba, recordemos que el costo por galón extra de combustible es de \$2.40.

En las segundas pruebas se realiza el cambio de neumáticos con los 235-75/R15, las condiciones son las misma con la diferencia que la medición se realiza en día domingo cumpliendo con los mismos parámetros de tránsito, hora y ruta. Los datos obtenidos en promedio de estas tres lecturas nos arrojan en la misma distancia un consumo de combustible de \$3.80 y 1.582Gl consumidos en promedio, este dato nos genera un incremento del 52.00% de incremento en el consumo cuantificado en dólares americanos, es un incremento significativo tan solo por el cambio de neumático.

La tercera prueba de ruta de la realiza en las mismas condiciones el mismo día domingo por la tarde que la carga vehicular es similar y los tiempos de tomados no generan cambios en la distancia recorrida. Los valores de kilometraje recorrido son los mismos, pero para esta prueba se coloca la tercera medida de ruedas que es 30*9.5/ R15. El consumo de combustible es de 4.33\$ con un consumo de 1.804Gl promedio de los tres recorridos de las pruebas, esto nos genera un incremento de consumo con respecto a 195-65R15 de un 73.20% de consumo mayor. En lo que respecta al incremento con la medida original del vehículo es casi el doble lo que significa que el vehículo hace mayor esfuerzo al desplazarse consumiendo más energía por kilómetro recorrido.

Diferencia de costos y consumo en pruebas realizadas.

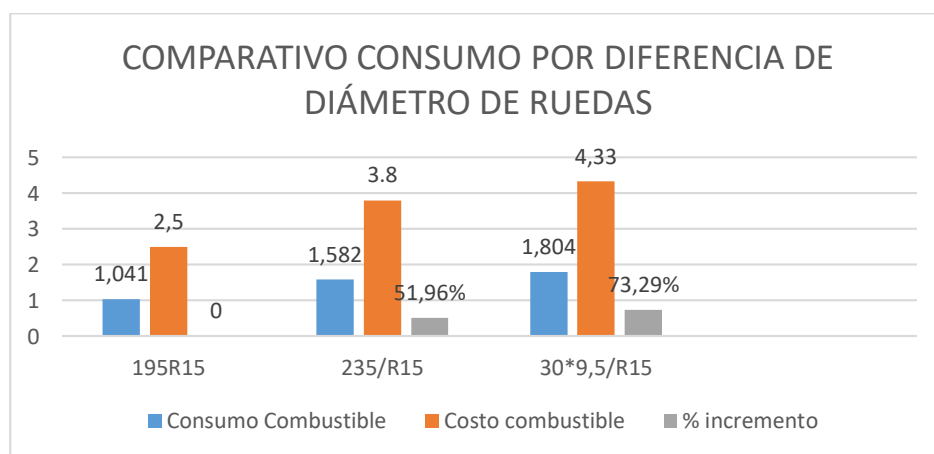


Tabla #16, fuente autores.

Los datos obtenidos en las pruebas de ruta permiten evidenciar un incremento de consumo de combustible que va en concordancia con el incremento del diámetro de los neumáticos, el margen de incremento de consumo de combustible está dentro 51.96 % al 73.29%, esto quiere decir que el vehículo para desplazarse la misma cantidad utiliza una mayor fuerza y que

necesita más energía para mover los neumáticos por el incremento de diámetro, en física se lo conoce como $W=F*d$, donde el trabajo (W) y es igual al producto de una fuerza (F) por una distancia (d), al cambiar el valor de la distancia cambiamos el trabajo, como el trabajo está determinado por el motor modificamos la formula y eso se traduce a mayor energía para mover la rueda.

6.0 CONCLUSIÓN.

- Las pruebas de laboratorio demuestran que la potencia del motor incide directamente en la potencia de las ruedas motrices del vehículo, esta incidencia es calculada por el fabricante y determina la cantidad de energía entregada por motor al eje de propulsión o ejes de propulsión de acuerdo a las características constructivas, la energía que llega y se entrega de las ruedas y por medio de estas al piso. Los cambios constructivos a los vehículos Off Road para un mejor desempeño fuera de camino, o para circunstancias extremas al montar una mejor suspensión, elevar el auto para colocar mejores y más grandes neumáticos hacen que el vehículo entregue a las ruedas menor energía a un mayor consumo de combustible, en el estudio realizado se utiliza el neumático original de fábrica 195-65/R15 y se lo subió en una primera instancia a 235-75/15 y por último a 30X9/R15, el incremento de los diámetros produce en la primera prueba una pérdida de potencia en el eje de 5.81%, y en la segunda prueba un pérdida de potencia de 22.36% de la energía.
- El trabajo de calle o pruebas de ruta permite identificar que el comportamiento del vehículo en referencia al consumo de combustible, el incremento del mismo está determinado por el diámetro de los neumáticos, genera un incremento de gasto por movilidad, y como se ha recalado el cambio en los auto para hacerlos deportivos no modifica que se los sigan utilizando como vehículos de uso cotidiano, este mayor consumo pese a que la RTV al hacer sus prueba no diferencie y diga que el motor no incrementa los gases nocivos por hacer pruebas obsoletas (pruebas estáticas) al quemar mayor cantidad de combustible para hacer el mismo trabajo es evidente que se genera con la misma unidad de medida más mas de aire contaminado. El incremento del consumo de combustible al pasar de un neumático 195-65/R15 al 235-75/R15 incrementa el consumo de combustible en un 51.96%, en la transición de pasar de un neumático 195/R15 a una 30X9/r15 el incremento es de un 73.29%
- Las tomas de datos de las emisiones del vehículo bajo la norma ambiental del distrito metropolitano de Quito validan que el vehículo en estudio cumple en cada uno de sus lineamientos, las pruebas de ruta confirman que existe un incremento considerable de la demanda de combustible pero al ser las pruebas estáticas no se refleja el esfuerzo que realiza el motor al transmitir potencia por lo que los datos se mantienen en los mismos valores, si las pruebas fueran como en la mayoría de países se podría determinar la incidencia que el cambio de diámetros en los neumáticos genera en el volumen de emisiones que con seguridad cumpliendo con la norma se emana mayor cantidad al medio ambiente.
- La competición deportiva sacrifica mucho el entorno de confort del auto, esto al llevarlo a una suspensión con mayores prestaciones para el terreno adverso hace que

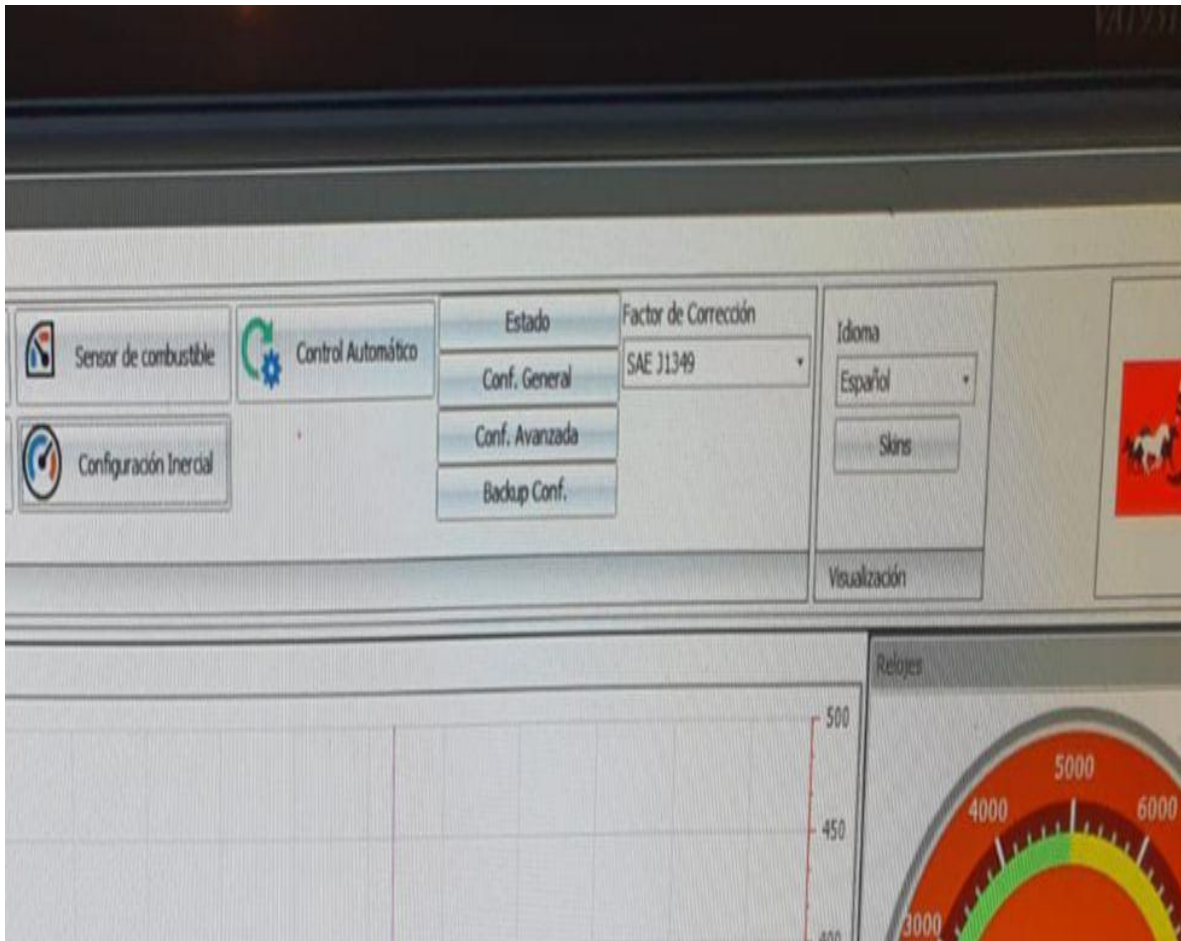
también se pierda estabilidad al subir el centro de gravedad de auto, en la gran mayoría los modificados la suspensión se quedan como carros de calle perdiéndolas características de seguridad en condiciones de asfalto y vías rápidas, al ganar características de montaña sacrificamos las características de asfalto, en donde más que el mal camino predomina la velocidad y con ello una buena estabilidad de conducción por velocidad.

7.0 BIBLIOGRAFÍA

- Aire. (2020, 28 de febrero). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 20:21, marzo 9, 2020 desde <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Aire&oldid=123880423>.
- Atmósfera. (2018, 27 de agosto). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 05:35, agosto 28, 2018 desde <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Atm%C3%B3sfera&oldid=110216778>.
- Galileo Galilei. (2020, 7 de febrero). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 20:35, marzo 6, 2020 desde https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Galileo_Galilei&oldid=123381456.
- La atmosfera terrestre. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2016, a partir de http://recursostic.educacion.es/newton/web/materiales_didacticos/la_atmosfera_terrestre/index.htm
- La atmósfera terrestre. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2016, a partir de http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/1esobiologia/1quincena5/1q5_index.htm
- Contaminación atmosférica. (2018, 26 de agosto). *Wikipedia, La enciclopedia libre*. Fecha de consulta: 12:54, agosto 28, 2018 desde https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Contaminaci%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica&oldid=110195850.
- Mal de montaña - Wikipedia, la enciclopedia libre. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2016, a partir de https://es.wikipedia.org/wiki/Mal_de_monta%C3%B1a
- Proyecto Biosfera. (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2016, a partir de <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1ESO/atmosfera/contenidos.htm>
- (s. f.). Recuperado 22 de julio de 2016, a partir de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio//500/513/html/Unidad_03/pagina_1.html
- Cevallos, I. (2015). ¿Por qué los carros en la altura pierden potencia? Recuperado de <https://www.seminuevos.com/blog/por-que-los-carros-en-la-altura-pierden-potencia/>
- Human, D. M., Ullman, T.L. and Baines, T.M., Simulation of high altitude effects on heavyduty diesel emissions. SAE paper 900883. (1990).
- Rakopoulos, T. (2016). Solidarity: the egalitarian tensions of a bridge-concept. *Social Anthropology*, 24(2), 142-151. doi: 10.1111/1469-8676.12298
- Chaffin, C.A. and Ullman, T.L., Effects of increased altitude on heavy-duty diesel engine emissions. SAE Paper 940669. (1994).

- Desantes, J.M., Lapuerta, M and Salavert, J.M., Study on independent effects of diesel engine operating conditions on nitric oxide formation and emissions through schematical combustion simulation. Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 210. D02894. pp 71-80. (1996). Fenollosa, C. Aportación a la descripción

8.0 ANEXOS.







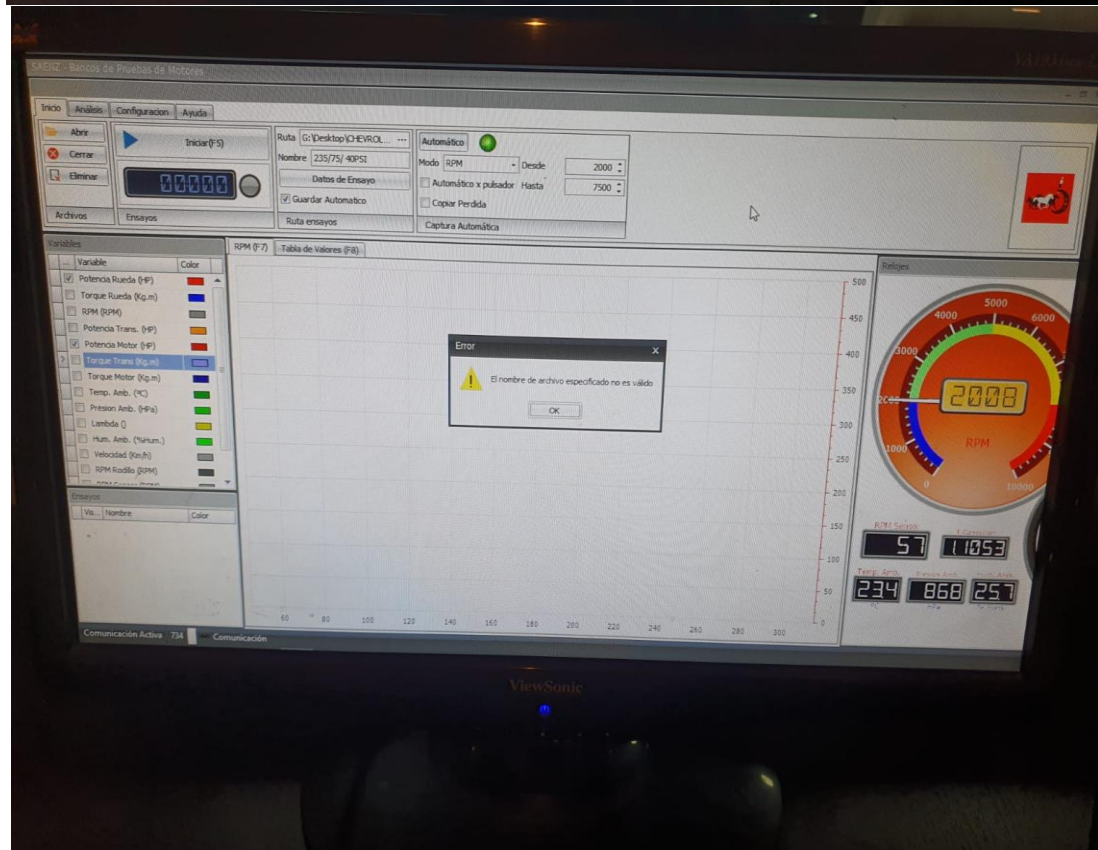


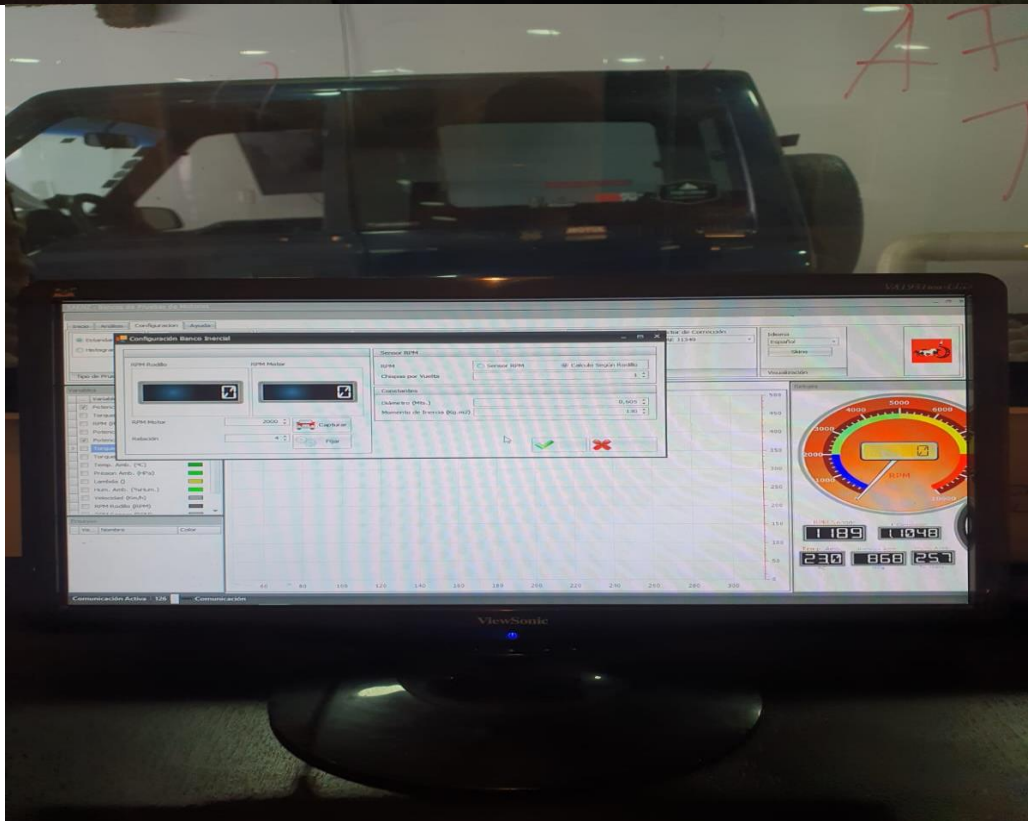
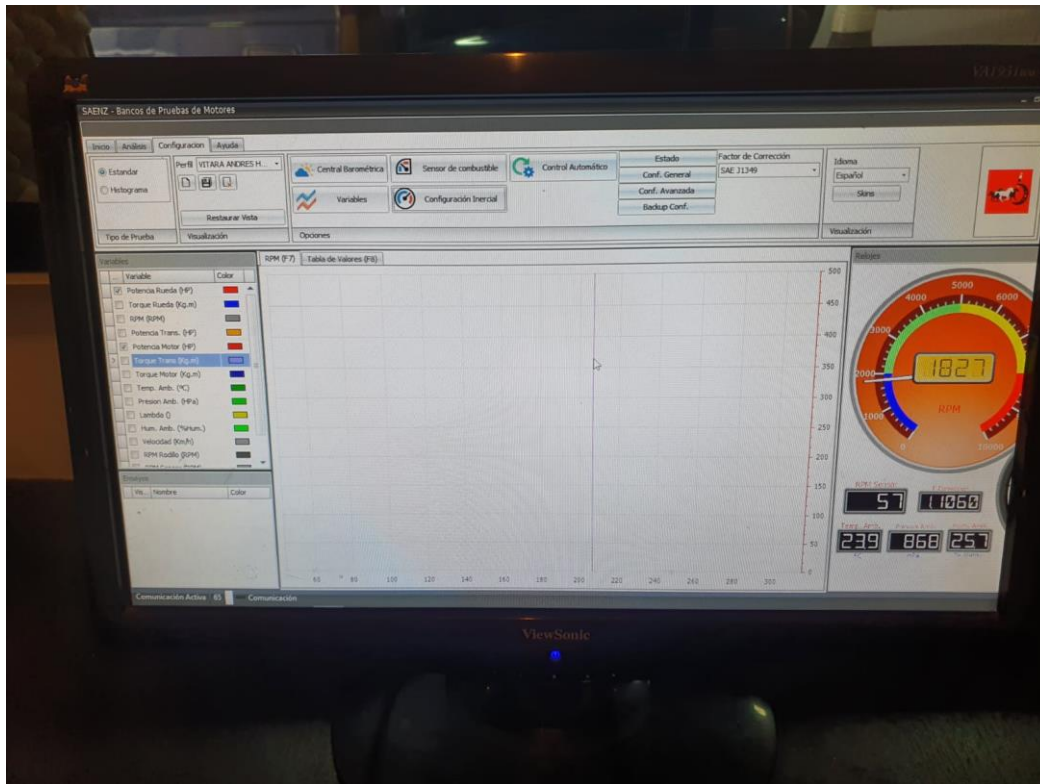


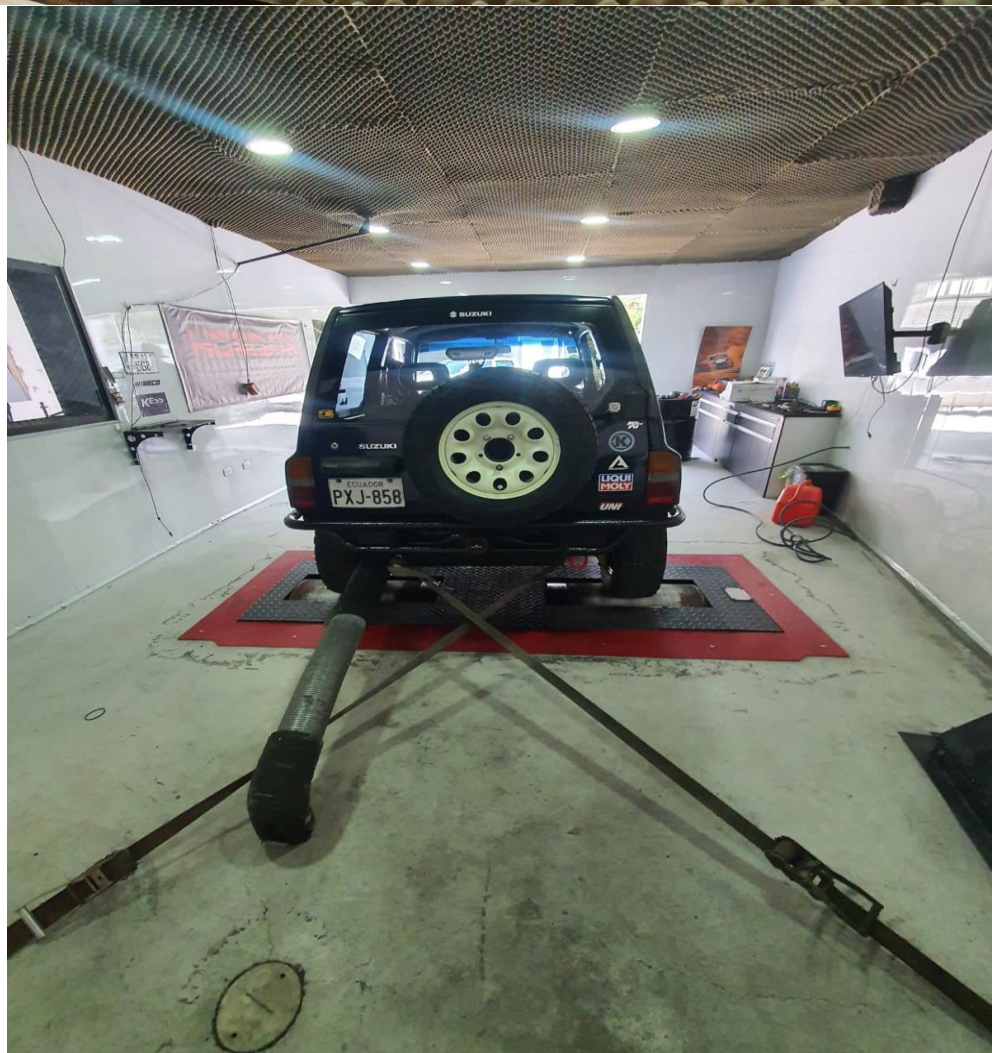


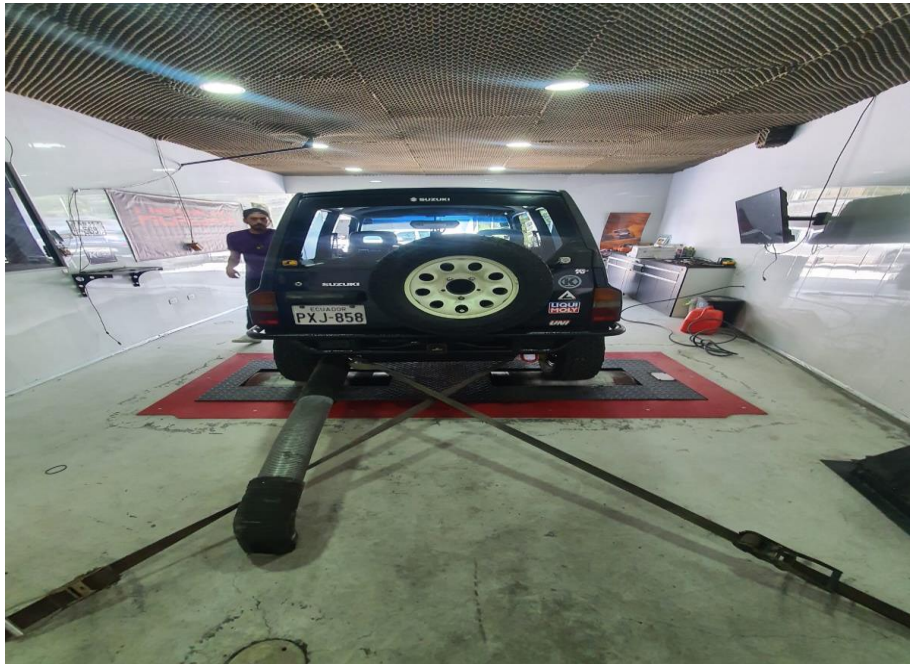


















Datos tomados utilizando ANOVA ESTADISTICA

| Medidas de dinamómetro con llanta 195 / R15 a 30 PSI | | | | | |
|--|------|-----|-----------------------------|-------|-----|
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,5 | Hp | POTENCIA MOTOR | 69,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 53,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 54,9 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 70 | Hp | POTENCIA MOTOR | 70,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,6 | HP | POTENCIA RUEDA | 55,9 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 71 | Hp | POTENCIA MOTOR | 68,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 51,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 55,45 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,5 | Hp | POTENCIA MOTOR | 71,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,2 | HP | POTENCIA RUEDA | 54,45 | Hp |

| | | | | | |
|-----------------------------|------|-----|-----------------------------|-------|-----|
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68 | Hp | POTENCIA MOTOR | 67,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 54,1 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 70 | Hp | POTENCIA MOTOR | 68,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,9 | HP | POTENCIA RUEDA | 55,2 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68,5 | Hp | POTENCIA MOTOR | 69,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 55 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,5 | Hp | POTENCIA MOTOR | 71,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,2 | HP | POTENCIA RUEDA | 54,45 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68 | Hp | POTENCIA MOTOR | 67,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 54,1 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 70 | Hp | POTENCIA MOTOR | 68,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,9 | HP | POTENCIA RUEDA | 55,2 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 195 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68,5 | Hp | POTENCIA MOTOR | 69,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 54,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 55 | Hp |

| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 69,5 | 70 | 71 | 69,5 | 68 | 70 | 68,5 |
| Potencia rueda | 53,7 | 54,6 | 54 | 54,2 | 54,7 | 54,9 | 54,7 |

Resumen

| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|----------------|--------|--------|----------|----------|
| Potencia motor | 7 | 486,50 | 69,50 | 0,86 |
| Potencia rueda | 7 | 380,80 | 54,40 | 0,17 |

| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 69,4 | 70,4 | 68,4 | 71,4 | 67,4 | 68,9 | 69,9 |
| Potencia rueda | 54,9 | 55,9 | 55,45 | 54,45 | 54,1 | 55,2 | 55 |

Resumen

| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|----------------|--------|--------|----------|----------|
| Potencia motor | 7 | 485,80 | 69,40 | 1,50 |
| Potencia rueda | 7 | 385,00 | 55,00 | 0,31 |

Medidas de dinamómetro con llanta 235 / R15 a 30 PSI

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 67,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 50,7 | HP |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 67,8 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 51,8 | Hp |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 51,7 | HP |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68,7 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 52,8 | Hp |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 66,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 49,7 | HP |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 66,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 50,8 | Hp |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 52,7 | HP |

| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
|-----------------------------|------|-----|
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,8 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 53,8 | Hp |

| | | | | | |
|-----------------------------|------|-----|-----------------------------|------|-----|
| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 66,9 | Hp | POTENCIA MOTOR | 66,9 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 49,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 50,8 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 69,9 | Hp | POTENCIA MOTOR | 69,8 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 52,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 53,8 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 65,9 | Hp | POTENCIA MOTOR | 65,8 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 48,7 | HP | POTENCIA RUEDA | 49,8 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 67,4 | Hp | POTENCIA MOTOR | 68,3 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 50,2 | HP | POTENCIA RUEDA | 51,3 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 235 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 68,4 | Hp | POTENCIA MOTOR | 67,3 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 51,2 | HP | POTENCIA RUEDA | 52,3 | Hp |

| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 67,9 | 68,9 | 66,9 | 69,9 | 65,9 | 67,4 | 68,4 |
| Potencia rueda | 50,7 | 51,7 | 49,7 | 52,7 | 48,7 | 50,2 | 51,2 |

Resumen

| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|----------------|--------|--------|----------|----------|
| Potencia motor | 7 | 475,30 | 67,90 | 1,50 |
| Potencia rueda | 7 | 354,90 | 50,70 | 1,50 |

| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 67,8 | 68,7 | 66,9 | 69,8 | 65,8 | 68,3 | 67,3 |
| Potencia rueda | 51,8 | 52,8 | 50,8 | 53,8 | 49,8 | 52,3 | 51,3 |

Resumen

| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza |
|----------------|--------|--------|----------|----------|
| Potencia motor | 7 | 474,60 | 67,80 | 1,45 |
| Potencia rueda | 7 | 362,60 | 51,80 | 1,50 |

| Medidas de dinamómetro con llanta 30X9 / R15 a 30 PSI | | | | | |
|---|------|-----|--------------------------------|------|-----|
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 65,7 | Hp | POTENCIA MOTOR | 66,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 43 | HP | POTENCIA RUEDA | 42,7 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 66,7 | Hp | POTENCIA MOTOR | 67,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 44 | HP | POTENCIA RUEDA | 43,7 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 64,7 | Hp | POTENCIA MOTOR | 65,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 42 | HP | POTENCIA RUEDA | 41,7 | Hp |
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm |
| POTENCIA MOTOR | 67,7 | Hp | POTENCIA MOTOR | 68,4 | Hp |
| POTENCIA RUEDA | 45 | HP | POTENCIA RUEDA | 44,7 | Hp |

| | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C | | |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm | | |
| POTENCIA MOTOR | 63,7 | Hp | POTENCIA MOTOR | 64,4 | Hp | | |
| POTENCIA RUEDA | 41 | HP | POTENCIA RUEDA | 40,7 | Hp | | |
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C | | |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm | | |
| POTENCIA MOTOR | 66,2 | Hp | POTENCIA MOTOR | 66,9 | Hp | | |
| POTENCIA RUEDA | 43,5 | HP | POTENCIA RUEDA | 43,2 | Hp | | |
| Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | Prueba Dinamómetro 30X9,5 /R15 | | | | |
| PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | PRESIÓN DE RUEDAS 30 PSI | | | | |
| TEMP MOT | 85 | °C | TEMP MOT | 85 | °C | | |
| RPM MUESTRA | 5500 | rpm | RPM MUESTRA | 5300 | rpm | | |
| POTENCIA MOTOR | 65,2 | Hp | POTENCIA MOTOR | 65,9 | Hp | | |
| POTENCIA RUEDA | 42,5 | HP | POTENCIA RUEDA | 42,2 | Hp | | |
| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 65,7 | 66,7 | 64,7 | 67,7 | 63,7 | 66,2 | 65,2 |
| Potencia rueda | 43 | 44 | 42 | 45 | 41 | 43,5 | 42,5 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 459,90 | 65,70 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 301,00 | 43,00 | 1,50 | | | |
| Análisis anova solo gasolina a 750 rpm | | | | | | | |
| 165 /R15 | MUESTRA 1 | MAESTRA 2 | MAESTRA 3 | MUESTRA 4 | MUESTRA 5 | MUESTRA 6 | MUESTRA 7 |
| Potencia motor | 66,4 | 67,4 | 65,4 | 68,4 | 64,4 | 66,9 | 65,9 |
| Potencia rueda | 42,7 | 43,7 | 41,7 | 44,7 | 40,7 | 43,2 | 42,2 |
| Resumen | | | | | | | |
| 165 /R15 | Cuenta | Suma | Promedio | Varianza | | | |
| Potencia motor | 7 | 464,80 | 66,40 | 1,50 | | | |
| Potencia rueda | 7 | 298,90 | 42,70 | 1,50 | | | |



EDITOR RESPONSABLE.

Luis Carrasco Menéndez: Instituto de Salud Pública de Chile.
Jefe Sección Ergonomía.

PANEL DE EXPERTOS.

Ana Paola González Saavedra: Universidad Mayor.
Luis Campos Uribe: Universidad Mayor.
Pablo Ortega Auriol: Universidad Mayor.
Esteban Ríos Chamorro: Universidad Mayor.

REVISOR.

María Maturana Aguirre: Instituto de Salud Pública de Chile.

AGRADECIMIENTOS

A Rodrigo Pinto Retamal y Luis Fuentesalba Muñoz, profesionales de la Asociación Chilena de Seguridad, los cuales hicieron una revisión de este protocolo producto de su experiencia en la utilización del dinamómetro en Chile.

D013-PR-500-02-001

Versión 1.0

Diciembre, 2013

Para citar el presente documento:

Instituto de Salud Pública de Chile, "Protocolo para la utilización del dinamómetro en el lugar de trabajo". Primera versión 2013. Disponible en: <http://www.ispch.cl/saladocupacional>, en publicaciones de referencia.

Consultas o comentarios:

Sección GRS del Instituto de Salud Pública de Chile, www.ispch.cl.

“PROTOCOLO PARA LA UTILIZACIÓN DEL DINAMÓMETRO EN EL LUGAR DE TRABAJO”

INDICE DE CONTENIDOS.

| Capítulo | Pág. |
|---|------|
| PRIMERA PARTE: Aspectos Generales. | |
| 1.- Antecedentes | 4 |
| 2.- Objetivos | 4 |
| 3.- Alcance | 4 |
| 4.- Población Objetivo y Usuarios | 4 |
| 5.- Marco Legal | 5 |
| 6.- Definiciones | 5 |
| SEGUNDA PARTE: Uso de dinamómetro en los lugares de trabajo | |
| 7.- Utilización de dinamómetro en los lugares de trabajo | 7 |
| 7.1. Introducción | 7 |
| 7.2. Características del evaluador | 7 |
| 7.3. Instrumentación | 7 |
| 7.4. Desarrollo de la medición | 9 |
| 7.4.1. Consideraciones previas | 9 |
| 7.4.2. Determinaciones Iniciales | 10 |
| 7.5. Medición de fuerza inicial | 13 |
| 7.6. Medición de fuerza de sustentación | 14 |
| 7.7. Medición sobre estructuras distintas a los camos de uso industrial | 15 |
| 7.8. Medición de la magnitud de cargas | 16 |
| 7.9. Interpretación de los resultados | 17 |
| 7.10. Contenidos del Informe de evaluación | 18 |
| 8.- Bibliografía | 19 |

PRIMERA PARTE: Aspectos Generales.

1. ANTECEDENTES.

La encuesta laboral de la Dirección del Trabajo ENCLA⁴, de los años 2008 y 2011 respectivamente señalan que, los empleadores y trabajadores perciben que, entre los factores de riesgos de mayor prevalencia en las empresas están la sobrecarga muscular y el manejo de carga como levantar, trasladar o arrastrar carga.

Durante el año 2005 entró en vigencia la Ley N° 20.001, que regula el manejo manual de carga en Chile, publicándose el mismo año el reglamento correspondiente (DS N° 63/2005). El año 2008 se publica la "Guía Técnica para la Evaluación y Control de los Riesgos Asociados al Manejo o Manipulación Manual de Carga", del Ministerio del Trabajo y Previsión Social; que establece criterios y recomendaciones para el cumplimiento de las exigencias de la Ley N° 20.001 y del Decreto Supremo N° 63, y de los procedimientos de evaluación de los riesgos a la salud y las condiciones de los trabajadores, derivados del manejo o manipulación manual de carga.

Se ha detectado mediante la consulta a expertos e involucrados en la prevención de riesgos, que en el trabajo existe una baja gestión en el ámbito del manejo manual de cargas, y que varias de las técnicas recomendadas en la Guía Técnica señalada, no se ejecutan. La falta de información más precisa sobre las técnicas descritas en la Guía Técnica, determinan en parte esta situación.

El Instituto de Salud Pública a través de su Departamento Salud Ocupacional ha evaluado esta situación, proponiendo una serie de medidas de apoyo a la gestión de los riesgos asociados al manejo manual de cargas; por lo cual en conjunto con expertos, desarrolla este protocolo para facilitar la medición y determinación de las fuerzas realizadas por los trabajadores y trabajadoras, mediante la utilización del dinamómetro en los lugares de trabajo.

2. OBJETIVO.

Establecer la metodología para determinar la magnitud de la fuerza realizada por los trabajadores y trabajadoras en los lugares de trabajo, a través del uso correcto del dinamómetro.

3. ALCANCE.

Este protocolo constituye una herramienta para ser usada por las empresas en la gestión preventiva, y entrega información técnica (II) a profesionales de la prevención de riesgos y salud ocupacional que deseen medir la magnitud de las fuerzas realizadas por los trabajadores y trabajadoras, especialmente en las tareas de empuje y arrastre de carga.

Por otra parte ayuda a mejorar la respuesta de los involucrados en la gestión del riesgo asociado al manejo manual de carga en el país, pudiendo hacer uso de la metodología específica para la evaluación de las tareas de empuje y arrastre que señala la "Guía Técnica para la Evaluación y Control de los Riesgos Asociados al Manejo o Manipulación Manual de Carga", del Ministerio del Trabajo y Previsión Social.

4. POBLACION OBJETIVO y USUARIOS.

La población objetivo son los procesos de las empresas tanto del sector público como privado del país, en las tareas relacionadas al empuje y arrastre de carga, determinando la fuerza que realizan los trabajadores y trabajadoras, mediante lo cual se pretende mejorar y proteger su salud a través de una mejor gestión del riesgo asociado al manejo manual de carga en Chile.

Los principales usuarios son los profesionales de la seguridad y salud ocupacional, con formación en ergonomía, del sector público como privado, y que realizan evaluaciones del riesgo asociado a manejo manual de cargas a nivel nacional.

⁴ Departamento Salud Ocupacional
Instituto de Salud Pública de Chile

5. MARCO LEGAL.

La ley N° 20.001 publicada el 5 de Febrero de 2005, por el Ministerio del Trabajo y Previsión Social, que "regula el peso máximo de carga humana", se sustenta en principios que resultan fundamentales para entender su propósito: la protección de los trabajadores, establecido claramente en la legislación chilena, a través del código del trabajo; estableciendo los mecanismos preventivos necesarios para gestionar los riesgos derivados del manejo o manipulación manual de carga, y enfatizar que en la organización de los procesos se utilicen los medios adecuados, especialmente mecánicos, a fin de evitar sobre esfuerzos físicos, además de las obligaciones del empleador en materia de capacitación.

Por otra parte el reglamento asociado a esta Ley, corresponde al Decreto Supremo N° 63 / 2005 del Ministerio del Trabajo y Previsión Social, publicado en el Diario Oficial en Septiembre del mismo año, que regula en cuanto a: i) las manipulaciones manuales de carga que impliquen riesgos a la salud o a la condiciones físicas de los trabajadores regidos por el código del trabajo y ii) las obligaciones del empleador, para la protección de los trabajadores que realizan estas labores.

La "Guía Técnica para la Evaluación y Control de los Riesgos Asociados al Manejo o Manipulación Manual de Carga", del Ministerio del Trabajo y Previsión Social establece los criterios y recomendaciones que orientan el cumplimiento de las exigencias de la Ley N° 20.001 y del Decreto Supremo N° 63 y establece el procedimiento de evaluación de los riesgos a la salud y las condiciones de trabajo, por lo tanto constituye una herramienta para ser usada por las empresas en su gestión preventiva, entregando información para asistir a los profesionales de la prevención de riesgos y salud ocupacional y a los representantes de comités paritarios de higiene y seguridad, en sus iniciativas de identificación, evaluación y control de los riesgos para la salud de los trabajadores, derivados del manejo o manipulación manual de carga.

El DFL N° 1, de 2005, del Ministerio de Salud, en su Art. 57, señala que el Instituto de Salud Pública de Chile (ISP), servirá de laboratorio nacional y de referencia en el campo de la salud ocupacional. Por otra parte la Estructura Orgánica del ISP, establece las funciones del Departamento Salud Ocupacional y de la Sección Ergonomía, destacando la de elaborar protocolos y guías técnicas para la evaluación y control de los riesgos en el trabajo, fijar métodos de análisis, procedimientos de muestreo y técnicas de medición respecto de la exposición de los trabajadores, aportando un enfoque ergonómico y generar propuestas de normas técnicas en el área.

6. DEFINICIONES.

Dinamómetro: Instrumento utilizado para medir la magnitud de las fuerzas realizadas. A través de su correcto uso, permite medir las fuerzas que realiza una persona (trabajador o trabajadora), al momento de empujar y arrastrar carga. También permite determinar el peso de un objeto o carga y las fuerzas de levantamiento.

Fuerza de Empuje: Esfuerzo físico humano, donde la fuerza motriz se dirige hacia el cuerpo u objeto a mover, y la fuerza se realiza hacia fuera del cuerpo del trabajador, y comúnmente la persona se mantiene o mueve hacia delante.

Fuerza de Arrastre: Esfuerzo físico humano, donde la fuerza motriz se encuentra al frente del cuerpo u objeto a mover y la fuerza se realiza hacia el cuerpo del trabajador, y comúnmente la persona se mantiene o mueve hacia atrás.

Fuerza Inicial: Fuerza aplicada para poner en movimiento un objeto (es decir, la fuerza requerida para acelerar el objeto). Se utiliza para superar la inercia del objeto, tanto al iniciar o bien cambiar la dirección de movimiento. Cuantas más maniobras o detenciones se deban realizar, más veces se deberá aplicar esta fuerza inicial.

Fuerza de sustentación: Es la fuerza que se utiliza para mantener en movimiento un objeto en cierta trayectoria.

Norma ISO 11228-1:2007: Ergonomía - Manejo Manual Parte 1, Levantamiento.

Especifica los límites recomendados para el levantamiento de carga (incluye las tareas de levantar y descender) y el transporte manual, tomando en cuenta respectivamente, la intensidad, la frecuencia y la duración de la tarea.

Norma ISO 11228-2:2007: Ergonomía - Manejo manual Parte 2, Empuje y arrastre. Proporciona los límites recomendados para las tareas de empuje y arrastre, proporcionando orientación sobre la evaluación de los factores de riesgo que se consideran importantes al empujar y arrastrar manualmente y el riesgo de salud para la población trabajadora a evaluar. Las recomendaciones se aplican a la población laboral adulta sana y proporciona una protección razonable a la mayoría de esta población.

Fuerza: Exigencia física generada por el trabajo muscular realizado por el trabajador. Esfuerzo físico que demanda trabajo muscular que puede o no sobrepasar la capacidad individual para realizar una acción determinada o una secuencia de acciones, cuyo resultado puede significar la aparición de fatiga muscular.

Postura: Posiciones de los segmentos corporales o articulares que se requieren para ejecutar una tarea.

Frecuencia y duración de una acción: Cuando se empuja y arrastra una carga, se deben considerar tanto la frecuencia y la duración de la fuerza aplicada. Esfuerzos de larga duración deben evitarse, así como los de alta repetitividad, entre otras cosas porque las fuerzas iniciales serán más frecuentes, en ambos casos se puede generar una mayor sobrecarga en el sistema músculo esquelético.

Distancia de desplazamiento de empuje y arrastre: Las distancias de desplazamiento de cargas pueden variar significativamente entre distintas tareas y durante la jornada de trabajo. Distancias mayores de desplazamiento, junto con las fuerzas y los movimientos frecuentes pueden provocar fatiga con facilidad. Por ejemplo, largas distancias podrían implicar múltiples movimientos de corrección, alteración de la trayectoria y/o detención por parte del trabajador, y por lo tanto el aumento de las demandas de fuerza.

Características de los objetos: Si el objeto posee ruedas, éstas deben ser las adecuadas y estar en buen estado. Para los objetos sin ruedas, se debe reducir la fricción. La fuerza debe ser aplicada sobre el objeto de una manera adecuada y segura. Un objeto que restringe la visibilidad del operador, presenta riesgos cuando se empuja, siendo en estas situaciones, preferible tirar del objeto. Habitualmente es conveniente dotar al objeto a mover de asas verticales largas, con el fin de dar a los usuarios la oportunidad de elegir la altura que permita una mayor comodidad y menor esfuerzo.

Condiciones ambientales asociadas: La superficie sobre la que se mueve el objeto debe ser adecuada para movilizar el objeto. Las rampas, los planos inclinados y los pasos estrechos, aumentan el esfuerzo físico necesario para empujar o tirar de un objeto, lo que aumenta la carga de trabajo sobre el sistema músculo-esquelético y, en consecuencia, el riesgo de lesiones. Las superficies mojadas, cubiertas con polvo u otro agente y las irregularidades del terreno, pueden representar un factor de riesgo para el trabajador. Las vibraciones, la iluminación inadecuada y los ambientes fríos o calurosos imponen una carga adicional al trabajador. Por otra parte los zapatos utilizados por los trabajadores deben proporcionar un adecuado soporte y tracción, siendo de fundamental importancia al realizar tareas de empuje y arrastre de carga.

Características individuales: Las habilidades y capacidades individuales, así como la formación, edad, sexo y estado de salud, son características importantes a tener en cuenta en las todas las actividades relacionadas a la realización de esfuerzos físicos. La formación puede aumentar el nivel de habilidad y capacidad para llevar a cabo una tarea evitando sobreesfuerzos y lesiones.

Organización del trabajo: La organización del trabajo puede modificar el riesgo de sufrir lesiones. Sin embargo los trabajadores deben ser entrenados en cómo realizar las tareas con seguridad y cómo reconocer los factores de riesgo y peligros, en el lugar de trabajo, en las tareas que realizan y en las condiciones de los equipos utilizados.

Altura de agarre: Es la distancia medida desde el suelo al punto de sujeción del carro u objeto para su desplazamiento. Normalmente esta altura está determinada por la altura de las asas o de la barra de agarre. Si la altura de agarre es inadecuada ya sea muy alta o muy baja, esta situación puede influir en la eficiencia del mismo empuje y arrastre, y afectar la salud y el rendimiento del trabajador.

SEGUNDA PARTE: Uso del Dinamómetro en los lugares de trabajo

7.- UTILIZACIÓN DEL DINAMÓMETRO EN LOS LUGARES DE TRABAJO

7.1. Introducción.

La medición con dinamómetro en el lugar de trabajo o en terreno y su utilización correcta, es necesaria para tener una aproximación a la magnitud de la fuerza realizada por el trabajador. La técnica de medición correcta, está determinada por variables que se deben tener en cuenta a la hora de realizar la medición, las cuales se exponen en este documento. Es necesario practicar la correcta técnica de medición, para evitar errores que pueden resultar en una medición inexacta e imprecisa. También es necesario realizar una planificación previa, detectando las situaciones de mayor riesgo para los trabajadores y los momentos más críticos de la jornada en cuanto a la carga a mover o fuerza a realizar. Esto puede ser corroborado previamente mediante una entrevista a los propios trabajadores y supervisores. La medición de las fuerzas realizadas por el trabajador en las maniobras de empuje y arrastre son abordadas con mayor exhaustividad en este documento, debido a que se consideran como necesarias de medir y evaluar a la hora de determinar el riesgo a que están expuestos los trabajadores y establecer las medidas correctivas, así como para su seguimiento, entre otras cosas.

A continuación se exponen las condiciones y características a tener en cuenta en las mediciones, así como la correcta técnica para utilizar un dinamómetro, lo que permite a los evaluadores proceder de una forma estandarizada, permitiendo consistencia de los resultados, y comparabilidad en el tiempo por el mismo u otro evaluador

7.2. - Características del evaluador

El usuario del dinamómetro, debe ser un profesional que se desempeñe en el ámbito de la salud ocupacional y/o prevención de riesgos con conocimiento en el uso del dinamómetro. Idealmente debe contar con formación en ergonomía, lo cual facilita la medición, su posterior análisis y las medidas de intervención que se puedan adoptar a futuro.

Para ello se señalan algunas características deseables:

- 1.- Debe conocer el funcionamiento y ser capaz de operar correctamente el Dinamómetro.
- 2.- Estar al tanto del estado actual, calibración y mantenimiento del Dinamómetro.
- 2.- Conocimiento de la técnica correcta de medición con Dinamómetro, lo que se encuentra expresado en este protocolo.
- 3.- Empatía con el trabajador(a), generando confianza, dando instrucciones adecuadas para reconocer con exactitud y precisión las características de la tarea y posturas que adopta el trabajador al movilizar la carga. Debe ser capaz de obtener información relevante y crítica para generar una prueba correcta, determinado no solo por la magnitud de la fuerza desarrollada, sino también por la organización del trabajo, lo que implica que el trabajador describa como realiza su tarea, cerciorándose que este use sus elementos de protección personal u otros dispositivos que habitualmente utiliza.

7.3. Instrumentación

La medición de la magnitud de la fuerza realizada, se efectuará con un dinamómetro, que como mínimo:

- Permita determinar la fuerza inicial y la de sustentación
- Permita mediciones peak, (fijación de lectura) para fuerza inicial y máxima.
- Permita medir empuje y arrastre, señalándolo en la lectura.
- Permita su uso con distintos accesorios según la tarea a evaluar.

Calibración y mantenimiento periódica:

El dinamómetro deberá calibrarse periódicamente de acuerdo a las instrucciones dadas por el fabricante, lo que implica contar con el certificado o manual correspondiente.

Calibración en Terreno:

El equipo deberá ser calibrado antes de iniciar la medición, de acuerdo a las instrucciones entregadas por el fabricante. Muchos equipos incorporan un sistema de auto calibración. En general las condiciones ambientales como temperatura, presión y humedad relativa, presentes en el lugar de la evaluación no afectan mayormente al equipo, pero se debe verificar según las instrucciones del fabricante.

Se recomienda que al finalizar la jornada en terreno, se realice una verificación de la calibración, es decir una comparación entre el valor de la calibración obtenido al inicio y el valor al finalizar la jornada, recomendándose su revisión o envío al servicio técnico correspondiente, cuando se detecten descalibraciones habituales.

Chequeo del equipo:

Se debe realizar un constante chequeo de las condiciones del equipo, revisando el estado funcional de este y que posea todas sus partes y accesorios, evitando situaciones que afecten o interrumpan la medición.

Verificación de las Baterías

En los dinamómetros digitales, antes de cada medición, debe verificarse la presencia y la carga de las baterías o pilas, para que la medición no sea interrumpida por esta causa.

Fig. N° 1:
Dinamómetro digital

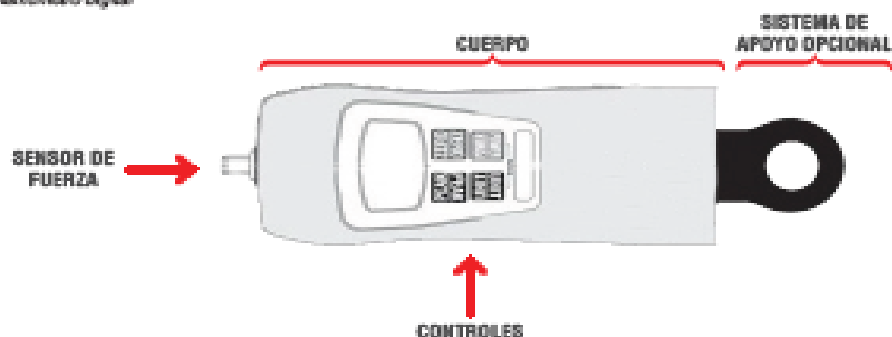


Fig. N° 2:
Dinamómetro mecánico.

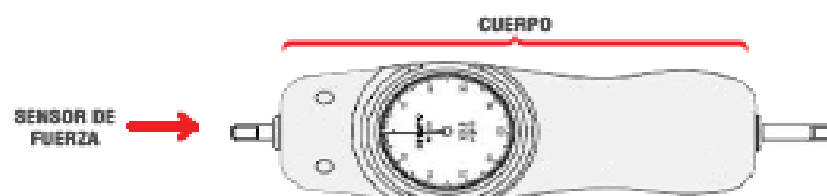


Fig. N° 3:
Distintos tipos de Dinamómetros o sistema de medición de fuerzas.



Fig. N° 4:
Algunos accesorios del Dinamómetros o sistema de medición de fuerzas.



Estos accesorios facilitan la fijación del sensor al carro u objeto, por ejemplo las cadenas y los ganchos se utilizan para las tareas donde se ejecute una tracción o arrastre, así como colgar o levantar objetos.

En cambio los accesorios de contacto, son para asirse firmemente a un punto determinado, evitando que estos resbalen o se muevan de posición y se usan especialmente en las tareas de empuje de carga.

7.4.- Desarrollo de la medición.

7.4.1.- Consideraciones previas.

El conocimiento suficiente de la organización, tanto de los procesos productivos, las tareas realizadas, los procedimientos de ejecución, las materias primas y equipos, el número de trabajadores que desempeñan la tarea, la presencia de lesiones o quejas, la edad, sexo, tiempo de exposición, la organización de los turnos y horarios de trabajo y todos aquellos aspectos que caractericen la labor, así como las operaciones no rutinarias e intermitentes como el mantenimiento, limpieza y cambios en los ciclos de producción, permiten una acabada comprensión de las tareas realizadas. Es importante no limitarse a estudiar los manuales de trabajo, sino lo que realmente sucede en el lugar de trabajo.

Los trabajadores a menudo realizan una variedad de tareas, por lo cual no es fácil determinar todas las actividades que se realizan durante la jornada laboral. Para efectos de este protocolo, es necesario identificar las tareas relacionadas con el levantamiento o descenso de carga así como las tareas de empuje y arrastre, para proceder a su evaluación. Debido a que este levantamiento de información puede involucrar un tiempo considerable, siempre que sea posible, dicho reconocimiento se debe realizar previo a la medición, en especial si se considera evaluar varios puestos de trabajo.

El reconocimiento debe generar la siguiente información:

a) Determinación de los puestos de trabajo susceptibles de ser evaluados. Para esto se deberán realizar observaciones de los puestos de trabajo, incluyendo entrevistas a los supervisores y trabajadores, determinando así, aquellas tareas susceptibles de evaluar.

b) Se recomiendan observaciones y el análisis continuo de las tareas seleccionadas por un periodo que resulte en el reconocimiento de los aspectos más críticos asociados al empuje y arrastre, detallando:

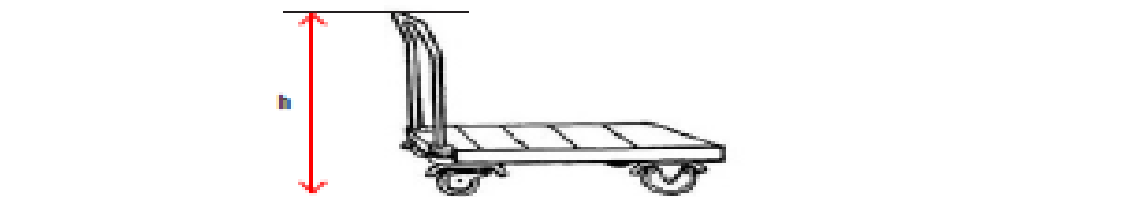
- Actividad o tarea que se realiza en el puesto de trabajo. En el caso que se realice más de una actividad o tarea, se deberá establecer claramente cada una de ellas.
- Número y sexo de los trabajadores que realizan la tarea determinada.
- Tiempo asociado a cada tarea, determinando la presencia de los ciclos de trabajo, y la variabilidad de la condición de empuje y arrastre de carga.
- La existencia de grupos similares de exposición, obteniéndose de esta forma una información representativa para todo un grupo, simplificando las mediciones.
- Las características generales del recinto donde se realiza la tarea (cerrado, abierto, estado y características de las superficies, etc.).

La "Guía Técnica para la Evaluación y Control de los Riesgos Asociados al Manejo o Manipulación Manual de Carga", del Ministerio del Trabajo y Previsión Social, posee una lista de chequeo, que facilita la identificación de los factores de riesgos.

7.4.2. Determinaciones Iniciales: Para tareas de empuje y arrastre, y determinación de fuerzas iniciales y de sustentación.

a) Determinar la altura del mango o asa.

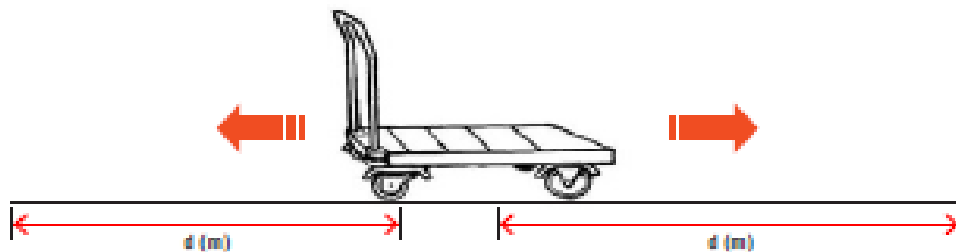
Fig. N° 5:
Altura del mango o tomada.



b) Determinar la distancia de empuje y arrastre.

Fig. N° 6:

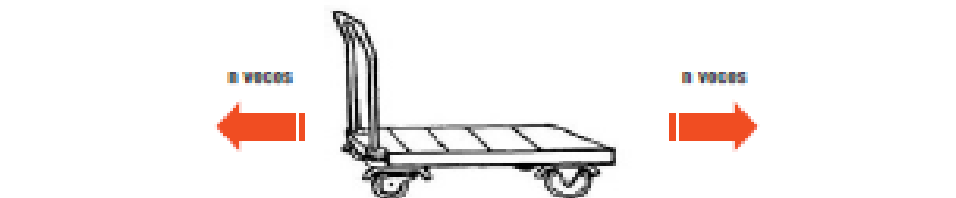
Distancia del recorrido realizado.



c) Determinar la frecuencia de las tareas realizadas.

Fig. N° 7:

Frecuencia de recorridos realizados.



d) Seleccionar un punto de medición.

Seleccionar la zona o punto de medición en el carro o en el mango, por ejemplo medir del punto medio del mango si este es horizontal (ver fig. N° 8), o bien, seleccionar una zona estable de una parte del carro que el evaluador crea que sea más eficiente en cuanto al empuje y arrastre (nunca desde la carga), además determine cuál apoyo ofrece la forma más fácil y más precisa para medir. Lo anterior dependerá de las características del mango y la superficie contra las que el dinamómetro se contactará.

La magnitud del empuje o fuerzas de arrastre debería ser el mismo, sin embargo es necesario tener en cuenta algunos factores de factibilidad y seguridad (por ejemplo cual es la opción que tiene el trabajador de elegir en cuanto a empuje o arrastre y evaluar razones de seguridad del traslado de la carga).

Existe una diversidad de tipos de carros, y el empuje y arrastre de carga es variada. Por lo que una correcta estrategia de medición debe tener en cuenta todas las posibilidades.

Si el mango es horizontal, localizar el punto de medición en el punto medio del mango. Ejemplo Fig. N° 8.

Fig. N° 8:

Punto medio de medición en mangos horizontales



Si el mango es vertical, debe localizar la zona habitual de empuje que utiliza la persona y también si es posible una zona sobre el chasis del carro, idealmente en una zona media entre los mango o asas (si existen). Se debe evitar deformidad de las zonas de apoyo del dinamómetro, si es necesario, se debe instalar una placa rígida sobre esa zona.

Consideraciones generales:

- Antes de proceder a la medición, es necesario explicar al trabajador en que consiste la medición, además se le debe pedir que haga la tarea tal como lo hace habitualmente, esto permitirá al evaluador percibirse y considerar los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el transcurso de la medición y determinar si el trabajador realiza la actividad empujando o arrastrando.
- Cargue la plataforma, carro o carretilla a mover, con el peso máximo que se manipula en condiciones habituales durante la jornada de trabajo, no sobrecargándolo permitiendo mantener su estabilidad, con el propósito que sea seguro para el trabajador u operador del equipo y aquellos que están alrededor de la carga, en ningún caso se realizará el procedimiento de medición, si parte de la carga se desliza o cae.
- Adopte las medidas y acciones para empujar o bien arrastrar desde el mango del carro. Recuerde que esta acción debe ser realizada primero por el mismo trabajador u operador (idealmente puede ser filmada para ser representada claramente durante la medición).
- Se recomienda que el trabajador esté presente en el lugar de trabajo para hacerle consultas específicas y si el trabajador puede aportar algún antecedente distinto que esté ocurriendo.
- Las mediciones realizadas con el dinamómetro convencional al cual se refiere este protocolo corresponde a la fuerza horizontal (F_x - F_y), la cual es aplicada en forma paralela al plano de la superficie de desplazamiento del carro.

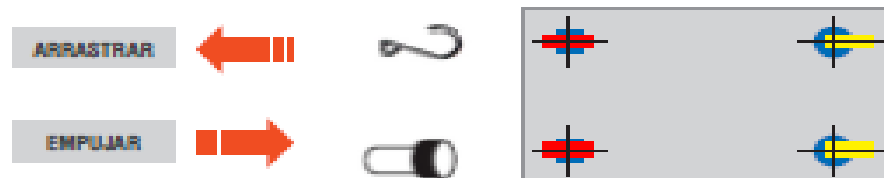
7.5.- Medición de fuerza inicial. (Para carros con ruedas)

Debe considerarse dos condiciones.

- En la primera condición se debe colocar las ruedas giratorias (si posee) de acuerdo con la dirección del movimiento del carro Fig. N° 9. En la medición de la fuerza inicial, leer y registrar la fuerza, cuando la plataforma, carretilla o carro empieza a moverse, lo cual habitualmente está representado por el "pick" de la fuerza realizada.

Fig. N° 9:

Condición con ruedas en la dirección del movimiento.

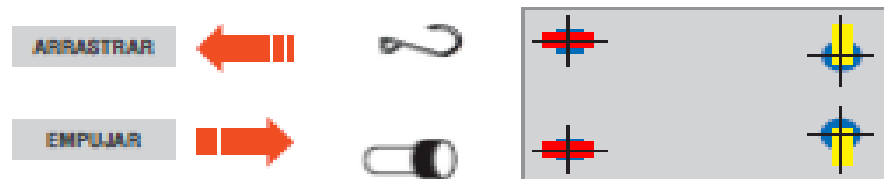


- En la segunda condición, coloque las ruedas giratorias en ángulo recto con la dirección del movimiento inicial Fig. N° 10. La fuerza de empuje debe enderezar la rueda para mover el carro. La condición del ángulo derecho producirá fuerzas superiores en comparación con el estado en línea.

Mantenga el medidor del dinamómetro firmemente en el mango o zona de empuje o arrastre del carro, asegurándose de que no se deslice o mueva. No de tirones, sacuda o mueva el medidor. Luego genere un movimiento del carro, y registre el "pick" de la fuerza realizada.

Fig. N° 10:

Condición con ruedas perpendiculares al movimiento



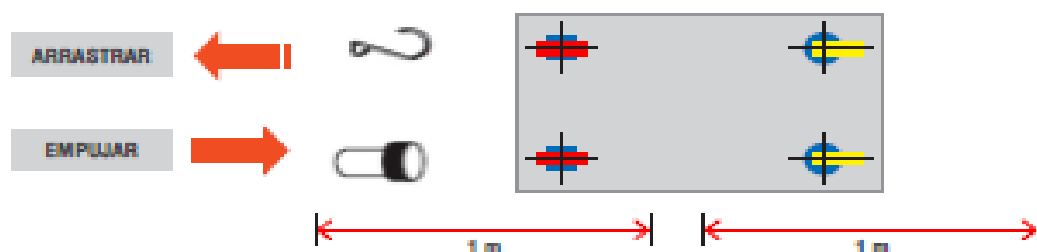
También es importante medir la fuerza ejercida por los trabajadores cuando arreglan primero la rueda giratoria, dando un rápido "tiron" lateral, antes de empujar o arrastrar, esa fuerza lateral inicial para enderezar las ruedas giratorias se puede medir y dejar registrada, al igual que la fuerza de empuje o arrastre inicial con las ruedas en ángulo recto, ya que generalmente suele ser mayor que esta última.

7.6.- Medición de fuerza de sustentación:

Fije el dinamómetro en el mango o asa o bien en el carro de la misma forma como se explica anteriormente en la medición de la fuerza inicial. Luego debe empujar o arrastrar al menos, 1 m en 3 s, (velocidad es igual a un paso lento). Lea y registre esa magnitud al cabo de los 3 seg.

Fig. N° 11:

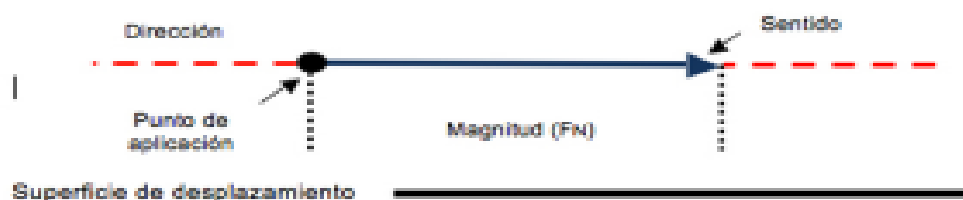
Medición fuerza sostenida.



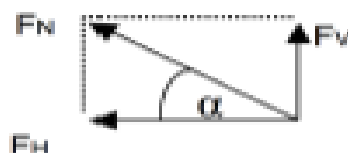
Para asegurar una consistencia de las mediciones realizadas en la fuerza sostenida, ya que generalmente resulta más compleja de obtener, se deben tomar 3 mediciones si estas son similares y en caso contrario se deben realizar 5 mediciones entre las cuales no deben variar en más de un 15%. Respetando lo anterior, se debe registrar el promedio de las mediciones para definir el resultado final de la magnitud de la fuerza de sustentación.

Algunas consideraciones que se debe tener en cuenta tanto para la medición de la fuerza inicial y la fuerza de sustentación, son:

- En los casos que exista la necesidad de realizar una detención del carro, que implique el desarrollo de una fuerza de frenado importante, se debe considerar evaluar esa fuerza, que se produce al momento de detenerlo o desacelerarlo. Ocasionalmente la magnitud de esta fuerza puede ser mayor que la fuerza inicial y la de sustentación. Lo que implica necesariamente medir, y registrar, para posteriormente adoptar las medidas correspondientes. Se debe seguir la misma consideración si existe un cambio brusco de dirección, con la consiguiente aplicación de fuerza adicional.
- Las mediciones realizadas con el dinamómetro convencional al cual se refiere este protocolo corresponde a la fuerza horizontal (FN-FH), la cual es aplicada en forma paralela al plano de la superficie de desplazamiento del carro.



- Al medir una fuerza se debe considerar que es una magnitud vectorial de la cual es necesario conocer su dirección, su sentido y su punto de aplicación, además de su magnitud (para nuestro caso es la medida por el dinamómetro). En las tareas de empuje y arrastre (cuando el sentido de la fuerza neta no es paralela al plano o superficie de desplazamiento), considerando que la fuerza resultante de la medición con el dinamómetro es una fuerza neta (FN), es necesario determinar la componente vectorial horizontal de la fuerza (FH) que se define como el coseno del ángulo de aplicación, por la fuerza neta medida. Esta componente de fuerza horizontal es la que se debe comparar con la fuerza límite permisible.
- Por lo tanto si se desea determinar las fuerzas vectoriales resultantes, es necesario conocer el ángulo del punto de aplicación de la fuerza con respecto a la horizontal (ángulo α), y luego aplicar el coseno de este ángulo, que luego se multiplica por el valor de la fuerza medida por el dinamómetro (magnitud); obteniéndose el valor de la fuerza horizontal (FH), como: $FH = FN \times \cos \alpha$.



- Para determinar las fuerzas con el dinamómetro, sobre estructuras sin ruedas, el procedimiento básicamente es el mismo.

7.7.- Medición de fuerzas realizadas sobre diferentes estructuras y objetos: Distintas a los carros industriales.

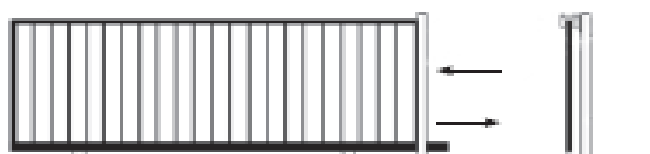
El dinamómetro también puede ser usado para determinación de la fuerza desarrollada por los trabajadores en situaciones distintas de las abordadas en los puntos anteriores.

Por ejemplo, en el sector salud, cuyos trabajadores emplean distintos dispositivos como la camilla, silla de ruedas y camos para el traslado de insumos; en el ámbito de la hotelería el desplazamiento de carros para la ropa, artículos de aseo y alimentos entre otros; y así se pueden observar varias tipo de carros en el mismo sector industrial. También se puede medir la fuerza realizada al empujar una puerta o portón corredizo ya sea que cuente con ruedas o bien que cuente con un carril deslizante, siendo una situación habitual y sujeta a la realización de fuerzas importantes por trabajadores y trabajadoras.

Fig. N° 12:

Objetos y estructuras en las que se puede medir las fuerzas de empuje y arrastre.

Portón, rejas y barreras.



Las tareas de empuje y arrastre sobre estructuras corredizas, ya sea que incorporen ruedas o no, son actividades rutinarias en muchos lugares de trabajo.

Distintos tipos de carros.



El uso de carros en la industria en general es variado, como los utilizados en hotelería, industrias alimenticias, traslado de productos congelados, etc.

Sillas de ruedas.



El uso de sillas de ruedas y camillas en el sector hospitalario y de salud en general, es una de las actividades que implica mayor sobrecarga física a los trabajadores del sector.

7.8.- Medición de la magnitud de cargas

El dinamómetro también puede ser usado para determinación del peso de **objetos** lo que permite enterarse en terreno sobre el peso de los objetos que se manipulan.

Es posible su utilización en la determinación de pesos desconocidos, o bien para corroborar en caso de dudas o a consideración profesional. Estos objetos no deberían ser tan pesados como para dificultar la medición, producto de la fuerza a realizar por el evaluador o bien contar con los medios de sujeción en el mismo objeto o con un medio de sujeción para fijar al dinamómetro.

Por otra parte se debe procurar que el **objeto** a medir no debe tener contacto con otras estructuras, además de tener muy en cuenta su centro de gravedad, para estabilizar la carga mientras se está midiendo, permitiendo que la lectura se estabilice.

Esta maniobra se debe realizar en la modalidad de fuerza sostenida, permitiendo que la lectura se estabilice.

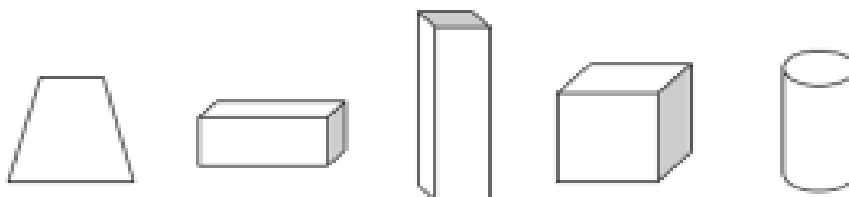
Fig. N° 13:

Distintos accesorios que permiten un agarre del objeto.



Fig. N° 14:

Ejemplos de formas de objetos que pueden ser levantados. (Generalmente livianos).



La carga debe estar bien fijada al dinamómetro, evitando que esta se suelte y caiga. Para ello se suele utilizar algún tipo de amarré o correa que permita enlazar firmemente el objeto. En general necesitará ayuda para realizar esta prueba especialmente al manipular el objeto, evitando que el mismo evaluador pueda lesionarse por un sobreesfuerzo.

7.9.- Interpretación de resultados.

La magnitud de la fuerza encontrada tanto en la fuerza inicial como en la de sustentación, permiten establecer entre otras cosas lo siguiente:

- Permitir ser contrastadas con la percepción del esfuerzo realizado por parte de los trabajadores y evitar que utilicen fuerzas por sobre sus capacidades.
- Permitir hacer uso de tablas conocidas y también establecidas en la "Guía técnica de identificación, evaluación y control, de MMC, del Ministerio del Trabajo y Previsión Social, específicamente las tablas de Snook, (método Liberty Mutual para evaluar tareas de empuje y arrastre). Estas permiten determinar luego de conocida la magnitud de la fuerza y proceder a aplicar el método, responder a la interrogante si las fuerzas superan o no lo recomendado, considerando también otras variables.
- Contrastar las fuerzas realizadas en forma habitual, con los distintos tipos de agarre y postura, haciendo que la persona realice un esfuerzo menor al cambiar la estrategia de la tomada o adoptando las medidas necesarias para tal efecto.
- Determinar si la magnitud de las fuerzas realizadas, superan lo establecido en el marco legal, por lo tanto determinar el cumplimiento o incumplimiento en este ámbito.
- Permitir corroborar que las medidas implementadas han sido exitosas al disminuir los esfuerzos realizados por los trabajadores.
- Al determinar la altura del mango o asa se puede definir la altura desde la cual se realiza el menor esfuerzo posible, por ejemplo si es necesario cambiarlas en cuanto a altitud las asas horizontales o bien privilegiar asas verticales.
- Al determinar la distancia de empuje y arrastre, permite por ejemplo hacer cambios en la organización de la tarea y del proceso en general.
- Al determinar la frecuencia de las tareas realizadas, permite redistribuir las cargas en caso de ser muy frecuentes, favorecer la rotación de funciones y mejorar el sistema de transporte y ayuda mecánica.

La determinación de la altura del mango o asa, la distancia de empuje y arrastre y la frecuencia de las tareas realizadas, también son insumo para utilizar las tablas de empuje y arrastre (tablas de Snook), junto a otras variables incluidas en el método de la Liberty Mutual. Estas tablas entregan los valores límites correspondientes a la fuerza inicial y fuerza de sustentación.

7.10. Contenidos del Informe de evaluación.

La medición con Dinamómetro, tiene por objetivo determinar específicamente la magnitud de las fuerzas realizadas, sin embargo en general complementa con una evaluación integral que considera aspectos relacionados a la condiciones de trabajo y la organización de este, por lo tanto en la mayoría de los casos dicho informe deberá incorporar:

- Antecedentes de la empresa evaluada.
- Descripción de las actividades y/o puestos de trabajo involucrados (ciclos).
- Instrumental utilizado.
- Planificación y metodología de las mediciones.
- Resultados de las mediciones.
- Análisis de los resultados.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Identificación de la persona que realizó las mediciones y la evaluación.

El Instituto de Salud Pública de Chile, a través de su Departamento Salud Ocupacional, publicó en el año 2012, la *"Guía de Criterios para la Elaboración de Informes Técnicos de Evaluación de Puestos de Trabajo Relacionados a los Factores de Riesgo de los Trastornos Músculo Esqueléticos"*, la cual puede ser consultada para efectos de apoyo en la elaboración de los informes técnicos de evaluación de puestos de trabajo.

Disponible en: http://www.ispch.cl/saludocupacional/material_referencia

8.- BIBLIOGRAFIA.

- Chaffin, D. and Anderson G. (2006), Occupational Biomechanics. Fourth Edition.
- Pinto R., Córdova V., Quiceno L., Llambías J. Ecuaciones de empuje y arrastre ACHS: Relación entre el peso de una carga y la fuerza humana necesaria para moverla, Revista Ciencia y Trabajo.
- Decreto Supremo Nº 63, Reglamento para la Aplicación de la Ley Nº 20.001, que regula el peso máximo de carga humana.
- Guía técnica para la evaluación y control de los riesgos asociados al manejo o manipulación manual de carga. Ministerio del trabajo y previsión social, Subsecretaría de Previsión Social.
- Guía de Criterios para la Elaboración de Informes Técnicos de Evaluación de Puestos de Trabajo, Relacionados a los Factores de Riesgo de los Trastornos Músculo Esqueléticos", del Instituto de Salud Pública de Chile. http://www.ispch.cl/saludocupacional/material_referencia.
- Ley Nº 20.001, que regula el peso máximo de carga humana en Chile.
- Manual Básico sobre mediciones y toma de muestras ambientales y biológicas en Salud Ocupacional, Instituto de Salud Pública de Chile. Tercera Edición Actualizada 2013.
- Norma ISO 11228-1-2007: Ergonomía - Manejo Manual Parte 1, levantamiento.
- Norma ISO 11228-2-2007: Ergonomía - Manejo manual Parte 2, empuje y arrastre.-Enfoque propuesto para la medición de fuerzas de empuje y arrastre.

INGENIERIA MECANICA

Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento

Study of the Altitude Effect on Internal Combustion Engine Operation. Part 1: Performance

Magín Lapuerta (1), Octavio Armas (1), John R. Agudelo (2) y Carlos A. Sánchez (2)

(1) Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales,

Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real-España (e-mail: magin.lapuerta@uclm.es)

(2) Universidad de Antioquia, Grupo GASURE, Calle 67 N°. 53-108, A.A. 1226, Medellín-Colombia

Resumen

En este trabajo se estudia el efecto de la altitud sobre la potencia en motores de aspiración natural y turbosobrealimentados sin sistemas correctores, en función de la presión ambiental. La altitud sobre el nivel del mar tiene un notable efecto sobre la densidad del aire y su composición. Dado que los motores de combustión interna tienen sistemas de admisión y de inyección de combustible volumétricos, la altitud modifica el ciclo termodinámico de operación, y en consecuencia las prestaciones, así como las condiciones locales de combustión, y por tanto la formación de contaminantes. Se ha obtenido una expresión que permite calcular el incremento de relación de compresión del turbogrupo, necesario para evitar cualquier pérdida de potencia al aumentar la altitud.

Palabras claves: *motores de combustión, efecto de altitud, funcionamiento de motores, potencia*

Abstract

The present study shows the effect of altitude on the performance of both naturally aspirated and turbocharged internal combustion engines without corrective systems, as a function of pressure in the environment. Altitude above sea level has a notable effect on the density of air and its composition. Given that internal combustion engines have volumetric-based fuel systems, altitude can modify their thermodynamic cycle of operation, and consequently their performance, local combustion conditions, and formation of pollutants. An expression has been obtained which allows calculation of the increase of the compression ratio of the turbogroup required to avoid power loss with increase in altitude.

Keywords: *combustion engines, altitude effects, engine performance, power*

INTRODUCCIÓN

La disminución de la presión y la temperatura atmosférica afecta a la densidad del aire y su composición, y en consecuencia, a las prestaciones de toda máquina térmica. Este problema es más acentuado en máquinas térmicas de desplazamiento volumétrico como los motores de combustión interna alternativos, y dentro de ellos, aún más en los de aspiración natural.

El rendimiento indicado disminuye con la altitud debido principalmente a que la presión en el cilindro es menor a lo largo de todo el ciclo del motor, si bien otros efectos relacionados con la incorporación del combustible también influyen. Todo ello provoca una pérdida de potencia indicada. Aunque la potencia de pérdidas mecánicas se reduce ligeramente con la altitud debido a que la potencia de pérdidas de bombeo y la de rozamiento se reducen por la

disminución de la contrapresión de escape y de presión en el cilindro respectivamente, esta disminución es mucho menos significativa que la de la potencia indicada. Por ello, algunos autores suponen el cambio en la potencia de pérdidas mecánicas como un porcentaje constante de la variación de la potencia indicada a medida que cambia la altitud (Xiaoping *et al.*, 1996), mientras que otros directamente la desprecian (SAE J1349, 1995; Heywood, 1988), suponiendo idéntica disminución para la potencia indicada y para la efectiva. Esta última suposición implica que el peso de las pérdidas mecánicas crezca frente a una potencia indicada que disminuye y que por lo tanto la pérdida relativa de potencia efectiva sea incluso mayor que la indicada y creciente al disminuir el rendimiento mecánico del motor.

Lizhong *et al.* (1995) realizaron ensayos en un motor diesel de inyección directa, aspiración natural, de 3.3 litros de cilindrada total y cuatro cilindros. Dejando constante el dosado relativo, obtuvieron una disminución del 24% en la potencia efectiva y un incremento del consumo específico de combustible cercano al 4% al operar a 2000 msnm (metros sobre el nivel del mar). Adicionalmente estudiaron el efecto que tenía dejar constante el consumo de combustible de máxima economía (consumo específico de combustible mínimo), obteniendo con el mismo motor, una disminución en la potencia efectiva en torno al 16% y un incremento en el consumo específico de combustible mínimo en torno al 6% al operar a la misma altura (2000 msnm).

Xiaoping *et al.*, (1996) desarrollaron un modelo para predecir el efecto de la presión y la temperatura ambiente sobre motores diesel turboalimentados (TC). Manteniendo constantes el régimen de giro del motor, la masa de combustible inyectado y la temperatura ambiente, obtuvieron una disminución en la potencia efectiva cercana al 4% al pasar de 0 a 3000 msnm. El efecto de la temperatura lo obtuvieron dejando constantes el régimen de giro, la masa de combustible inyectado y la altura sobre el nivel del mar. Al disminuir la temperatura ambiente de 20 a -15°C observaron un aumento de la potencia efectiva en torno al 7%. La compensación de potencia proporcionada por el turbogruppo se debió al incremento del dosado relativo y por tanto de la temperatura de escape, y a la disminución de la contrapresión de escape al aumentar la altitud.

En motores de encendido provocado con lazo de control cerrado, el requerimiento de dosado estequiométrico obliga a la unidad de control electrónico del motor a inyectar menor cantidad de combustible a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar (menor disponibilidad de aire atmosférico). La menor temperatura exterior obliga a avanzar el ángulo de encendido ya que disminuye la velocidad de combustión. Olin y Maloney (1999) desarrollaron un algoritmo de cálculo basado en las ecuaciones de flujo a través de válvulas, que permite corregir los parámetros de la unidad de control electrónico en función de la presión barométrica.

Con el fin de establecer una base de comparación común es necesario aplicar factores de corrección para convertir la potencia en el terreno a potencia en condiciones estándar y viceversa. Esta corrección suele ser del tipo:

$$\frac{N_i}{N_{i0}} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^a \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^b \quad (1)$$

donde N_i , p y T son la potencia indicada, presión y temperatura del lugar de operación respectivamente, el subíndice 0 indica condiciones de referencia (normalmente 0 msnm).

La corrección por humedad se suele incorporar en el término de presión, restando de ésta la presión del vapor de agua atmosférico. En este trabajo no se aborda dicho efecto, que con diferencia influye menos sobre las prestaciones del motor que la presión y temperatura (Soares y Sodré, 2002).

Los valores de los exponentes a y b varían según el tipo de motor y las condiciones de operación. Éstos no provienen de un análisis teórico de las ecuaciones, sino que obedecen a un ajuste experimental para correlacionar el tipo de motor y las condiciones atmosféricas. El exponente a suele tomar el valor de la unidad para motores diesel y de encendido provocado (MEP) de aspiración natural, tanto de aplicación estacionaria como de automoción. La norma ISO 1585 (1992) adoptada también por la sociedad de normas

técnicas de Brasil (Sodré y Soares, 2003) recomienda para MEP de automoción un valor de $a=1.2$ y resta de la presión atmosférica la del vapor de agua.

El exponente b suele variar entre -0.5 y -1 para motores de aspiración natural independientemente del tipo de aplicación, estacionaria o automoción, mientras que para motores sobrealimentados suele tomar valores mayores que la unidad. La norma ISO 3046-1 (1995) recomienda usar $b = -0.75$ para motores diesel de aspiración natural de aplicaciones estacionarias, mientras que la norma SAE J816b (1979) recomienda valores de $b = -0.7$ para el mismo tipo de motor. Ambas normas coinciden en recomendar valores de $a=1$ y $b=-0.5$ para MEP de aspiración natural que usan combustibles líquidos.

Para MEP de automoción la norma DIN 70020 (1986) recomienda $a=1$ y $b=-0.5$ con condiciones atmosféricas de referencia de $p_0=1.01325$ bar y $T_0=293$ K. La norma SAE J 1349 (1995) recomienda $a=1$ y $b=-0.5$, pero resta de la presión la del vapor de agua en la atmósfera, siendo las condiciones de referencia $p_0=0.99$ bar, $T_0=302.4$ K y $p_{0v}=0.013$ bar. Este factor de corrección se recomienda para un rango de presiones entre 0.95 y 1.01 bar y entre 288.5 y 316.3 K. La norma japonesa JIS D 1001 (Sodré y Soares, 2003), es similar a la norma SAE J1349 (1995), sólo que el valor de b es -0.75 y las condiciones de referencia son $p_0=1.01325$ bar, $T_0=293$ K. La norma ISO 1585 (Sodré y Soares, 2003) recomienda valores de $b=-0.6$, siendo las condiciones de referencia $p_0=1$ bar, $T_0=298$ K y $p_{0v}=0.01$ bar. Este factor de corrección se recomienda para un rango de presiones entre 0.8 y 1 bar y un rango de temperaturas entre 288 y 308 K.

En la práctica, los valores más usados en la literatura para motores de aspiración natural son $a=1$ y $b=-0.5$, que Heywood (1988) justifica por la dependencia directa entre la potencia y el gasto admitido, el cual depende del producto $P_{adm} \cdot T_{adm}^{-0.5}$. Existen, sin embargo, algunos autores que limitan la validez de esta correlación. Por ejemplo, Harari y Sher (1993) encontraron que los valores antes mencionados aplicados a motores de encendido provocado (MEP) de dos tiempos, solo tienen validez a regímenes de giro inferiores a 6000 rpm y presiones atmosféricas desde 70 kPa. Para regímenes de giro mayores a 6000 rpm, propusieron factores de corrección $a=2$ y $b=-0.8$ y cuya validez se extiende hasta los 44 kPa.

En Varela, (2001) se define la altura de restablecimiento del compresor para motores turbosobrealimentados de aviación como aquella a la cual el compresor está siendo utilizado a su capacidad máxima, con la misión de mantener la densidad igual a la de referencia, y por lo tanto la potencia desarrollada. Para lograr esto último es necesario mantener el gasto de aire independiente de las condiciones a la salida del compresor ($p_{adm,0}$ y $T_{adm,0}$), lo que hace necesario mantener la relación $P_{adm} \cdot T_{adm}^{-0.5}$ constante, justificación que coincide con la propuesta por Heywood (1988). Relacionando este término con los datos de presión y temperatura de remanso de la toma dinámica y la velocidad de vuelo de diseño de la aeronave, existen métodos para determinar la relación de compresión en el compresor necesaria para recuperar el gasto másico de admisión, y por tanto la potencia del motor.

Human et al. (1990) simularon el efecto de la altura (1800 msnm) en un sistema de muestreo a volumen constante (CVS) generando depresiones y contrapresiones en los colectores de admisión y escape. En un motor Caterpillar 3208 de aspiración natural, V-8, 10.4 litros de cilindrada, obtuvieron una disminución del par a plena carga (12%) al aumentar la altura, la cual fue aproximadamente constante en todo el rango de regímenes de giro del motor. En un motor Cummins NTCC-350 turboalimentado, 6 cilindros en línea, de 14 litros de cilindrada total, obtuvieron una disminución del par a plena carga entre 15 y 30% a velocidades inferiores a 1200 rpm (régimen de par máximo). A partir de este régimen de giro no se apreció diferencia al variar la altura, mostrando la importancia del turboalimentador. Chaffin y Ullman (1994) emplearon la misma instalación anterior para estudiar los efectos sobre las emisiones y las prestaciones en un motor Detroit Diesel serie 60, de 11.1 litros de cilindrada, 6 cilindros en línea, turboalimentado, postenfriado, que utilizaba un sistema de control electrónico con corrección por presión barométrica (DDEC II) operando a la altura de Ciudad de México (2160 msnm). En la prueba transitoria obtuvieron una disminución en el trabajo (kWh) en torno al 6.5%, y un incremento en el consumo específico de combustible en torno a 1.5% con respecto a 245 msnm. En la prueba estacionaria a plena carga midieron disminuciones en la potencia inferiores al 2% a 1200, 1500 y 1800 rpm, lo que mostró la importancia del turbocompresor y del control electrónico. Graboski y McCormick (1997) y McCormick *et al.* (1999) obtuvieron tendencias semejantes a 1600 msnm en un motor Cummins B5.9G de gas natural de quemado pobre

con control de lazo cerrado y turboalimentado. El par efectivo a plena carga disminuyó en torno a 20% a regímenes de giro inferiores a 1600 rpm, y a partir de este régimen, no se apreció diferencia al variar la altura sobre el nivel del mar.

En vista de lo anterior, los fabricantes de motores han desarrollado diversos métodos para compensar el efecto de la altitud en sus motores, tales como la implementación de la turboalimentación o el uso de sensores barométricos que retroalimentan a la unidad de control electrónico para que actúe corrigiendo los parámetros de la inyección de combustible. Se han implementado algunos métodos de corrección por presión barométrica que no requieren el uso de sensores adicionales. Estos utilizan algoritmos de cálculo basados en las ecuaciones de flujo compresible a través de una restricción. Las entradas al algoritmo se obtienen de los sensores existentes en el motor (Olin y Maloney, 1999).

En este artículo se cuantifican algunos de estos efectos; y se hace una estimación del efecto de la altitud sobre las prestaciones de motores de aspiración natural y turboalimentados sin sistemas correctores en función de la presión ambiental.

PLANTEAMIENTO

La altitud sobre el nivel del mar, z , tiene un importante efecto sobre las condiciones en las que se encuentra el aire y sobre su composición. Además de las variaciones de temperatura propias de las distintas capas de la atmósfera, la presión del aire disminuye a medida que crece la altitud del punto de medida, debido a la reducción del peso de la columna que soporta por encima, reducción que se debe tanto a la menor altura de la columna como a la menor densidad, ρ , del aire que la ocupa. Más concretamente, la variación de la presión a lo largo de un elemento diferencial de altura es debida al peso del aire que ocupa ese elemento por unidad de sección, es decir:

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho \quad (2)$$

Este doble efecto de la disminución de la presión y de la densidad no es la única consecuencia de la altitud que pueda afectar al desarrollo de actividades humanas. Además,

debido al diferente peso molecular de los componentes del aire, éste varía también su composición. En un elemento diferencial de volumen, este cambio de composición es causado por la variación de la presión parcial de cada componente i , generada como consecuencia de su diferencia de peso con respecto al de la mezcla de gases. Siendo n_i el número de moles y PM_i el peso molecular del componente i :

$$\frac{dp_i}{dz} = -g \frac{dn_i (PM_i - PM_a)}{dV} \quad (3)$$

No es objeto de la psicrometría estudiar las condiciones del aire más allá de la troposfera, pero sí conviene al menos conocer qué ocurre en el espesor atmosférico en el que puede existir población humana. Para ello, es necesario aceptar algunas hipótesis en relación a las siguientes cuestiones:

Comportamiento termodinámico del aire

La hipótesis más habitual en psicrometría es suponer comportamiento de gas ideal, ya que el factor de compresibilidad del aire, cuando la presión es inferior a 1 atm y la temperatura rara vez sobrepasa los límites $[-20, 50]$ °C, es muy próximo a la unidad, y por tanto, el error cometido al considerarlo como gas perfecto es muy pequeño. Expresada en función de la densidad, ρ , la ecuación de estado del gas ideal (siendo R_a la constante másica del aire):

$$p = \rho R_a T \quad (4)$$

Perfil térmico de la columna de aire

La hipótesis más sencilla consiste en suponer que la temperatura es uniforme al variar la altitud (columna isoterma). Sin embargo, esta hipótesis puede no ser muy precisa ya que es conocida la reducción de temperatura del aire con la altitud a lo largo del espesor de la troposfera (algo más de 10 km). Esta reducción puede manifestarse, bien suponiendo una tasa de enfriamiento constante (puede tomarse, por ejemplo, 6.5 K/km, o bien un perfil triangular con una temperatura constante de -55°C a 11000 m de altitud (Conan, 1990). En cualquier caso, en el rango de altitud habitable, la gran cantidad de factores que pueden

influir sobre la temperatura del aire hace muy difícil disponer de hipótesis adecuadas. Debe tenerse presente, por tanto, que las expresiones que siguen permiten sólo obtener valores orientativos, y que las variaciones locales de temperatura pueden corregir dichos valores.

Suponiendo comportamiento del aire como gas ideal, las variaciones de la presión con la altitud (ecuación 2) y de la fracción molar del componente i (X_i) con la altitud (ecuación 3) se transforman en las siguientes ecuaciones, la primera de las cuales es conocida como ecuación hidrostática:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R_a T} dz \quad (5)$$

$$\frac{dX_i}{X_i} = -\frac{g}{RT} (PM_i - PM_a) dz \quad (6)$$

Siendo R la constante universal de los gases, y R_a la específica del aire. Si se supone un perfil isoterma de la columna de aire, la integración de estas ecuaciones desde la altitud del nivel del mar (subíndice 0) hasta una altura genérica conduce a sendas leyes exponenciales:

$$p = p_0 e^{-\frac{gz}{R_a T}} \quad (7)$$

$$X_i = X_{i0} e^{-\frac{gz}{RT} (PM_i - PM_a)} \quad (8)$$

Mientras que si se supone un perfil triangular $dT = Kdz$, la integración de las anteriores ecuaciones diferenciales da como resultado leyes de tipo potencial:

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{R_a K}} \quad (9)$$

$$X_i = X_{i0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{g}{RK} (PM_i - PM_a)} \quad (10)$$

Los resultados de presión ambiental obtenidos con ambas hipótesis se representan en la [Fig. 1](#) para valores de altitud en el rango habitable. Las líneas continuas representan la columna

isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C de abajo hacia arriba respectivamente. Al igual que en las siguientes figuras, los resultados obtenidos bajo la hipótesis de columna isoterma corresponden a diversos valores de la temperatura de ésta, mientras que los obtenidos con columna triangular corresponden a una temperatura de 20°C a cota cero con vértice en – 55°C a cota 11000 m.

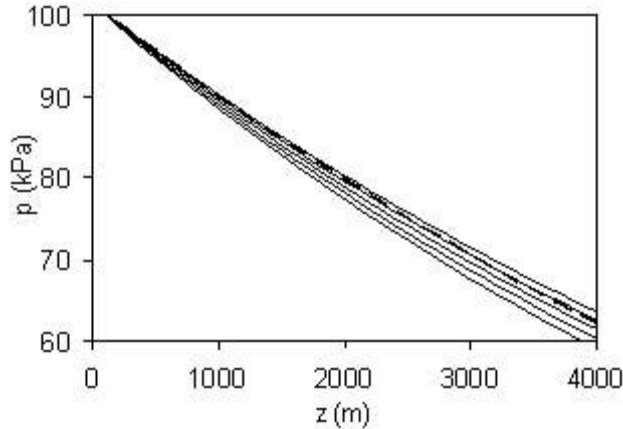


Fig. 1: Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica. Columna isoterma ($\frac{3}{4}$) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^{\circ}\text{C}$

En esta figura se aprecia un efecto más notable al variar la presión con la altitud que al variar la temperatura, lo que se corresponde con los resultados experimentales de Soares y Sodré, (2002).

En concreto, la fracción molar de oxígeno en el aire disminuye con la altitud, al ser el oxígeno ($PM_{O_2}=32 \text{ kg/kmol}$) más pesado que el aire ($PM_a<29 \text{ kg/kmol}$), tal y como se observa en la [Fig. 2](#), al aplicar las dos hipótesis de perfil térmico planteadas. Las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C de abajo hacia arriba respectivamente. De otro lado, la fracción molar del nitrógeno aumenta ligeramente al ser algo más ligero que el aire. La compensación de estos dos efectos hace que las variaciones del peso molecular del aire seco sean muy pequeñas.

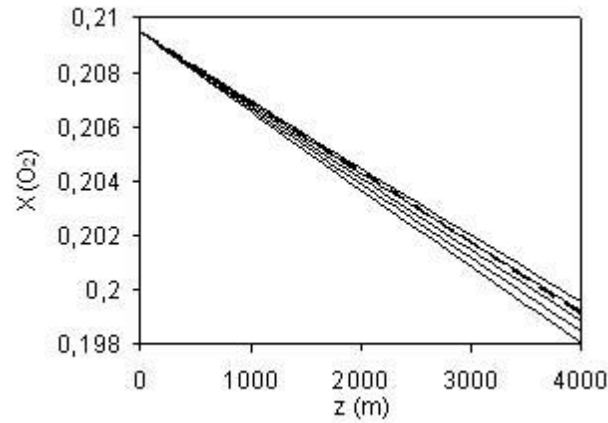


Fig. 2: Efecto de la altitud sobre la fracción molar de oxígeno. Columna isoterma (3/4) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^\circ\text{C}$

La concentración másica de oxígeno en el aire (C_{O_2}) disminuye con la altitud, tanto porque se reduce su fracción molar en el aire como porque cae la densidad de éste. En efecto:

$$C_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{V} = \frac{X_{O_2} p}{R_{O_2} T} \quad (11)$$

Sustituyendo en esta fórmula las expresiones, obtenidas con la hipótesis de columna isoterma, de la variación de la presión y la fracción molar de oxígeno, ecuaciones (7) y (8) respectivamente; y escribiendo el resultado en función de la concentración de oxígeno a cota cero:

$$C_{O_2} = C_{O_2 0} e^{-\frac{gz}{R_{O_2} T}} \quad (12)$$

y haciendo lo propio a partir de las expresiones obtenidas con la hipótesis de columna triangular, ecuación (9) y ecuación (10):

$$C_{O_2} = C_{O_2 0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\left(\frac{g}{R_{O_2} K} + 1 \right)} \quad (13)$$

La [Fig. 3](#) muestra que a medida que la altitud aumenta la concentración de oxígeno disminuye, cualquiera que sea la temperatura ambiental. En la figura las líneas continuas representan la columna isoterma a -20, -10, 0, 10 y 20°C respectivamente de arriba hacia abajo. La reducción en la concentración de oxígeno es menos pronunciada al aplicar la hipótesis de columna triangular.

En cualquier caso, de los dos efectos que contribuyen a la disminución de la concentración de oxígeno con la altitud, el más importante es, con diferencia, el efecto de la presión. Pero además, es necesario indicar que los cambios de fracción molar (consecuencia de un proceso de difusión molecular) son normalmente inapreciables, debido a la preponderancia de los movimientos convectivos macroscópicos que desplazan los gases verticalmente (Wayne, 2000).

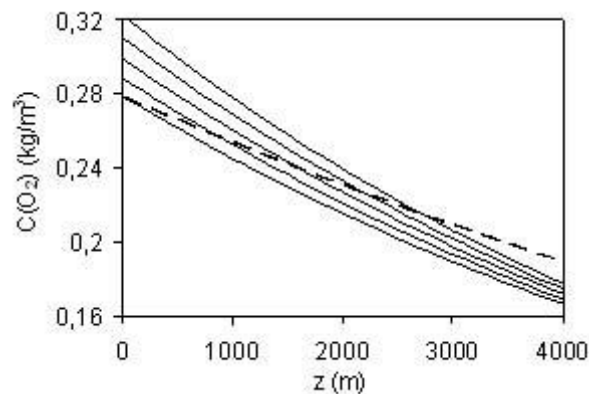


Fig. 3: Efecto de la altitud sobre la concentración de oxígeno. Columna isoterma ($\frac{3}{4}$) y columna triangular (---) con $T_{(z=0)} = 20^{\circ}\text{C}$

Los efectos mostrados sobre la presión, temperatura, fracción molar de oxígeno y su concentración, pueden a su vez tener distinta influencia sobre las prestaciones del motor, sobre el proceso de combustión y sobre las emisiones contaminantes. En este trabajo solo

se presentan las conclusiones más relevantes sobre las prestaciones del motor, dejándose para un trabajo posterior el estudio de los efectos sobre la combustión y las emisiones.

EFFECTO SOBRE LAS PRESTACIONES

Las prestaciones máximas de cualquier motor alternativo vienen limitadas por la capacidad de renovar la masa de aire en el cilindro, que para una configuración determinada (cilindrada, sección de entrada en válvulas y geometría de colectores, etc.), se expresa por medio del rendimiento volumétrico (h_v). Para cuantificar el efecto de la altitud sobre estas variables en motores de aspiración natural puede hacerse uso de la ecuación (1) para la potencia indicada y de la ecuación (14) para h_v (Heywood, 1988), (Harari y Sher, 1993), (Soares y Sodré, 2002):

$$\frac{\eta_v}{\eta_{v0}} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^b \quad (14)$$

Tomando $b=-0.5$ en la ecuación (1) y haciendo uso de la hipótesis de columna triangular (partiendo de 20°C a $z=0$ msnm), se obtienen los efectos mostrados en la [Fig. 4](#).

Por otra parte la norma ISO 3046-1 (1995) recomienda el uso de la ecuación (15) para ajustar la potencia efectiva de motores estacionarios por variación en las condiciones ambientales. En esta ecuación, el factor de corrección de la potencia indicada, se ajusta con el rendimiento mecánico:

$$\frac{N_e}{N_{e0}} = \frac{N_i}{N_{i0}} - 0.7 \left(1 - \frac{N_i}{N_{i0}} \right) \left(\frac{1}{\eta_m} - 1 \right) \quad (15)$$

donde N_e es la potencia efectiva, η_m es el rendimiento mecánico del motor; y para el cálculo de relación de potencias indicadas se propone, si se desprecia el efecto de la humedad del ambiente y de la temperatura del refrigerante del aire de admisión, la misma ecuación (1), donde los exponentes a y b toman diferentes valores en función del tipo de motor y de las condiciones de operación. Para motores diesel de aspiración natural cuya potencia estaría limitada por insuficiente exceso de aire, $a=1$ y $b=-0.75$; mientras que para motores diesel

cuatro tiempos, turboalimentados, sin interenfriador (*intercooler*), de media o baja velocidad recomienda $a=1$ y $b=-2$, independientemente del grado de sobrealimentación del motor. La ecuación (15) es igual a la ecuación (1) cuando no se considera el efecto del rendimiento mecánico ($h_m=1$).

Al representarla gráficamente ([Fig. 4](#)) se observa, tal y como se ha mencionado, que al disminuir el rendimiento mecánico del motor, las pérdidas de potencia efectiva se acentúan con respecto de las de potencia indicada. Las líneas representan los casos de $h_m = 1, 0.95, 0.9, 0.85$ y 0.8 de arriba hacia abajo respectivamente.

Además, esta disminución de la potencia con la altura es aproximadamente constante en todo el rango de regímenes de giro del motor, por lo que puede extenderse también al par (Human et al., 1990), (Lizhong *et al.*, 1995).

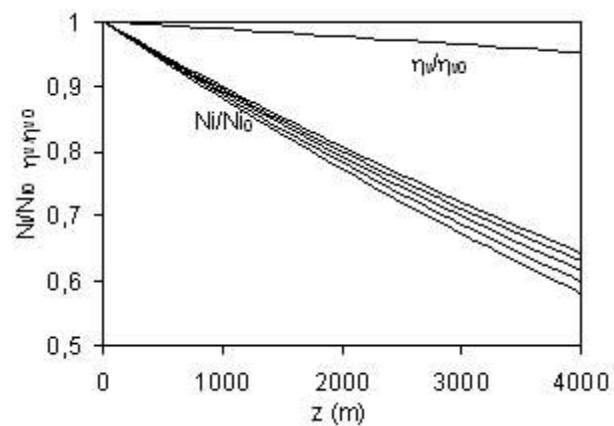


Fig. 4: Efecto de la altitud sobre el rendimiento volumétrico (h_v/h_{v0}) y la potencia efectiva máxima (N_i/N_{i0}) de un motor de aspiración natural suponiendo columna triangular

En los motores diesel turboalimentados, el efecto de la altitud sobre la potencia no puede obtenerse como una superposición de los efectos sobre el turbocompresor y sobre el motor alternativo, puesto que ambas máquinas están interrelacionadas. De hecho, el gasto de aire

(\dot{m}_a) que el compresor es capaz de trasegar suele corregirse por medio de la siguiente ecuación (similar a la corrección de potencia de un motor de aspiración natural):

$$\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a0}} = \frac{p}{p_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-0.5} \quad (16)$$

Un motor con determinado turbogruppo regulado para que entregue la cantidad de aire necesaria en el punto de máximo par, al nivel del mar tendría un comportamiento, en el mapa par efectivo – régimen ($M-n$), similar al representado en la [Fig. 5a](#).

En línea continua se ha representado el par máximo en función del régimen de giro que el motor es capaz de entregar a nivel del mar. Al trabajar en altitud, existe una zona a bajo régimen de giro en la que el turbogruppo no tiene efecto positivo sobre el gasto de aire que llega al motor, de manera que éste no es capaz de entregar el par exigido a nivel del mar. A partir de un determinado régimen, la sobrealimentación anula el defecto de aire provocado por la altitud, de manera que no sólo se compensa dicho efecto, sino que el turbo podría llegar a introducir más aire en el motor y con ello lograr más par efectivo.

Para compensar el efecto de falta de aire por la altitud en todo el rango de regímenes, los motores suelen equiparse con un turbogruppo capaz de compensar dicho efecto a cualquier régimen de giro, incorporando para la Zona de Regulación sistemas de control como válvula de control de flujo (*waste-gate*), turbina de geometría variable (TGV), etc. ([Fig. 5b](#)).

Puede suponerse que el motor sobrealimentado se comporta como un motor de aspiración natural sometido a la presión y temperatura de admisión (después del compresor). Denominando p_{adm} y T_{adm} a la presión y temperatura de la admisión y adoptando las expresiones propuestas por Heywood (1988) para motores de aspiración natural, la expresión queda:

$$\left(\frac{N_i}{N_{i0}} \right)_{r.c.} = \frac{p_{adm}}{p_{adm,0}} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,0}} \right)^{-0.5} \quad (17)$$

$$= \frac{p_{adm}}{p} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{p_0}{p_{adm,0}} \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{T_0}{T_{adm,0}} \right)^{-0.5}$$

Escribiendo esta expresión en función del grado de sobrealimentación a la altitud z ($\pi = p_{adm}/p$), y del grado de sobrealimentación al nivel del mar ($\pi_0 = p_{adm,0}/p_0$), y relacionando las condiciones de entrada y salida del compresor por medio de una transformación politrópica de exponente n , se obtiene la siguiente expresión:

$$\left(\frac{N_i}{N_{i0}} \right)_{T.C.} = \left(\frac{\pi}{\pi_0} \right)^{0.5 + \frac{0.5}{n}} \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-0.5} \quad (18)$$

En la [Fig. 6](#) se representa la variación de la potencia indicada con la altitud para diferentes grados de sobrealimentación, siendo las líneas $p/p_0 = 1, 1.2, 1.4$, y 1.6 , respectivamente de abajo hacia arriba. Las curvas se han obtenido con la ecuación (18), suponiendo un exponente politrópico $n=1.4$.

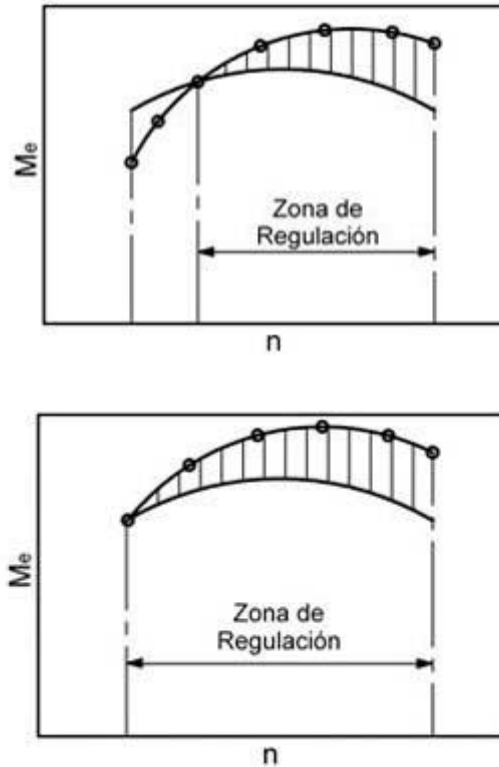


Fig. 5: Efecto de la altitud en un motor sobrealimentado. $z=0$ ($\frac{3}{4}$) y $z \gg 0$ (\AA)

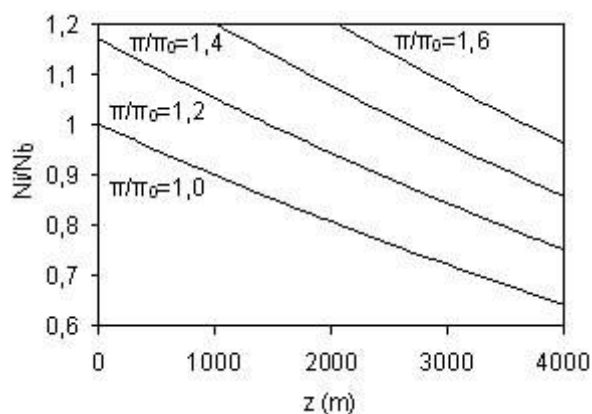


Fig. 6: Potencia indicada en función de la altitud para diferentes grados de sobrealimentación (p/p_0) suponiendo columna triangular

Como se aprecia en la [Fig. 6](#), la recuperación de prestaciones del motor con la altitud depende del grado de sobrealimentación. Sin embargo, en algunos casos como por ejemplo la Norma ISO 3046-1 (1995), a propuesta del *International Council on Combustion Engines* (CIMAC), se acepta para todo tipo de motores diesel estacionarios, sobrealimentados sin interenfriador, una pérdida de potencia cuantificada por los exponentes $a=0.7$ y $b=-2$ en la ecuación (1), independientemente del grado de sobrealimentación. Es evidente que la validez de esta correlación no puede ser independiente del grado de sobrealimentación, ni por lo tanto del grado de carga del motor, por lo que es de suponer que dicho organismo adoptó un grado de sobrealimentación fijo.

Suponiendo una compresión isoentrópica con $n=1.4$, y suponiendo que los motores sobrealimentados equipan turbogrupos sobredi-mencionados de tal forma que en ningún caso experimenten pérdida de potencia ($N_i/N_{i0} = 1$), tal como se argumenta en Lapuerta *et al.* (2005), puede despejarse la siguiente ecuación, que proporciona el grado de sobrealimentación que permitiría compensar por completo la pérdida de potencia con la altitud.

$$\pi = \pi_0 \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-1.16667} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.58336} \quad (19)$$

Este resultado se ha representado en la [Fig. 7](#) para diversas condiciones de sobrealimentación de diseño, descritas por el grado de sobrealimentación a nivel del mar (p_0), que pueden corresponder a diferentes condiciones operativas de un mismo motor o de diferentes motores. El caso de $p_0=1$ correspondería a un motor que al nivel del mar no sobrealimenta, y que al elevarse en altitud solo lo hace en la medida necesaria para mantener la potencia. Este resultado constituye una orientación tanto para el dimensionamiento de grupos de sobrealimentación que vayan a equipar motores que operen en altura, como de los sistemas de compensación (*waste-gate*, turbinas de geometría variable, etc.) que dichos motores requieren cuando operan al nivel del mar para no sobrepasar la potencia nominal.

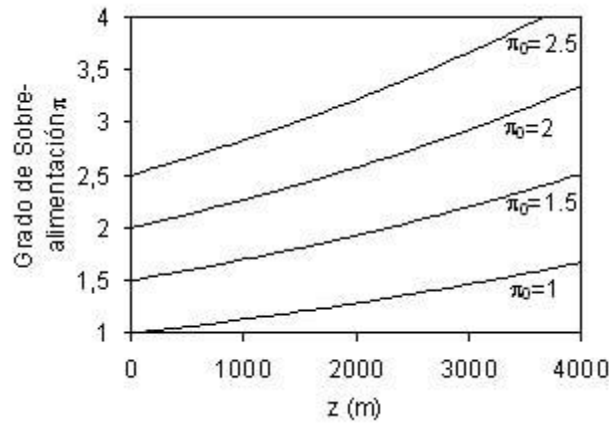


Fig. 7: Efecto del grado de sobrealimentación del compresor para un motor que no cambia su potencia indicada con la altitud

El mapa de condiciones de sobrealimentación de la [Fig. 7](#) se utiliza para analizar los procesos de mezcla y combustión en motores diesel y los procesos de formación de contaminantes.

CONCLUSIONES

Para estimar los efectos de la altitud sobre cualquier motor de combustión interna, es adecuado utilizar la ecuación hidrostática atmosférica suponiendo un perfil triangular de temperaturas.

La altitud sobre el nivel del mar ejerce efectos tanto sobre la presión y temperatura atmosféricas como sobre la concentración de oxígeno en el aire y la composición de éste. Sin embargo, para cuantificar el efecto sobre las prestaciones del motor, basta con considerar el efecto sobre las condiciones termodinámicas.

La altitud disminuye notablemente la potencia indicada, y por tanto la efectiva, desarrollada por un motor de aspiración natural, en todo el rango de regímenes de giro. Sin embargo este efecto se reduce al turbosobrealimentar el motor, pudiendo incluso llegar a compensarse tal reducción a alto régimen.

Se ha obtenido una expresión que permite calcular el incremento de relación de compresión del turbogrupo, necesario para evitar cualquier pérdida de potencia al aumentar la altitud.

Las estrategias más recientes de diseño tienden a sobredimensionar el turbogrupo con el fin de evitar la pérdida de potencia a bajo régimen, limitando el exceso de potencia que éste proporcionaría a alto régimen, por medio de sistemas de compensación electrónica-mente gobernados.

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ALTITUD SOBRE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MOTORES DIESEL

Magin Lapuerta⁽¹⁾, Octavio Armas⁽¹⁾, John R. Agudelo⁽²⁾, Andrés F. Agudelo⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos. ETSII.
Universidad de Castilla-La Mancha. Camilo José Cela s/n 13071 Ciudad Real-España

⁽²⁾ Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia

Tfno.: 34-926-295431, Fax: 34-926-295361

e-mail: Magin.Lapuerta@uclm.es

RESUMEN

Como continuación de un trabajo previo en el que se estudia el efecto de la altitud sobre las prestaciones de un motor de combustión interna, se plantea en este nuevo trabajo un análisis del efecto que las variaciones de presión, temperatura y composición del aire ejercen sobre las condiciones locales de mezcla, combustión y formación de contaminantes en motores diesel en función de su grado de sobrealimentación. Se parte para ello del supuesto de que los sistemas correctores de la presión de admisión de los motores sobrealimentados tienen como objetivo evitar cualquier pérdida de potencia, como es típico en motores de automoción.

Palabras clave: Altitud, condiciones atmosféricas, combustión, motores diesel, turboalimentación

STUDY OF ALTITUDE EFFECT ON DIESEL ENGINE COMBUSTION PROCESS

ABSTRACT

As a continuation of a previous work in which altitude effect on internal combustion engine performance is studied, this new work presents an analysis of the effect of pressure, temperature and air composition variations on local conditions of mixture, combustion and pollutant emissions formation in diesel engines as a function of their turbocharging level. It is assumed that inlet pressure correction systems in turbocharged engines avoid any power loss, as it is typical in automotive engines.

Key words: Altitude, atmospheric conditions, combustion, diesel engines, turbocharging

INTRODUCCIÓN

La disminución de la presión y la temperatura atmosférica afecta la densidad del aire y su composición. Las variaciones de la densidad afectan a las prestaciones de los motores de combustión interna alternativos, ya que estos tienen sistemas de alimentación volumétricos, provocando una disminución de la presión en el cilindro a lo largo de todo el ciclo termodinámico y por tanto del rendimiento indicado. Este efecto es mayor en motores de aspiración natural que en turboalimentados, tal como se revisa en Lapuerta, M., et al. (2005). Además la densidad y concentración de oxígeno afectan a los fenómenos locales que intervienen en la combustión y en la formación de contaminantes.

Los procesos de formación del chorro (atomización, penetración y ángulo de apertura) y de englobamiento de aire en el frente de llama se ven igualmente afectados y por tanto también lo estará el proceso de combustión. Según Hiroyasu et al. (1989) y Arrègle (1997) a mayor densidad del gas en el cilindro corresponde un mayor tamaño medio de gotas en la atomización secundaria, a pesar del aumento de las fuerzas aerodinámicas. Esto se debe a que se produce una pérdida en la penetración del chorro que implica que éste sea más denso y por tanto, más sujeto a la coalescencia (choque entre diferentes gotas que dan lugar a la formación de gotas más grandes). El ángulo de apertura del chorro aumenta con el incremento de densidad del gas en el cilindro (Abramovich, 1963; Arrègle, 1997; Correas, 1998).

El tiempo de retraso, definido como el tiempo que transcurre desde que se inicia la inyección hasta que se inicia la combustión, incrementa con la altitud para motores de aspiración natural, mientras que para los turboalimentados apenas varía. Según Lizhong et al., 1995, en los primeros, el inicio de la inyección ocurre en un medio con menor presión y temperatura, provocando retrasos más largos y en consecuencia mayores

cargas mecánicas debido al elevado el pico de combustión rápida, mientras que en los turboalimentados no se ve afectado el retraso debido a que la menor contrapresión de escape favorece el incremento del régimen de giro de la turbina compensando en parte la disminución de la presión en el compresor.

Tanto la longitud característica de la llama (FL), definida como la distancia media al inyector en la que se desarrolla la llama (Turns, 1998), como el tiempo aparente de combustión (ACT), definido como el intervalo de tiempo requerido para preparar el combustible desde que es inyectado hasta que se quema a lo largo de todo el ciclo termodinámico (Fenolosa, 2003; Arrègle, 2003), se hacen más grandes a medida que disminuye la densidad del aire.

El *lift-off* es la distancia entre el inyector y el inicio de la llama en el chorro de combustible (Dec, 1997). Dicha distancia establece la frontera entre la parte inerte, en la que el aire es englobado hacia el interior del chorro, y la parte reactiva, en la que el aire no puede atravesar hacia el interior por consumirse en la propia llama. Al disminuir la densidad del aire se produce un aumento del *lift-off*, que permite una mayor cantidad de entrada de aire al chorro, contribuyendo a una menor formación inicial de hollín. No obstante, este efecto se ve ampliamente contrarrestado por la disminución de la tasa de oxidación de hollín que provoca la menor densidad del aire (García, 2004).

Las emisiones contaminantes se ven afectadas con la altitud. El *Southwest Research Institute* realizó una serie de mediciones a principios de los años noventa con el fin de cuantificar las emisiones de motores diesel de trabajo pesado empleando un simulador de altitud de muestreo a volumen constante (CVS). Human et al., (1990), encontraron que para una altura simulada en el CVS de 1850 msnm, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) se reducían en torno a un 10% respecto a 245 msnm, mientras que las de CO, HC, material particulado y aldehídos incrementaban en

promedio entre 2 y 4 veces para un motor Caterpillar 3208 de aspiración natural y entre 1.2 y 2 veces para un motor Cummins NTCC-350 turboalimentado. Las emisiones del motor turboalimentado se hacían iguales a las del naturalmente aspirado cuando dejaban fijo el inicio de la inyección. Chaffin y Ullman (1994), obtuvieron una disminución en el par, tanto transitorio como estacionario a plena carga, cercano al 6,5% para una altura simulada en el CVS de 2160 msnm (Ciudad de México) respecto a 245 msnm, en un motor Detroit DDC serie 60 turboalimentado equipado con intercooler y compensador para variaciones de presión barométrica. Comparando entre estas dos altitudes, las emisiones de NOx no variaron en la prueba en transitorio y disminuyeron en torno al 2% en el ensayo estacionario a 1500 rpm. Las emisiones de HC incrementaron un 35% en la prueba transitoria y se mantuvieron invariables en las pruebas estacionarias. Las emisiones de CO incrementaron un 37% en transitorio y un 30% en estacionario. Las emisiones de partículas incrementaron en torno a un 30% en la prueba transitoria. Sin embargo, la actuación del sistema electrónico de corrección por presión barométrica (DDEC II) que equipa este motor permitió que la emisión de partículas no variara con la altura en la prueba a plena carga en régimen estacionario.

Graboski y McCormick (1996) obtuvieron las mismas tendencias (incremento del material particulado, CO, HC y ninguna variación en los NOx) sobre un motor Detroit DDC serie 60 turboalimentado, ensayado a 1600 msnm bajo el ciclo transitorio para motores de trabajo pesado recomendado por la EPA (*Environmental Pollution Agency*). El material particulado incrementó en un rango de 50-75% respecto a nivel del mar. Sin embargo, detectaron una ligera disminución de la SOF¹ (20-35% a 0 msnm contra 10-15% a 1600 msnm), lo que sugiere que el incremento del material particulado está afectado por el incremento de las emisiones de hollín.

¹ Fracción orgánica soluble

Chernich et al., (1991) reportaron un incremento promedio de un 30% en la opacidad de humos en la prueba de aceleración en vacío de 170 camiones seleccionados de manera aleatoria, al pasar de 0 a 1850 msnm. En motores que incluían control electrónico, el incremento fue inferior (en torno a 20%), mientras que Chaffin y Ullman (1994) reportaron aumentos en torno al 80% al pasar de 245 msnm a 2160 msnm.

Existen muchas variables que afectan a la formación y emisión de óxidos de nitrógeno en los motores diesel. Desantes et al., (1996) propusieron un método para distinguir el efecto independiente de cada variable de operación de un motor diesel sobre la formación y emisión de NOx. Encontraron que los parámetros que más influyen en la formación del óxido nítrico (NO), con diferencia el más importante de los NOx, eran la disponibilidad de oxígeno en la llama y su temperatura. Ambos parámetros se ven afectados con la altitud, por lo que la variación en las emisiones de NOx puede explicarse a partir de las tendencias de estos dos parámetros.

En vista de lo anterior, los fabricantes han desarrollado diversos métodos para compensar el efecto de la altitud sobre sus motores, tales como la implementación de la turboalimentación controlada mediante waste-gate (compuerta de descarga) o geometrías variables, o el uso de sensores barométricos que retroalimentan a la unidad de control electrónico para que actúe ajustando los parámetros de la inyección de combustible. Asimismo, se han implementado algunos métodos de corrección por presión barométrica que no requieren el uso de sensores adicionales. Éstos utilizan algoritmos de cálculo basados en las ecuaciones de flujo compresible a través de una obstrucción. Las entradas al algoritmo se obtienen de los sensores existentes en el motor (Olin y Maloney, 1999).

Aunque no analizó el efecto de la variación de la presión atmosférica, Rakopoulos (1991) estudió el efecto de la temperatura y la

humedad ambiental sobre las prestaciones y emisiones de un motor diesel monocilíndrico de inyección directa y aspiración natural manteniendo constante la masa de combustible inyectado. Al incrementar la temperatura ambiente en 15°C (de 22 a 37°C) se producía un aumento en la concentración de NO cercana a 100 ppm, y un incremento en el dosado en torno al 5%. El incremento en la humedad relativa disminuía la concentración de NO, aunque en menor proporción que la temperatura. La opacidad del humo incrementó simultáneamente con el aumento de la temperatura y la humedad absoluta, siendo este efecto más pronunciado para valores de alto dosado. Este trabajo también mostró que las mejores prestaciones del motor se alcanzaban en ambientes fríos y secos y las peores, en ambientes cálidos y húmedos.

En el presente trabajo se cuantifican algunos de estos efectos y se hace una estimación del efecto de la altitud sobre parámetros característicos del proceso de combustión en motores diesel de aspiración natural y turboalimentados.

PLANTEAMIENTO

La altitud sobre el nivel del mar, z , tiene un efecto importante sobre las condiciones en las que se encuentra el aire y sobre su composición. Además de las variaciones de temperatura propias de las distintas capas de la atmósfera, la presión atmosférica disminuye a medida que aumenta la altitud del punto de medida, debido a la reducción del peso de la columna que soporta por encima, reducción que se debe tanto a la menor altura de la columna como a la menor densidad, ρ , del aire que la ocupa. En un trabajo reciente (Lapuerta et al., 2005b), se estima el efecto de la variación de la altitud sobre las prestaciones de motores de combustión interna alternativos, encontrando que la suposición de columna triangular es más apropiada que la de columna isoterma.

En la Figura 1 se presentan los resultados de presión atmosférica, fracción molar de oxígeno en el aire y concentración de oxígeno en el aire respecto al nivel del mar (subíndice 0), obtenidos con la hipótesis de columna triangular para valores de altitud en el rango habitable. Los valores de la columna triangular corresponden a una temperatura de 20°C a cota cero con vértice en -55°C a cota 11000 m.

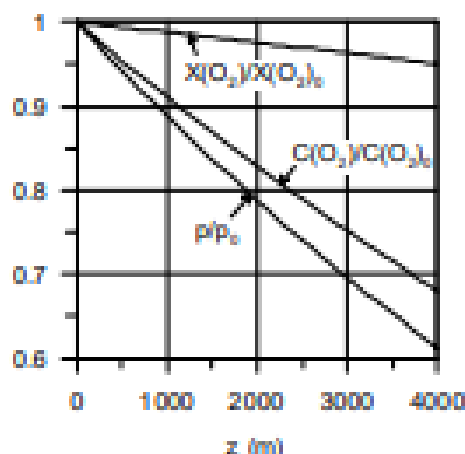


Fig. 1: Efecto de la altitud sobre la presión atmosférica (p), fracción molar de oxígeno (X) y concentración de oxígeno (C), normalizados respecto al nivel del mar. $p_0 = 101.325$ kPa, $X(O_2)_0 = 0.20946$ y $C(O_2)_0 = 0.2787$ kg/m³

En cualquier caso, de los dos efectos que contribuyen a la disminución de la concentración de oxígeno con la altitud, el más importante es, con diferencia, el efecto de la presión. A pesar que los cambios en la fracción molar (consecuencia de un proceso de difusión molecular) pueden llegar a ser inapreciables con la altura debido a la preponderancia de los movimientos convectivos macroscópicos que desplazan los gases verticalmente (Wayne, 2000), en este trabajo sí se han considerado ya que el estudio de la altitud no se refiere tanto a la dirección vertical en la atmósfera, como a la distancia vertical del terreno respecto del nivel del mar.

En el presente trabajo se estudian los efectos de la altitud sobre distintos parámetros de

demostrada importancia a la hora de analizar los procesos de mezcla y combustión y los procesos de formación de contaminantes, en el caso de los motores turboalimentados, bajo el supuesto de que disponen de los sistemas de control de la presión de admisión (wastegate, turbinas de geometría variable, etc.) necesarios para una recuperación completa de la potencia, tal y como se describe en Lapuerta et al. (2005).

EFFECTO DE LA ALTITUD SOBRE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DIESEL

Relación combustible-aire

La reducción de la fracción molar de oxígeno con la altitud tiene como consecuencia una modificación de la relación másica estequiométrica entre aire y combustible en la combustión lo que provoca, cuando se someten a altas cotas, desajustes en la dosificación de los motores. La Figura 2 muestra dicho efecto, para un gasóleo ($C_{12}H_{26}$) de composición típica $C_{12}H_{26}$ para la hipótesis de columna triangular. El dosado o relación combustible/aire de referencia resulta $F_{a,0} = (m_f/m_a)_{a,0} = 1/14.73$. En función de la altitud:

$$F_a = \left(\frac{m_f}{m_a} \right)_a = \frac{X_{O_2}}{n + m/4} \frac{12n + m}{PM_a} \quad (1)$$

$$\frac{F_a}{F_{a,0}} = \frac{X_{O_2}}{X_{O_2,0}} \quad (2)$$

Donde PM_a es el peso molecular del aire.

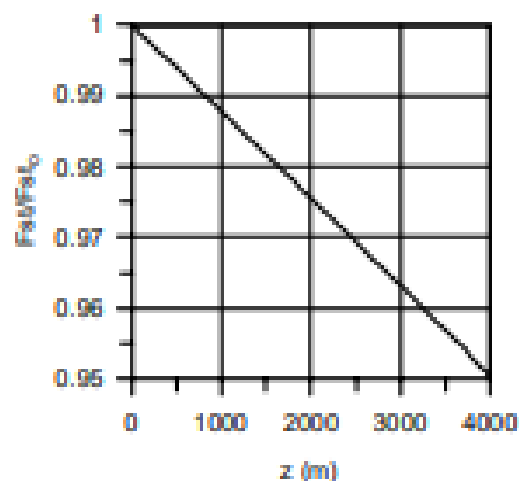


Fig. 2: Efecto de la altitud sobre la relación másica estequiométrica combustible/aire

Temperatura adiabática y oxígeno disponible en la llama

La formación de NO_x durante el proceso de combustión depende en gran medida de la temperatura y la masa de oxígeno disponible en la llama. Al ser tan rápida la combustión, apenas hay tiempo para pérdidas de energía, lo que permite que la temperatura de combustión se aproxime a la de llama adiabática. En la Figura 3 se muestra el efecto de la altitud sobre la temperatura adiabática de llama a presión constante para el mismo gasóleo del apartado anterior, calculada con un modelo de equilibrio químico que considera 35 especies y que está basado en el método de las constantes de equilibrio, desarrollado en el grupo de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Castilla-La Mancha (Lapuerta, 2001), para un motor de aspiración natural y diversos motores turboalimentados, con diferentes grados de turboalimentación a nivel del mar, pero todos ellos manteniendo invariable la potencia con la altitud.

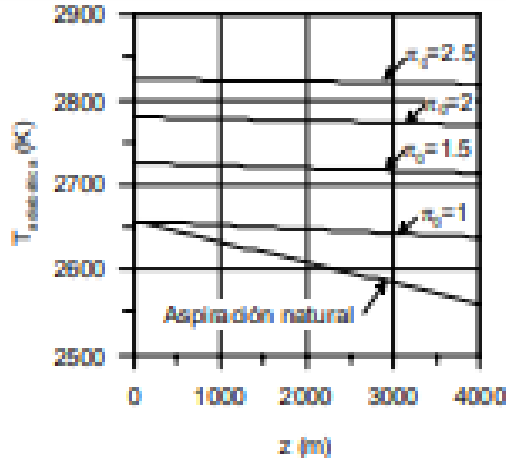


Fig. 3: Efecto de la altitud sobre la temperatura adiabática de llama a presión constante para un motor de aspiración natural y uno turboalimentado

Las condiciones locales de combustión también se ven afectadas por la altitud. En los motores diesel turboalimentados actuales, la mayor parte del proceso de combustión (salvo a condiciones de cargas muy bajas) es por difusión, situación bajo la cual la llama se desarrolla en condiciones aproximadamente estequiométricas (Dec, 1997). Al aumentar la altitud, la concentración de oxígeno en dichas llamas estequiométricas disminuye, al igual que la temperatura adiabática de llama, pudiendo afectar la formación de óxidos de nitrógeno (NOx) y otros contaminantes. En la Figura 4 se observa el efecto de la altitud sobre la disponibilidad de oxígeno de una llama estequiométrica, calculado a partir de la siguiente expresión:

$$Y_{O_2, llama} = \frac{m_{O_2}}{m_a + m_f} = \frac{m_a \cdot Y_{O_2,a}}{m_a + m_f} \quad (3)$$

$$= \frac{Y_{O_2,a}}{1 + \left(\frac{m_f}{m_a}\right)_a} = \frac{\frac{PM_{O_2}}{PM_a} \cdot X_{O_2}}{1 + F_a}$$

Normalizando con las condiciones al nivel del mar, y combinando con la ecuación (2):

$$\frac{Y_{O_2, llama}}{Y_{O_2, llama, 0}} = \frac{\frac{X_{O_2}}{1 + F_a}}{\frac{X_{O_2, 0}}{1 + F_{a, 0}}} = \frac{\frac{1}{F_{a, 0}} + 1}{\frac{1}{F_{a, 0}} \frac{X_{O_2, 0}}{X_{O_2}} + 1} \quad (4)$$

Donde m es masa, y los subíndices indican: a: aire, f: combustible.

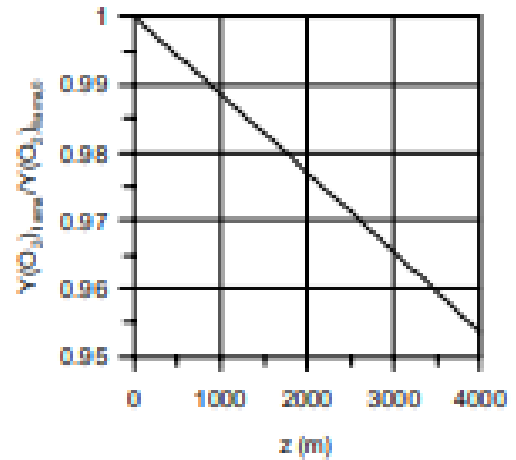


Fig. 4: Efecto de la altitud sobre la fracción másica de oxígeno disponible en la llama estequiométrica.
 $Y(O_2)_{lama, 0} = 0.21673$

Las tendencias que se muestran en las Figuras 3 y 4 permiten explicar los resultados de emisiones contaminantes reportados en la literatura revisada. Los combustibles oxigenados, tales como el biodiesel, pueden cumplir un papel importante de sustitución de las carencias de oxígeno aéreo y modificar las condiciones de estequiometría del proceso, y por tanto las de la mezcla.

Tiempo de retraso

El tiempo de retraso se ha calculado usando la correlación (5), sugerida por Wolfer (Heywood, 1988), debido a que ésta fue determinada empleando un sistema de inyección similar al de los motores diesel, y a que el combustible usado tenía un número de cetano similar al empleado para determinar el

efecto de la relación combustible-aire y las presiones y temperaturas en el momento de la inyección fueron similares a las calculadas en este trabajo (proceso de compresión politrópico con $n = 1.35$ y relación de compresión volumétrica de un motor típico de 17:1).

$$t_{ret} = A \cdot p^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

Donde los valores de las constantes son: $A = 0.44$, $n = 1.19$ y $E_a/R = 4650$ (Heywood, 1988), y donde la presión y temperatura se refieren a las condiciones de compresión, identificadas a continuación con el subíndice comp. Normalizando la ecuación (5) respecto al nivel del mar se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \frac{t_{ret}}{t_{ret,0}} &= \left(\frac{p_{comp}}{p_{comp,0}}\right)^{-n} \cdot \frac{\exp\left(\frac{E_a}{RT_{comp}}\right)}{\exp\left(\frac{E_a}{RT_{comp,0}}\right)} \\ &= \left(\frac{p_{comp}}{p_{comp,0}}\right)^{-n} \cdot \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{comp}} - \frac{1}{T_{comp,0}}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

Tal y como muestra la Figura 5, el tiempo de retraso del motor de aspiración natural aumenta con la altitud, mientras que en el motor turboalimentado, que mantiene invariable la potencia con la altitud, tiende a disminuir, cualquiera que sea la relación de compresión del turbocompresor a nivel del mar, debido a que mantiene aproximadamente constante la presión y la temperatura en el momento de la inyección.

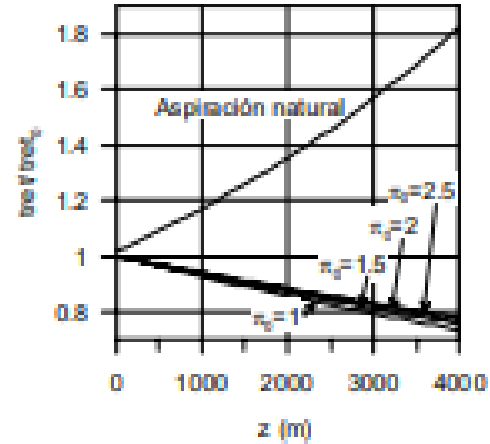


Fig. 5: Efecto de la altitud sobre el tiempo de retraso

Tiempo aparente de combustión y longitud de llama

El tiempo aparente de combustión (ACT) se ha calculado a partir de la expresión obtenida por Arrègle (2003):

$$ACT_i = k \left[\rho^{0.5} \cdot u_0 \cdot Y_{O_2}^{0.5} \cdot \phi_0^{-1} \right]_{POI \rightarrow POC}^i \quad (7)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad, ρ es la densidad del gas en la cámara, u_0 es la velocidad del chorro a la salida del inyector y ϕ_0 el diámetro del inyector. Los subíndices indican: POI: punto de inyección, POC: punto de combustión. Si se dejan constantes los parámetros de inyección u_0 y ϕ_0 y se normaliza el tiempo de combustión aparente respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión (despreciando la variación del peso molecular del aire con la altitud):

$$\begin{aligned} \frac{ACT}{ACT_0} &= \left(\left(\frac{p_{comp,0}}{p_{comp}} \right) \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,0}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{X_{O_2,0}}{X_{O_2}} \right)^{0.5} \\ &= \left(\left(\frac{p_{atm,0}}{p_{atm}} \right) \cdot \left(\frac{T_{atm}}{T_{atm,0}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{X_{O_2,0}}{X_{O_2}} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (8)$$

En la Figura 6 se muestra el efecto de la altitud sobre el ACT, observándose un incremento más pronunciado en los motores de aspiración natural que en los turboalimentados (en esta ocasión independientemente del grado de turboalimentación).

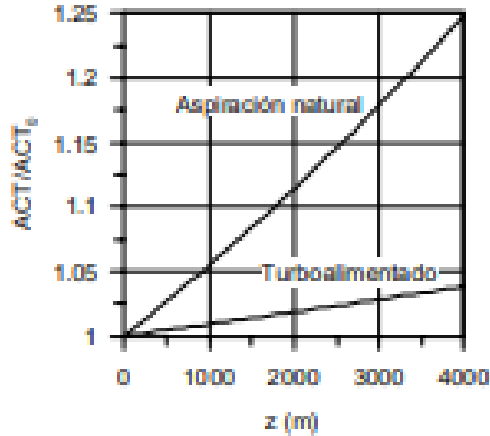


Fig. 6: Efecto de la altitud sobre el tiempo de combustión aparente (ACT)

La longitud de llama se ha calculado usando la ecuación (9) sugerida por Fenolosa (2003):

$$FL = k \cdot \left(\frac{m_a}{m_f} \right)_a \cdot \left(\frac{Y_{O_2 adm}}{Y_{O_2}} \right) \cdot \phi_b \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho} \right)^{0.5} \quad (9)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad, m es masa, Y_{O_2} es la fracción másica de oxígeno en el gas de la cámara (que puede ser inferior a la del aire admitido $Y_{O_2 adm}$ en el caso de existir recirculación de gases de escape, EGR), ρ_f la densidad del combustible líquido, y ϕ_b el diámetro del inyector. Si se dejan constantes los parámetros ρ_f y ϕ_b y se normaliza el tiempo de combustión aparente respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión, que sería válida incluso ante la presencia de EGR

ya que el cociente de fracciones másicas de oxígeno no se modificaría con la altitud:

$$\begin{aligned} \frac{FL}{FL_0} &= \left(\left(\frac{p_{comp,\beta}}{p_{comp}} \right) \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,\beta}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{F_{a,\beta}}{F_a} \right)^{0.5} \\ &= \left(\left(\frac{p_{adm,\beta}}{p_{adm}} \right) \cdot \left(\frac{T_{adm}}{T_{adm,\beta}} \right) \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{F_{a,\beta}}{F_a} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (10)$$

En la Figura 7 se muestra el efecto de la altitud sobre este parámetro. Se observa que mientras que en los motores de aspiración natural la llama tiende a aumentar su longitud, en los motores turboalimentados disminuye ligeramente.

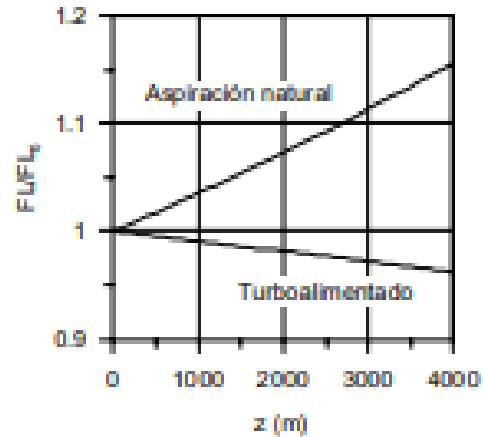


Fig. 7: Efecto de la altitud sobre la longitud de llama

Lift-off

La longitud del lift-off se ha calculado a partir de la expresión sugerida por García (2004):

$$LOL = k \cdot T^{-3.163} \cdot \rho^{-1.376} \quad (11)$$

Donde k es una constante de proporcionalidad, y T y ρ son la temperatura y densidad de los gases en el cilindro en el

momento de la inyección. Normalizando la ecuación (11) respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{LOL}{LOL_0} = \left(\frac{P_{comp}}{P_{comp,0}} \right)^{-1.378} \cdot \left(\frac{T_{comp}}{T_{comp,0}} \right)^{-1.725} \quad (12)$$

$$= \left(\frac{P_{adn}}{P_{adn,0}} \right)^{-1.378} \cdot \left(\frac{T_{adn}}{T_{adn,0}} \right)^{-1.725}$$

En la Figura 8 se muestra el efecto de la altitud sobre la longitud del lift-off, observándose un incremento más pronunciado en los motores de aspiración natural que en los turboalimentados.

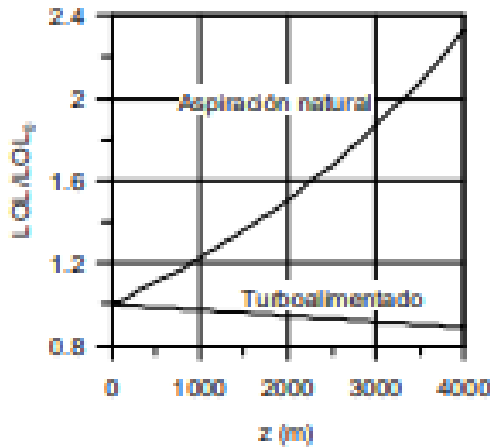


Fig. 8: Efecto de la altitud sobre el lift-off

Efecto sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx)

Como se justificó arriba, tanto la temperatura adiabática de llama como la disponibilidad de oxígeno estequiométrico en la llama, ambas función de la altitud, pueden afectar la formación de NOx. La dependencia de las emisiones de NOx con la temperatura adiabática de llama ha sido estudiada por muchos autores (Ahmad y Plee, 1983; Iida y Watanabe, 1990; Desantes et al., 1996), quienes sugieren una expresión del tipo Arrhenius:

$$NOx = A \cdot e^{\left[\frac{B}{T_{adn}} \right]} \quad (13)$$

Donde A es una constante, B es la relación entre la energía de activación y la constante universal de los gases y T_{adn} es la temperatura adiabática de llama. Normalizando esta última ecuación respecto al nivel del mar, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{NOx}{NOx_0} = e^{\left[\frac{B}{T_{adn,0}} - \frac{B}{T_{adn}} \right]} \quad (14)$$

Ahmad y Plee (1983) han encontrado valores de $B=285000$ J/mol, mientras que Iida y Watanabe (1990) sugieren $B=586000$ J/mol y Desantes et al. (1996) han encontrado que B puede variar entre 144000 y 403000 J/mol según se varíe la temperatura o la presión inicial. En la Figura 9 se muestra la variación de los NOx con la altitud calculados a partir de la ecuación (14), tomando $B=144000$ J/mol. Los resultados coinciden con los obtenidos experimentalmente por Human et al. (1990), Chaffin y Ullman (1994) y Graboski y McCormick (1996), según los cuales en motores de aspiración natural se obtienen disminuciones en las emisiones de NOx en torno al 11% para alturas de 1850 msnm, mientras que para motores turboalimentados las máximas reducciones estaban en torno a 2% para alturas de 1600 y 2160 msnm.

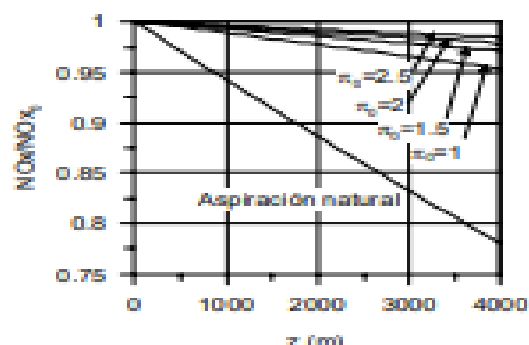


Fig. 9: Efecto de la altitud sobre las emisiones de NOx

De los resultados obtenidos en la Figura 9 se comprueba que con diferencia el efecto más importante en la emisión de NOx con la altitud es la temperatura adiabática de llama, ya que ésta permite explicar por sí sola los resultados experimentales encontrados en la bibliografía.

CONCLUSIONES

Para estudiar el efecto de la altitud sobre los procesos de combustión y de formación de contaminantes en un motor diesel, no basta con tener en cuenta las variaciones de la presión y de la temperatura ambiental, sino también las variaciones de la composición del aire.

La composición del aire afecta a la relación estequiométrica combustible/aire, y como consecuencia, a las condiciones de la mezcla en la cámara de combustión necesarias para la combustión por difusión, dominante en motores diesel. Estas condiciones de mezcla pueden observarse a través de parámetros como la longitud de la llama, la concentración de oxígeno en la llama o la duración de la combustión.

Las variaciones estimadas sobre el desarrollo de la combustión al variar la altitud son casi inapreciables en el caso de motores turboalimentados. Además, las ligeras

reducciones del tiempo de retraso se compensan con los tiempos algo más largos de duración de la combustión.

La reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno con la altitud se debe principalmente a la disminución de la temperatura adiabática de llama, y en menor medida a la presencia de oxígeno en la llama. Las estimaciones realizadas de ambas variables, y de su efecto sobre la emisión de NOx demuestran que la variación de la temperatura justifica por sí sola las reducciones observadas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) por su financiación de una Red Temática entre universidades españolas y colombianas, y al Ministerio de Educación, Cultura y Deportes de España por la financiación de la estancia posdoctoral de John R. Agudelo en la Universidad de Castilla-La Mancha.

NOMENCLATURA

| | |
|-----------|---|
| ACT | Tiempo aparente de combustión |
| E_a | Energía de activación |
| F | Relación másica combustible/aire |
| FL | Longitud característica de llama |
| k | Constante de proporcionalidad |
| LOL | Longitud de lift-off |
| p | Presión |
| PM | Peso molecular |
| POC | Punto de finalización de la combustión |
| POI | Punto de inicio de la inyección |
| R | Constante universal de los gases |
| T | Temperatura |
| t_{ret} | Tiempo de retraso |
| u_b | Velocidad del chorro a la salida del inyector |
| X_{O_2} | Fracción molar de oxígeno en el aire |
| Y_{O_2} | Fracción másica de oxígeno en el aire |
| z | Altitud sobre el nivel del mar |

| | |
|----------|------------------------------------|
| ϕ_i | Diámetro de la tobera del inyector |
| ρ | Densidad |
| π | Relación de compresión del trubo |

Subíndices

| | |
|----------|-----------------|
| a | Aire |
| adm | Admisión |
| $comp$ | Compresión |
| f | Combustible |
| st | Estequiométrico |
| θ | A nivel del mar |

A Behavior-Based System For Off-Road Navigation D.
Langer, J. K. Rosenblatt, and M. Hebert
The Robotics Institute
Carnegie Mellon University
Pittsburgh PA 15213

Abstract

In this paper, we describe a core system for autonomous navigation in outdoor natural terrain. The system consists of three parts: a perception module which processes range images to identify untraversable regions of the terrain, a local map management module which maintains a representation of the environment in the vicinity of the vehicle, and a planning module which issues commands to the vehicle controller. Our approach is to use the concept of “early traversability evaluation,” in which the perception module decides which parts of the terrain are traversable as soon as a new image is taken, and on the use of a behavior-based architecture for generating commands to drive the vehicle. We argue that our approach leads to a robust and efficient navigation system. We illustrate our approach by an experiment in which a vehicle travelled autonomously for one kilometer through unmapped cross-country terrain. The system used in this experiment can be viewed as a core navigation system in that other modules, such as a map navigation module, can be easily added to the system.

1. of reliability is still a significant challenge. Introduction

Autonomous navigation missions through unmapped open terrain are critical in many applications of outdoor mobile robots. To successfully complete such missions, a mobile robot system needs to be equipped with reliable perception and navigation systems capable of sensing the environment, of building environment models, and of planning safe paths through the terrain. In that respect, autonomous crosscountry navigation imposes two special challenges in the design of the perception system. First, the perception must be able to deal with very rugged terrain. This is in contrast to more conventional mobile robot systems which operate in simpler structured environments. Second, the perception system must be able to reliably process a large number of data sets over a long period of time. For example, even a relatively short navigation mission of a few kilometers may require processing thousands of images. Furthermore, because manual rescue of the vehicle from a serious failure is

impossible, the perception system must be able to process a large number of images without any errors, or, at least, the system must be able to identify and correct for errors in time to avoid catastrophic failure of the vehicle. Although the basic computer vision and planning technologies exist and have been demonstrated in the laboratory, achieving such a level of reliability is still a significant challenge.

In this paper, we argue that relatively simpleSeveral approaches have been proposed to address these problems. Autonomous traverse of rugged outdoor terrain has been demonstrated as part of the ALV [17] and UGV [16] projects. JPL's Robby used stereo vision [15] as the basis of its perception system and has been demonstrated over a 100 m traverse 2 in outdoor terrain. Other efforts include: France's VAP project which is also based on stereo vision [6]; the MIT rovers which rely on simple sensing modalities [1]; and several Japanese efforts[11].

In this paper, we argue that relatively simple algorithms for obstacle detection and local map building are sufficient for cross-country navigation. Furthermore, when used in the context of a behavior-based architecture, these algorithms are capable of controlling the vehicle at significantly faster speeds than would be possible with a system that planned an optimal path through a detailed, high-resolution terrain map. Moreover, we argue that an accurate map is not necessary because the vehicle can safely traverse relatively large variations of terrain surface.

The underlying principle of this work was to keep things as uncomplicated as possible. We opted for a simple yet effective system rather than using more complex methods which often look good on paper yet produce problems in the field.

To illustrate our approach, we will describe a set of perception and navigation modules which constitute the core of a cross-country navigation system. The goal of this system is to enable the vehicle to travel through unmapped rugged terrain at moderate speeds, typically two to three meters per second. We arranged the system modules in a self-contained navigation system which we demonstrated on a one kilometer path through unmapped open terrain. In the next sections, we will use this result as the main reference to illustrate our approach and to discuss the system performance and the implementation details of each module.

The perception and navigation system was developed as part of the Unmanned Ground Vehicle (UGV) project. The support vehicle is a retrofitted HMMWV capable of cross-country navigation (Figure 1). The sensor is the Erim laser range finder which acquires 64x256 range images at 2 Hz. An estimate of vehicle position can be obtained at all times by combining readings from an INS system and from encoders.

Figure 2 shows a high level view of the architecture of the system. A perception module computes a list of untraversable regions and sends the region description to a local map management module. The local map module is responsible for gathering information from the perception module over time and for maintaining a consistent model of the terrain around the vehicle. (We will elaborate on the description of the perception and local map modules in Sections 2 and 3, respectively.) The description of the untraversable regions is sent by the local map module to a planning module at regular intervals. Untraversable regions are terrain features such as high slopes, ditches, or tall objects over which the vehicle cannot drive safely.

Based on a set of driving behaviors, the planning module generates arcs which steer the vehicle such that it remains clear of the untraversable regions. (We describe the planning module in detail in Section 4.) The three logical modules, perception, local map, and arc generation constitute the core of the system. Although it is divided into three logical units, the core system is implemented as a decentralized set of seven software modules. The software modules exchange information using the TCX communication system [5].

In order to be used in a real mission, this core system must be embedded in a larger navigation system so as to carry out a specific task. As will be explained in Section 4, the planning module is capable of arbitration between the steering directions generated by an external module and the steering directions generated by the core navigation system. For example, the external module can be a module that forces the vehicle to drive to a specific goal point or to follow a specific direction. We will show in Section 5 an example in which an additional module drives the vehicle through a set of intermediate goal points.

2. Perception

The range image processing module takes a single image as input and produces a list of regions which are untraversable. The initial stage of image filtering resolves the ambiguity due to the maximum range of the scanner, and removes outliers due to effects such as mixed pixels and reflections from specular surfaces (see [7] for a complete description of these effects). After image filtering, the (x,y,z) location of every pixel in the range image is computed in a coordinate system relative to the current vehicle position. The coordinate system is defined so that the z axis is vertical with respect to the ground plane, and the y axis is pointing in the direction of travel of the vehicle. It is convenient to center the coordinate at the point used as the origin for vehicle control, in this case between the two rear wheels, rather than at the origin of the sensor. The transformation takes into account the orientation of the vehicle read from an INS system. The points are then mapped into a discrete grid on the (x,y) plane. Each cell of the grid contains the list of the (x,y,z) coordinates of the points which fall within the bounds of the cell in x and y . The size of a cell in the current system is 20 cm in both x and y . The choice of the grid resolution is based on the angular resolution of the sensor, in this case 0.5°, and on the size of terrain features which need to be detected, 20cm in the case of the HMMWV.

2.1 Terrain classification algorithm

The terrain classification as traversable or untraversable is first performed in every cell individually. The criteria used for the classification are:

- the height variation of the terrain within the cell,
- the orientation of the vector normal to the patch of terrain contained in the cell,
- and the presence of a discontinuity of elevation in the cell.

To avoid frequent erroneous classification, the first two criteria are evaluated only if the number of points in the cell is large enough. In practice, a minimum of five points per cell is used. Once individual cells are classified, they are grouped into regions and sent to the local map maintainer. It is necessary to use a slope criterion instead of a simple test on elevation for two reasons. First, the vehicle has limitations on the type of slopes on which it can drive independently of any elevation discontinuity. Second and most importantly, a test on absolute elevation would be very unreliable due to the potentially high variation of elevation from the near range to the far range of the field of view. Also, a small error in the estimation of vehicle pitch may induce a large error in the elevation at the far range of the field of view.

- For every range pixel $p = (p, \text{row}, \text{col})$:
- Convert p to a 3-D point $P = [x \ y \ z]$ with respect to the vehicle position at the time the image was taken.
- Compute the location of the cell C which contains P .
- Add P to the list of points in C . 4
- For every non-empty cell C :
- Compute the elevation statistics: h_{\min} , h_{\max} , σ_h , and the slope v by doing a weighted leastsquares estimation using the list of points in C .
- If $h_{\min} - h_{\max}$ and v are outside of the acceptable bounds for the current vehicle configuration in terms of undercarriage and tipover constraints, classify the cell as untraversable.
- Send the list of untraversable cells to the local map manager along with the pose of the vehicle at the time the image was taken.

In general, the density of points in the map is not uniform. As a result, many cells of the map may end up being empty. A dense map without these gaps could be produced by first interpolating the map. This would be necessary in order to evaluate slope by using a neighborhood of each of the grid points. However, with the algorithm above, it is not necessary to interpolate the map because slope is evaluated at each cell individually without using its neighborhood. All that is required in order to compute the slope at a given cell is that enough data points fall in that cell. As result, the slopes cannot be evaluated at those cells of the map which have low or no data content. This is acceptable assuming that the data acquisition processing are fast enough compared to the speed of the vehicle so that the regions of the map with insufficient data can be covered in subsequent images. Although this solution relies on fast perception rate, it is in practice preferable to interpolating the map for two reasons. First, interpolation does increase the computation time substantially, thus increasing reaction time and map update time. Second, the interpolation may smooth out important local details of the terrain which are left untouched in our algorithm.

2.2 Example

Figure 3 shows an example of terrain classification at one position along the path of Figure 8. A video image of the terrain is shown in Figure 3 (a); the corresponding range image is

shown in Figure 3 (b). In this example, a large part of the terrain on the left side of the vehicle is untraversable because of either high slope or high elevation.

Figure 3 (c) shows the grid built internally by the perception module. The (x,y) plane is the reference ground plane and z is vertical. The z value displayed at each element of the grid is the highest elevation of the set of data points within that cell. The scaling factors in (x,y) and in z are different so that the height of the hill on the left is exaggerated in this display. The elevation varies by approximately one meter across the terrain in this example.

Figure 3 (d) shows the result of the terrain classification. The points that are classified as obstacles because they are part of an untraversable region of the terrain are indicated by non-zero values, the rest of the terrain is set to zero. The cells in the region indicated by the label A are not classified as obstacles because the terrain slope within these cells is still within the bounds of the slopes on which the vehicle can travel. The cells in the regions indicated by the label B are not all classified as untraversable because the number of data points within each of these cells is not sufficient.

It is clear from this example that the portions of the grid that are not visible are not reported to the local map manager because only the untraversable cells are explicitly detected. This can occur for two reasons: insufficient density of data points at long range or occlusions from other parts of the terrain. The former 5 occurs only at long range and the timing of the system Cis adjusted so that new scans of the same area are taken before the vehicle reaches that area. Specifically, assuming that a minimum of n points per cell is necessary with cells of size l meters on the side, a cell on a the ground will have a number of data points too small when it is a range greater than R , where h is the height of the sensor above the ground and θ is the angular field of view of a single pixel. With $l = 40\text{cm}$, $n = 3$, and $\theta = 0.01$, R is approximately 6.5m. At a speed of 3m/s, three scans of this cell will be taken before the vehicle reaches it, using the current image acquisition rate of 2Hz. This result corresponds to the worst case of the ground plane because cells on slanted surfaces have a higher density of points. This analysis shows that the cells with insufficient data are processed on time provided that vehicle speed is properly tuned to the sensing rate.

Cells with insufficient data due to occlusions occur because of the presence of obstacles. The arc generation module steers the vehicle away from the obstacles, and, just as before, the cells in an occluded area are scanned before the vehicle reaches this area. Based on this

analysis and the fact that maintaining the traversable cells in the local would degrade performance appreciably, we decided not to represent explicitly the traversable regions.

2.3 Performance and limitations

The range image processing module is efficient because it does not build a dense, high-resolution map of the terrain, and because each image is processed individually without any terrain matching and merging. Specifically, the range processing algorithms run at 200 ms/image on Sparc II workstations.

Although the image acquisition time (500 ms) is effectively the main limitation because it is over twice the processing time, we have put the emphasis on the efficiency of the processing for two reasons. First, faster processing translates to lower latency between the time an object appears in the field of view of the range image and the time it is placed in the local map, irrespective of the image acquisition time. Second, the slow image acquisition is specific to the scanner that was available to us for the experiments reported in this paper. We believe that efficient processing is needed for the next generation of faster sensors with which we are experimenting. In practice, terrain features of size 30cm are detected at a range of ten meters when vehicle speed is 2 m/ s. By comparison, the maximum range of the scanner in its first ambiguity interval is 18 m with a separation of one meter between pixels at that range. More than the range resolution, the reason for the limited detection range is mainly the angular resolution of the scanner which limits the number of pixels measured on a given object. Several problems can lead to occasional misclassification of the terrain. The first problem is the presence of terrain regions with poor reflectance characteristics, such as water.

In practice, such points can be removed from the image during the initial filtering phase. However, the missing data creates large gaps in the map in which the terrain cannot be classified. This problem can really be solved only with the help of additional sensors suitable for terrain typing.

The second problem is the presence of vegetation in typical natural outdoor environments. This problem can manifest itself in several ways. Dense vegetation appears as an obstacle in the range image, causing the vehicle to come to a stop even when the underlying terrain is traversable. Sparse vegetation also causes the detection of spurious obstacles at short range from the sensor. Obviously there is no solution to this problem using

the laser range finder alone. Additional sensing, such as millimeter wave radar, or a different type of range sensing, such as passive stereo may help.

3. Local Map Management

The purpose of the local map module is to maintain a list of the untraversable cells in a region around the vehicle. In the current system, the local map module is a general purpose module called Ganesha [9]. Ganesha uses a 2-D grid-based representation of the local map. In this system, the active map extends from 0 to 20 meters in front of the vehicle and 10 meters on both sides. Each grid cell has a resolution of which was found to provide sufficient accuracy for navigation functions as it is small with respect to vehicle size and large with respect to sensor resolution. This module is general purpose in that it can take input from an arbitrary number of sensor modules and it does not use any explicit knowledge of the algorithms used in the sensor processing modules.

3.1. Overview

The core of Ganesha is a single loop shown in Figure 4. At the beginning of the loop, the current position of the vehicle is read and the coordinates of all the cells in the map with respect to the vehicle are recomputed. Cells that fall outside the bounds of the active region are discarded from the map. The next step in the loop is to get obstacle cells from the perception modules, and then to place them in the local map using the position of the vehicle at the time the sensor data was processed. The sensing position has to be used in this step because of the latency between the time a new image is taken, and the time the corresponding cells are received by the map module, typically on the order of 300ms.

After new cells are placed in the map, internal cell attributes are updated. Cell attributes include the number of times a cell has been previously observed and a flag that indicates whether it is inside the current field of view of the sensor. Finally, Ganesha sends the list of current obstacle cells in its map to the planning system. At the end of each loop, Ganesha waits before starting a new iteration in order to keep a constant loop cycle time.

3.2. Map scrolling

All the coordinates are maintained in Ganesha relative to the vehicle. In particular, vehicle position and orientation are kept constant in the map. At every iteration, Ganesha reads from the positioning system a position (x,y) and a heading ϕ . Assuming that the local map is currently expressed with respect to vehicle pose $P1 = (x1, y1, \phi1)$ and the new vehicle pose

read from the controller is $P_2 = (x_2, y_2, \phi_2)$, Ganesha first computes the relative transformation $P = P_2 P_1^{-1}$ and then transform every cell (x_{m1}, y_{m1}) of the current map to its new location with respect to the vehicle pose P_2 : $(x_{m2}, y_{m2}) = P(x_{m1}, y_{m1})$. It is important to note that Ganesha deals only with relative transformations from one vehicle position to another. Therefore, Ganesha relies on the relative accuracy of the vehicle positioning system, not on the absolute accuracy of the global positions. Assuming that the maximum error on the positioning system is $k\%$ of distance travelled under normal conditions. Assuming Ganesha maintains a L meter deep map, the maximum error in the position of a map object occurs when an object that was added when it was at a $0.4 \times 0.4 \times m$ distance L from the vehicle is now about to disappear from the map after the vehicle has travelled a distance L . In that case, the error in the position of the cell is at most kL because it is the relative error between two vehicle positions separated by L . In our case, $k < 1\%$ and $L = 20m$, and the error is therefore 20cm which is below the 40cm resolution of the Ganesha grid. The estimate of k is based on experimental work with the vehicle controller as reported in [20]. Based on these numbers, the accuracy of the positioning system is sufficient to provide enough relative accuracy for the Ganesha map to be updated correctly.

The fact that the relative accuracy of the positioning system is sufficient for this resolution of the Ganesha grid and for our vehicle does not preclude the use of other sources of position information. For example, we could imagine using 3-D landmark or feature tracking in the range images in order to refine the position estimates. However, this type of visual positioning should be separate a process of which Ganesha uses the output in the form of periodical position updates. In particular, vehicle position from visual registration should not be part of this system.

Because the map module deals only with a small number of terrain cells instead of a complete model and the number of obstacle cells is small compared to the number of traversable cells, the map update is fast. In practice, the update rate can be as fast as 50 ms on a SparcII workstation. Because of the fast update rate, this approach is very effective in maintaining an up-to-date local map at all times. One last advantage of Ganesha's design is that the module does not need to know the details of the sensing part of the system because it uses

only information from early terrain classification. In fact, the only sensorspecific information known to the map module is the sensor field of view which is used to check for consistency of terrain cells between images as described below.

3.3 Error correction

The perception module may produce occasional false positive detection because of noise in the image, for example, which would affect the path of the vehicle. This problem is solved by the map maintainer which maintains a history of the observations. Specifically, an untraversable map cell which is not consistent across images is discarded from the local map if it is not reported by the perception module as untraversable in the next overlapping images. Because the terrain classification is fast compared to the speed of the vehicle, many overlapping images are taken during a relatively short interval of distance travelled. As a result, an erroneous cell is deleted before the vehicle starts altering its path significantly to avoid it.

DECAY ALGORITHM

3.4. Field of view management

A severe limitation of any navigation system is the limited field of view of the sensor, in this case 80°. The problem with the limited field of view is that if the vehicle turns too sharply it may drive into a region that falls outside of the region covered by the previous images. Specifically, the minimum possible turning radius that would keep the entire vehicle within the area swept by the sensor's FOV is given by: $r_{min} = \frac{w}{2 \sin(\frac{\alpha}{2})}$ where w is the vehicle width and α is the sensor's FOV.

With the current parameters of the current laser range finder, the minimum possible turning radius is then $r_{min} \sim 17.25$ m.

In order to address the field of view constraint, we introduced a new mechanism in Ganesha to explicitly represent fields of view. The idea is to add artificial obstacles in the map, the FOV obstacles, which represent the bounds on the sensor field of view at every recorded position as shown in Figure 5.

The FOV obstacles are generated at the two outermost boundary points of the field of view polygon. Since adding FOV obstacles every time a new position is read might be too expensive and is not necessary, they are added at one meter intervals. The FOV cells are first hidden which means that they do not affect the behavior of the vehicle under normal operating conditions. A hidden FOV obstacle occupies a map cell and is transformed with vehicle motion just like the regular obstacle cells, but is not sent to the planner and thus not considered an obstacle by the avoidance behavior. A hidden obstacle is converted to an active obstacle when it comes close to the vehicle. Currently this is done when the FOV obstacle is less than one meter from the front of the vehicle (Figure 5). Active FOV obstacles are treated just like any other regular obstacle. This mechanism ensures that the vehicle can still make sharp turns (Figure 5(a)), but will be prevented from steering into a path that falls into a locally unmapped area (Figure 5(b)).

Using FOV obstacles is a simple and effective way of dealing with the field of view constraint. It has the advantage that it has no effect on the behavior of the vehicle in normal operation and the increase in computation time in Ganesha is negligible as only a few artificial obstacles are used. Another advantage is that the FOV objects mechanism is completely transparent to the rest of the system. In particular, the planning system does not have any knowledge of the way the field of view is handled in Ganesha. As a result, different sensors with different fields of view may be used without any modification of the planner. Because FOV obstacles increase the amount of computation in Ganesha, one could be tempted to maintain a representation of the traversable area rather than the untraversable area. In reality, this approach would degrade performance: Because the FOV obstacles are inserted every meter, there are on the order of $2L$ FOV cells in the Ganesha at any given time, where $L = 20\text{m}$ is the depth of the grid. At the same time, there are on the order L^2 / c^2 empty cells in the grid, where $c = 40\text{cm}$ is the resolution of the grid. Therefore, even in cluttered terrain, it would always be considerably less efficient to transform the traversable cells instead of the combination of untraversable cells and the FOV cells. The situation is worse in the case of a flat terrain in which the map update would be $L^2 / c^2 = 66$ times slower.

4. Planning

Once obstacles have been detected by the terrain evaluation modules and the local map has been updated by Ganesha, the next step is to use this map to generate commands that steer the vehicle around these obstacles. This is done within the framework of the Distributed Architecture for Mobile Navigation (DAMN).

DAMN is a behavior-based architecture similar in some regards to reactive systems such as the Subsumption Architecture [2]. In contrast to more traditional centralized AI planners that build a world model and plan an optimal path through it, a behavior-based architecture consists of specialized taskachieving modules that operate independently and are responsible for only a very narrow portion of vehicle control, thus avoiding the need for sensor fusion. A distributed architecture has several advantages over a centralized one, including greater reactivity, flexibility, and robustness [19]. However, one important distinction between this system and purely reactive systems is that, while an attempt is made to keep the perception and planning components of a behavior as simple as possible without sacrificing dependability, they can and do maintain internal representations of the world (e.g. Ganesha's local map). Brooks has argued that "the world is its own best model" [3], but this assumes that the vehicle's sensors and the algorithms which process them are essentially free of harmful noise and that they can not benefit from evidence combination between consecutive scenes. In addition, disallowing the use of internal representations requires that all environmental features of immediate interest are visible to the vehicle sensors at all times. This adds unnecessary constraints and reduces the flexibility of the system.

Figure 6 shows the organization of the DAMN system in which individual behaviors such as road following or obstacle avoidance send preferred steering directions to the command arbitration module which combines these inputs into a single steering direction and speed command. We describe the use of DAMN in the context of the cross-country navigation system only and we refer the reader to [20] for a description of other systems built around DAMN in the context of road following.

4.1. The arbiter

The role of the architecture is to decide which behaviors should be controlling the vehicle at any given time. In the Subsumption Architecture, this is achieved by having priorities

assigned to each behavior; of all the behaviors issuing commands, the one with the highest priority is in control and the rest are ignored. In order to allow multiple considerations to affect vehicle actions concurrently, DAMN instead uses a scheme where each behavior votes for or against each of a set of possible vehicle actions [18]. An arbiter then performs command fusion to select the most appropriate action.

More precisely, each behavior generates a vote between -1 and +1 for every possible steering command. A vote of -1 indicates that the behavior recommends that the vehicle should not execute the command, because the vehicle would encounter an obstacle, for example. A vote of +1 indicates that the behavior has no objection to that steering command, because there is no obstacle nearby. The votes generated by the behavior are only recommendations to the arbiter. The arbiter computes for each steering command a linear combination of the votes from all the behaviors. The coefficients of the sum reflect the relative priorities of the behaviors. The steering command with the highest vote is send to the vehicle controller.

In the current implementation, the set of steering commands is the set of 15 arcs shown in Figure 7. Although other combinations of arcs can be used, we limit ourselves to the configuration which we used in the cross-country navigation experiments at the time of this writing. The arbiter computes the turn command to be sent to the controller as follows:

1. Compute the weighted sum of the votes received from each active behavior (each behavior has an associated weight between 0 and 1)
2. Normalize the votes by dividing by the sum of the weights for all active behaviors; thus the normalized weighted sums lie between -1 and +1, as each behavior is constrained to vote within that range.
3. The arc with the maximum vote is found and is used as the command. The three cases are:
 - 10 • If there is a single arc with the maximum value, then its value is used.
 - If there is a series of consecutive turn choices with the maximum value, then the average of the curvatures is used (curvature is the inverse of turn radius).
 - If there exist multiple non-consecutive arcs with the same maximum value, then the larger series of arcs is used. If there are multiple series of arcs with the same maximum value and of the same size, then one is chosen arbitrarily.

In addition to steering, speed is also controlled by the arbiter. The commanded speed is decided based on the commanded turn radius. A maximum speed is set for the vehicle, and this value is simply multiplied by the normalized weighted sum of the votes for the chosen turn radius; the result is the speed command issued.

The voting and arbitration scheme described above bears some obvious similarities to Fuzzy Logic systems [22] [10]. Fuzzy Logic is typically used within the framework of rule-based systems, as in [12], but behavior-based systems are generally procedural in nature and do not readily lend themselves to the use of if-then rules. In [21], an architecture is described which proposes to extend DAMN by using Fuzzy Logic, but in doing so it restricts each behavior to having a uniquely determined desired steering direction which is then voted for using a fuzzy membership set. The scheme described here is more general in that it allows for an arbitrary distribution of votes. For example, the obstacle avoidance behavior described below independently evaluates each of the proposed steering directions, whereas forcing it to choose, albeit fuzzily, a single heading would necessarily restrict the overall decision-making process. One advantage of using fuzzy sets in lieu of the discrete sets used in DAMN is that the output is continuous, thus yielding smoother control. Current work on DAMN will provide command interpolation, which is analogous to defuzzification, but using assumptions on the nature of the votes received that are more reasonable for this domain.

4.2. The obstacle behavior

Within the framework of DAMN, behaviors that provide the task-specific knowledge for controlling the vehicle must be defined. Each behavior runs completely independently and asynchronously, providing votes to the arbiter each at its own rate and according to its own time constraints. The arbiter periodically sums all the latest votes from each behavior and issues commands to the vehicle controller.

If a trajectory is completely blocked, the most important behavior for vehicle safety is the obstacle avoidance behavior. In order to decide in which directions the vehicle may safely travel, this behavior receives a list of current obstacles, in vehicle-centered coordinates, and evaluates each of the possible arcs.

If a trajectory is completely free of any neighboring obstacles, then the obstacle avoidance behavior votes for travelling along that arc. If an obstacle lies in the path of a trajectory, the behavior votes against that arc, with the magnitude of the penalty proportional to the distance from the obstacle. In order to avoid bringing the vehicle unnecessarily close to an obstacle, the behavior also votes against those arcs that result in a near miss, although the evaluation is not as unfavorable as for those trajectories leading to a direct collision.

More precisely, the obstacle avoidance behavior uses the following algorithm: If there is no obstacle along or near an arc for at least L_{max} meters, then the vote for that turn radius is +1. If an obstacle appears 11 L_{max} meters away, then the vote becomes 0. If an obstacle on the path is L_{min} meters away or less, then the vote is -1. For obstacles of an intermediate distance, the value is linearly interpolated between 0 and -

1. The voting algorithm in the obstacle avoidance behavior is summarized below:

- for each turn radius choice:
 - if no obstacle lies along the arc (or near it, see below), then set the vote to be 1.0
 - if an obstacle lies at a distance greater than L_{max} , then set the vote to be 1.0
 - if an obstacle lies along the arc at a distance less than L_{min} , then set the vote to be -1.0
 - if an obstacle lies along the arc at a distance less than L_{min} , then set the vote to be -1.0
 - otherwise, set the vote to be: $\frac{L_{max} - L_{obs}}{L_{max} - L_{min}}$, where L_{obs} is the distance between the obstacle and the current vehicle position.

This algorithm will vote against any turn radii that lead to a direct collision with a detected obstacle.

However, it is also desirable to avoid coming unnecessarily close to an obstacle. For this reason, if an arc misses an obstacle, then the distance L_{miss} by which it misses is used to set the vote as follows:

- compute the vote as if a collision were imminent, using the obstacle distance in the algorithm described above
- add to this value the quantity $k_{miss} \cdot L_{miss}$, and take the smaller of that sum and 1.0

The set of values used in the experiments reported in this paper is: $L_{min} = 5.0$, $L_{max} = 20.0$, and $k_{miss} = 0.5$.

4.3 Additional behaviors

Once the ability of the vehicle to avoid collisions is ensured, it is desirable to provide the vehicle with the ability to reach certain destinations; the Goal Seeking behavior provides this capability. This fairly simple behavior uses pure pursuit to direct the vehicle toward a series of user-specified goal points. The outcome of the pure pursuit algorithm is a desired turn radius; this is transformed into a series of votes by applying a gaussian whose peak is at the desired turn radius and which tapers off as the difference between this turn radius and a prospective turn command increases.

Various other auxiliary behaviors that do not achieve a particular task but issue votes for secondary considerations may also be used. These include the Drive Straight behavior, which simply favors going in whatever direction the vehicle is already heading at any given instant, in order to avoid sudden and unnecessary turns; and the Maintain Turn behavior, which votes against turning in directions opposite to the currently commanded turn, and which helps to avoid unnecessary oscillations in steering.

5. Experimental Results

In order to illustrate and evaluate the performance of the system, we conducted a series of runs of the navigation system on our testbed vehicle in natural terrain. We now discuss those experiments in the next Sections. Starting with a description of a one kilometer run, we then analyze the operation of the arbiter and of the behaviors on data collected in a real run and we conclude with an discussion of the limitations – 1.0 Lobs Lmin () – L max Lmin +/() – 12 of the system and of its failure modes.

5.1. System example

Figure 8 and Figure 9 show a typical run of the perception and navigation system. Figure 8 (a) shows the environment in which this experiment takes place. The terrain includes hills, rocks, and ditches. The white line superimposed on the image of the terrain shows the approximate path of the vehicle through this environment. The path was drawn manually for illustrative purpose. Figure 8 (b) shows the actual path recorded during the experiment projected on the average ground plane. In addition to the path, Figure 8 (b) shows the obstacle regions as black dots and the intermediate goal points as small circles.

In this example, the vehicle completed a one kilometer loop without manual intervention at an average speed of 2 m/s. The input to the system was a set of 10 waypoints separated by about one hundred meters on average. Except for the waypoints, the system does not have any previous knowledge of the terrain. Local navigation is performed by computing steering directions based on the locations of untraversable regions in the terrain found in the range images. An estimated 800 images were processed during this particular run.

Figure 9 (a) shows a close-up view of one section of the loop of Figure 9. The black lines show the approximate paths followed by the vehicle in this section. Figure 9 (b) shows the elevation map obtained by pasting together the images taken along the path. The grey polygons are the projections of the fields of view on the ground, the curved grey line is the path of the vehicle on the ground, and the grey dots indicate locations at which images were taken. In this case, the images are separated by approximately two meters.

Finally, Figure 9 (c) shows the local map which is maintained at all time around the vehicle. The squares corresponds to 40x40 cm patches of terrain classified as untraversable regions or obstacles. These local maps are computed from the positions shown in Figure 9 (a) and Figure 9 (b) by the white arrows.

In this experiment, the core system is configured with two behaviors: the obstacle avoidance behavior and the goal seeking behavior. The obstacle avoidance behavior receives a new description of the local map from Ganesha every 100ms. The arbiter combines the votes from the two behaviors and issues a new driving command every 100ms. The goal points are on average 100 meters apart and the goal seeking behavior switches goals whenever it comes within eight meters of the current target goal point. The weights are 0.8 for the obstacle avoidance behavior and 0.2 for the seek goal behavior.

5.2. Arbiter performance

In order to analyze the performance of the arbiter more closely, we recorded additional data on a simple path around a single obstacle. The result of this experiment is shown in Figure 10 and Figure 11.

The lower part of Figure 10 shows the path of the vehicle, shown as a black line, around a set of obstacle points, shown as black dots. In this example, the vehicle was controlled by the steering commands issued by the arbiter. In this experiment, the arbiter was receiving votes from two behaviors, the obstacle avoidance behavior described above, and a heading behavior which forces the vehicle to follow a constant heading. 13

Figure 11 shows the distribution of votes at five points of interest along the path, indicated by capital letters in Figure 10. Each graph depicts the votes issued for each turn choice by the obstacle avoidance and heading behaviors, as well as the weighted sum of these votes as computed by the arbiter. The horizontal axis of each graph shows the possible turn radius choices encoded from -8 m to +8 m.

At point A, the obstacle is first reported and the obstacle avoidance behavior generates high votes for the left turns to go around the obstacle and inhibits the right turns with negative votes, as shown by the solid line in the graph. At the same time, the heading behavior's vote distribution is relatively flat around the straight direction since the vehicle is currently headed in the desired direction; this is shown by the dashed line in the graph. Because of the small relative weight of the heading behavior, the combined vote distribution in the arbiter, shown as a thicker solid line in the graph, is dominated by the votes received from the obstacle avoidance behavior; a left turn is therefore commanded.

At point B, the obstacle is still close to the vehicle and the votes distributions are similar to the ones at A, thus maintaining the vehicle to the left of the obstacle. At point C, the obstacle avoidance behavior is still voting in favor of a sharp left turn, but the votes for the softer left turns is now not as low as it was at A or B, since the vehicle is now clearing the obstacles. At the same time, the heading behavior is starting to shift its votes towards turning right in order to bring the vehicle back to the target heading. The summed votes are still at a maximum for a left turn because of the greater weight of the obstacle avoidance behavior's votes, and so the arbiter continues to steer the vehicle well clear of the obstacles. By the time the vehicle has reached point D, it is just passing the obstacles, so that the obstacle avoidance behavior is now only disallowing extreme right or left turns because of the field of view constraints. The heading behavior is now able to have more influence over the chosen turn

direction, and a right turn is now executed so that the desired vehicle heading is restored. Note that between points C and D, there is a transition period where the turn radius chosen by the arbiter is neither the hard left favored by the obstacle avoidance behavior nor the medium right favored by the heading behavior. Instead, as turns other than hard left become acceptable to the obstacle avoidance behavior, and as the distribution of votes from the heading behavior shift further to the right, the vehicle is commanded to make ever softer left turns, and eventually turns to the right.

As can be seen in the graph of the commanded turn radius in Figure 10, the arbiter exhibits the desired behavior. Namely, rather than abruptly switching modes from avoiding obstacles to following a heading, the arbiter generates a smooth and steady transition as the situation gradually changes.

5.3. Limitations and failure modes

A fundamental limitation of the system is its inability of dealing with dead-ends such as a closed corridor with a depth greater than the field of view of the sensor. Because the system deals only with a local representation of the terrain, it is incapable of dealing with this type of situations of a more global nature. In particular, in the experiment of 5.2 it is clear that the vehicle can easily run into a dead-end situation by using the simple goal-seeking behavior, which is why multiple intermediate goal points are used rather than a single global goal. In fact, this is by far the most common failure mode of the system. This limitation can be addressed by adding to the system another behavior which uses knowledge about the global representation of the terrain in order to plan appropriate vehicle paths. In this approach, the perception, local map, and obstacle avoidance modules are responsible for local navigation, while the 14 other modules are responsible for global navigation.

As mentioned earlier, the speed of the vehicle is in large part limited by the maximum range of the sensor and by the image acquisition rate which introduces a minimum 500ms latency between the time an object enters the field of view of the sensor and the time the corresponding image is fully acquired. The effective steering radius of the vehicle is limited by the 80° horizontal field of view of the sensor. The detection range is limited by the angular

resolution of the scanner. These three limitations can be addressed only by using other sensors. We investigating the use of fast single-scan laser range finders and of passive stereo.

Because the system is implemented as a distributed system communicating through the standard Unix network facilities, there are no guarantees on the delays involved in sending messages between the modules. In practice, these delays are compounded into a significant latency between the time an object appears in the field of view of the sensor and the time a steering command is actually executed by the controller. Although the latency varies, we have observed latency as high as one or two seconds. This problem is being addressed by combining the modules in a way that is more suitable to predictable scheduling, and by porting the system to a real-time operating system.

6 Conclusion

We have presented a navigation system based on early evaluation of terrain traversability. We have demonstrated this system in a one kilometer traverse of unmapped cross-country terrain. This experiment demonstrates: the robustness of the approach; its ability to accommodate additional driving behaviors in addition to the basic obstacle avoidance behaviors, such as driving toward intermediate goal points; and its ability to compensate for constraints imposed by the sensing system, such as the limited field of view of the sensor. This is achieved by: reducing the amount of computation required by the perception system; simplifying local map management and path planning; hiding the details of sensing from all the modules except perception; and avoiding the problems caused by merging multiple terrain maps using inaccurate position estimates.

The drawback of this approach is that an error in the perception system may propagate unchallenged through the system because only the perception module has access to the sensor data. This problem is addressed by using a fast reactive path planner and a simple perception algorithm with fast cycle time relative to vehicle speed, both of which allow the system to correct quickly for occasional perception errors, and by incorporating a history mechanism in the local map manager which eliminates false positive detection.

The main limitations of the system are the limited range and speed of the sensor, the non-real-time nature of the system which is implemented on conventional Unix workstations using standard networking protocol, and the poor performance of perception on certain types of environments, such as vegetation. To address the first limitation, we have conducted preliminary experiments with a passive stereo system, and we are planning to experiment with a fast, single-line range sensor. These new sensor modalities will improve both acquisition rate and maximum range. To address the second limitation, we are planning on porting the critical parts of the system to a real time operating system and to combine parts of the system, such as perception and local map management into a single module with better control over scheduling. We feel that the third class of problems, due to poor reflectivity of surfaces and vegetation, can be addressed only by adding other specialized sensors.

In addition to research on the cross-country navigation system proper, we are continuing the development of the DAMN architecture. In particular, we are developing new approaches to speed which involve a separate speed arbiter and we are investigating ways for the arbiter to interpolate between the reference set of arcs based on the vote distributions from the behaviors. These two improvements will lead to smoother control in both speed and steering.

Acknowledgments

The UGV project is supported by ARPA under contracts DACA76-89-C-0014 and DAAE07-90-C-R059, and by the National Science Foundation under NSF Contract BCS-9120655. Julio Rosenblatt is supported by a Hughes Research Fellowship. The authors wish to thank Jay Gowdy, Bill Ross, Jim Moody, Jim Frazier, George Mueller, and Mike Blackwell for their help in the cross-country navigation experiments. Many thanks to Dave Payton for the advice and support he has provided over the years in the development of the planning system.