



Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

**Instituto de Ciencias Básicas y Aplicadas.
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en
Energías Renovables.**

T E S I S

Implementación de un Sistema Generador de Potencia para Vehículo Accionado por Aire Comprimido

Que para obtener el grado de

Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Presenta

Ing. Luis Enrique Zepeda Ovando

Directores de Tesis

Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz

Dr. Joel Moreira Acosta

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Septiembre de 2016

Agradecimientos.

Agradezco principalmente a mis padres y hermanas por el apoyo moral, ético, emocional y psicológico que me han brindado en todo momento, del mismo modo agradezco enormemente al Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables de la UNICACH, a los doctores que participaron fundamentalmente en la formación académica que tuve durante la maestría:

Dr. Joel Moreira Acosta.

Dr. Joel Pantoja Enriquez.

Dr. Guillermo Ibañez Duarte.

Dr. Andrés Reyes Nava.

Dr. Nein Vázquez Farrera.

Dr. Francisco Pola Albores.

Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz.

Dr. Pascual López de Paz.

Gracias a ellos por compartir su conocimiento y técnicas de enseñanza y aprendizaje.

Finalmente agradezco a la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas por brindarme la oportunidad de estudiar en esta casa de estudios la Maestría en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables.

Índice

Agradecimientos	2
Índice	3
Problemática	7
Objetivos	9
Capítulo 1. Estado del arte.....	10
1.1 Aire comprimido	11
1.2 Almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES).....	13
1.3 Sistemas para el aprovechamiento de la energía del aire comprimido	18
1.3.1 Motores de pistones	19
1.3.2 Turbinas a gas	19
1.3.3 Motores de paletas.....	21
1.4 Aplicaciones del aire comprimido.....	23
1.4.1 Aire comprimido para herramientas neumáticas	25
1.4.2. Vehículo a base de aire comprimido	26
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.....	30
2.1 Presión.....	30
2.2 Procesos para la compresión y expansión del aire comprimido	33
2.3 Sistemas CAES.....	38
2.4 Vehículo a base de aire comprimido	49
2.4.1 Descripción macroscópica de un gas ideal	49
2.4.2 Motores neumáticos	52
2.4.3 Sistema de transmisión de potencia de engranes	55
2.4.4 Vehículo	57
Capítulo 3. Metodología.	60

3.1 Determinación de los parámetros para la implementación de un sistema CAES en un vehículo	60
3.2 Dimensionado energético para mover una masa determinada con la energía almacenada en aire comprimido	62
3.3 Determinación de materiales a utilizar	63
3.4 Diseño de base para soporte del sistema CAES en el vehículo y presentación previa del vehículo hecho a computadora.....	64
3.5 Construcción de base para soportar el sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido	65
3.6 Acoplamiento del sistema de almacenamiento de aire comprimido al sistema generador de potencia.....	65
3.7 Adaptación del sistema CAES en el vehículo	66
3.8 Metodología para la evaluación del prototipo.....	66
3.8.1 Pruebas de arranque	66
3.8.2 Pruebas de velocidad	67
3.8.3 Pruebas de autonomía	67
Capítulo 4. Resultados y discusión.....	69
4.1 Cálculo de potencia para el accionamiento del vehículo.....	69
4.2 Presentación esquemática hecha a computadora del sistema de aire comprimido y su acoplamiento en un vehículo.....	73
4.3 Implementación del sistema de almacenamiento de energía y generador de potencia a base de aire comprimido en el vehículo.....	78
4.3.1 Selección de materiales	78
4.3.2 Proceso de adaptación del sistema CAES en el vehículo	82
4.3.2.1 Ensamble de tanque para aire comprimido en ecotaxi	82
4.3.2.2 Acople del sistema de engranes en el ecotaxi	83
4.3.2.3 Acople del motor neumático de paletas en el sistema de engranes.....	85
4.3.2.4 Acople entre el diferencial del ecotaxi y el sistema de engranes	86
4.3.2.5 Acople entre tanque para aire comprimido y motor neumático de paletas..	88

4.4 Análisis de velocidad.....	89
4.5 Análisis de autonomía.....	97
4.6 Comparación de costos para la compresión de aire por diferentes fuentes de energía	104
5. Conclusiones	109
Referencias	112

Resumen

En esta investigación se aborda el tema de sistemas de aire comprimido como almacenamiento de energía para aplicaciones en vehículos, en este trabajo se muestra el diseño, la construcción y la evaluación de un vehículo que funciona a base de aire comprimido, el objetivo principal de este trabajo es solucionar graves problemas que generan los vehículos actuales en términos energéticos que repercuten en el ambiente, en la sociedad y en la economía.

Durante el proceso de diseño se tomo en cuenta los tipos de tecnologías existentes para aprovechar eficientemente la cantidad de energía almacenada en aire comprimido para la generación de potencia mecánica y la geometría de los distintos componentes de un sistema CAES (por sus siglas en ingles *Compressed Air Energy Storage*) para su implementación en un vehículo.

En la construcción del prototipo se utilizó un vehículo tipo eco-taxi de 3 ruedas, un tanque de almacenamiento de aire comprimido de 3 metros cúbicos a 2000 psi de presión, un motor neumático de 1 caballo de fuerza, un sistema de engranes que transforma la alta frecuencia de movimiento rotatorio de bajo torque a movimiento rotatorio de baja frecuencia y alto torque, una transmisión de potencia mecánica de piñón, corona y cadena, un regulador de presión, un manómetro, manguera para aire a alta presión, válvulas manuales para paso de aire comprimido y abrazaderas. Este trabajo experimental nos permitió conocer la viabilidad de un vehículo a base de aire comprimido utilizando un motor neumático para la generación de potencia mecánica y así comparar esta tecnología con otros tipos de vehículos que funcionan con diferente tipo de energía como combustible para su accionamiento, finalmente nos muestran los siguientes resultados:

El vehículo obtuvo la velocidad máxima de 13.08 cm/s a una presión de 100 PSI y una autonomía máxima de 46 minutos a una presión de 50 PSI utilizando en ambos resultados cargas completas de un tanque de 3 metros cúbicos.

Problemática

La creciente demanda de poseer vehículos por parte de la sociedad conlleva a un gran desarrollo al cabo de mucho tiempo, clasificando como vehículos automotores (vehículos que utilizan combustibles fósiles principalmente), vehículos eléctricos, vehículos de tracción de sangre (utilizan la energía del hombre o de animales para su funcionamiento), vehículos a base de aire comprimido; estos sistemas se utilizan en áreas como transporte de personas, transporte de cargas en todo el mundo y es significativo para el desarrollo de la sociedad [1], sin embargo algunos de estos tipos de tecnologías para dichas aplicaciones presentan graves problemas en términos energéticos que perjudican al ambiente, la economía y la sociedad.

Los vehículos automotores de combustión interna tienen baja eficiencia energética [2], por otra parte el combustible que utilizan es combustible fósil y el costo de este combustible va en aumento, los vehículos eléctricos se encuentran en desarrollo y presentan una eficiencia alta en comparación con los automotores su mayor inconveniente es la utilización de baterías electroquímicas para el almacenamiento de energía, este dispositivo es caro y contaminante, los vehículos de tracción de sangre son para aplicaciones más pequeñas y requieren de gran esfuerzo físico por parte de las personas usuarios o animales, los vehículos a base de aire comprimido están en desarrollo y hasta el momento se utilizan motores de pistones para su accionamiento, los cuales siguen siendo bastante ineficientes ya que se le debe suministrar calor al tanque de aire comprimido para obtener más energía al momento de la liberación del aire [3], este tipo de tecnología se encuentra en investigación y desarrollo se sabe también que se le considera como un sistema de almacenamiento completamente ecológico si se obtiene a partir de fuentes renovables de energía, por tal motivo se investiga el comportamiento de un vehículo con la implementación de un sistema CAES que opere con un motor de paletas para generar potencia mecánica rotatoria para su accionamiento, teniendo en cuenta que termodinámicamente un sistema que opere bajo un ciclo

de trabajo de pistones es menos eficiente que un sistema termodinámico que opere con motores de paletas o turbinas.

Actualmente los sistemas CAES aplicados en vehículos funcionan con motores a pistones, los cuales llegan a obtener eficiencias alrededor del 50%, se sabe que algunos motores neumáticos pueden obtener hasta 70% de eficiencia, por otro lado aun no se ha encontrado la implementación de este tipo de sistemas generadores de potencia en sistemas móviles por lo que la implementación de un sistema CAES que opere con un motor neumático en un vehículo podría permitir un mayor aprovechamiento de la energía.

Objetivos

- Objetivo general:

Implementar un sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) generador de potencia mecánica en un vehículo.

- Objetivos particulares:

1. Diseñar el acople del sistema CAES generador de potencia en un vehículo.
2. Acoplar el sistema CAES dentro del vehículo seleccionado.
3. Evaluar el vehículo a base de aire comprimido en funcionamiento sin carga.

Capítulo 1. Estado del arte

En este capítulo se da a conocer la situación actual de la tecnología del aire comprimido como almacenamiento de energía a nivel mundial. Se inicia con un planteamiento general de lo que es el aire comprimido y algunas de las propiedades que este presenta en su almacenamiento y en su operación. Después de esto nos muestra como tal el sistema de almacenamiento de energía en forma de aire comprimido y se expone la situación que estos sistemas tienen en la actualidad así como los antecedentes históricos más relevantes que estos sistemas de almacenamiento de energía han tenido a lo largo de su descubrimiento y desarrollo hasta hoy en día.

Se muestran los mecanismos por los cuales puede ser aprovechada la energía que se almacena en forma de aire comprimido, estos mecanismos son principalmente los motores a pistones, motores de paletas y turbinas de gas para después explicar en detalle cada uno de estos mecanismos y el modo en que operan, finalmente se tiene el tema de aplicaciones del aire comprimido en donde se aborda las ramas en donde se le da utilidad al aire comprimido desde limpiar, enfriar cosas hasta tareas más complejas como herramientas neumáticas, generar electricidad o desplazar cosas mediante movimiento mecánico y como último subtema de este apartado se informa sobre los vehículos a base de aire comprimido en donde se trata especialmente el desarrollo que han tenido los vehículos a lo largo de los años solo en el campo del aire comprimido para su impulso, se describe como ha sido el desarrollo de estos vehículos y el creador que lo ha hecho posible además de una breve descripción del funcionamiento de dichos vehículos.

1.1 Aire comprimido

El aire comprimido es aire atmosférico que se ha comprimido con un compresor a una presión más alta que la presión atmosférica, un ejemplo claro de la utilización del aire comprimido en nuestras vidas diarias es cuando respiramos, los pulmones comprimen el aire atmosférico para después aprovecharla. En aire está constituido principalmente de oxígeno, nitrógeno y una cantidad de agua lo cual conlleva a tener cierto contenido de humedad que está en dependencia de la temperatura y del posicionamiento terrestre. Se puede almacenar grandes cantidades de energía en aire comprimido de forma segura y fiable, esto se utiliza en todas las ramas industriales en todo el mundo, aproximadamente el 90% de todas las empresas de fabricación de productos utilizan sistemas de aire comprimido de una u otra manera en sus procesos de producción.

El aire comprimido generalmente se produce en el lugar de uso, esto quiere decir que no se suministra por proveedores externos como los que suministran gas, agua, electricidad. Algunas características del aire comprimido es que es limpio de contaminantes, inocuo, fácil de almacenar, fácil de transportar, útil para una gran variedad de aplicaciones industriales, eco eficiente, y económico cuando el método de obtención de este es por medio de energías renovables. El aire comprimido se puede usar para muchos fines, desde la propulsión de herramientas neumáticas para crear movimientos y elevaciones, o para limpiar, desplazar y enfriar materiales. Las principales pérdidas de energía del aire comprimido se debe a fugas, generación de calor y energía en vacío [4].

En la siguiente tabla se muestran las características típicas de calidad y de proceso que requieren los instrumentos y plantas de aire comprimido en las diversas aplicaciones que se le da [2].

Tabla I. Condiciones típicas de calidad y proceso requeridos en instrumentos y plantas de aire comprimido [2].

Fluido	Aire comprimido
Servicio	Planta e instrumentos a aire
Requisitos:	
Condiciones de proceso y diseño	
Presión de operación [barg]	8 - 8.5
Presión de diseño [barg]	12.5
Temperatura de operación [°C]	Ambiente
Temperatura de diseño [°C]	70 grados menos de la temperatura ambiente del lugar*
Calidad	
Tamaño máximo de partícula sólida	< 3 micrómetros
Calidad máxima de contaminantes	0.1 mg/m ³ o 0.08 ppm (w/w)
* - Típicamente la presión de operación es de -25°C o -40°C en atmosferas muy frías.	

El aire comprimido es utilizado ampliamente en la industria, desde los pequeños talleres de maquinado hasta los grandes complejos industriales. En muchos casos el aire comprimido es tan vital que algunas plantas requieren de un sistema de aire comprimido para poder operar. Los sistemas de aire comprimido pueden variar ampliamente en tamaño, desde unidades de menos de 5hp, hasta sistemas de más de 50,000 hp. En muchas plantas industriales los compresores de aire son los mayores consumidores de electricidad, y por tanto las ineficiencias en el sistema de aire comprimido resultan muy costosas. Sin embargo, el personal que utiliza el aire comprimido tiende a pensar que el mismo tiene poco valor, y así, por pensar que se trata de simple aire, por la prácticamente nula peligrosidad de un escape o fuga, es muy frecuente que no se le preste atención a su ahorro y uso adecuado. El mejoramiento de la eficiencia energética en estos sistemas puede permitir la reducción del 20 al 50% del consumo de electricidad de los mismos, lo cual puede significar un gran ahorro en términos energéticos y monetarios. Un sistema de aire comprimido bien operado ahorra energía, reduce el mantenimiento, disminuye contaminantes emitidos a la atmosfera. En los sistemas de aire comprimido se puede diferenciar el lado del suministro, que incluye a los compresores y los equipos de tratamiento de aire, y el lado de la demanda, que está compuesto por

el sistema de almacenamiento y distribución y los equipos de uso final del aire comprimido. Para lograr que un sistema de aire comprimido garantice el suministro estable de aire seco, limpio, a las presiones requeridas y de una forma segura y económica, se requieren acciones tanto del lado del suministro, como del lado de la demanda, así como en sus interacciones [5]. Como todos los sistemas electromecánicos, los sistemas de aire comprimido requieren de un mantenimiento para operar con máxima eficiencia y reducir interrupciones en la operación de estos sistemas, el mantenimiento debe realizarse de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes, aunque en muchos casos tiene sentido acortar los intervalos dados por los fabricantes con el fin de obtener mayor eficiencia y mayor ahorro de energía, se puede inspeccionar y checar en los sistemas de aire comprimido para su mantenimiento, las transmisiones de potencia (comprobar el desgaste y la tensión, ajustarla en caso de ser necesario), la temperatura de operación (verificar que la temperatura coincida con la establecida por el fabricante), posibles fugas (evaluarlas periódicamente, inspeccionar las líneas de conducción, uniones, accesorios, válvulas, mangueras, filtros, lubricadores, conexiones de manómetros, conexiones de reguladores y equipos de uso final para detectar fugas, etc.), niveles de presión y controles del flujo de aire comprimido, sistemas de distribución, equipos de uso final [5].

1.2 Almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES)

La tecnología CAES ha sido considerada para la utilización de energía no sólo en lo que respecta a la gestión de grandes o pequeñas cargas, sino también para el uso de generadores de emergencia durante un corte de energía. Recientemente, en el campo de almacenamiento de energía, los países que cuentan con sistemas CAES han desarrollado pequeñas, medianas y grandes unidades para las funciones de almacenamiento de este tipo de tecnología. Estas unidades se pueden usar para las aplicaciones de doble propósito como son los sistemas de

generación de energía y los suministros suplementarios de calefacción urbana. Estas unidades tienen una caverna subterránea o un tipo de recipiente modular (tanques de almacenamiento de aire comprimido) a grandes y pequeñas presiones. El almacenamiento y la utilización del tiempo del sistema CAES se determina por la potencia de almacenamiento entre el límite inferior y el límite superior de los patrones de la curva de carga durante un día entero [6].

Los esfuerzos para el almacenamiento de energía excedente durante la noche están continuamente en curso, pero en la actualidad estos esfuerzos no han implicado el uso de un método de almacenamiento de energía a gran escala, excepto para la generación de acumulación por bombeo. Situado mayormente en regiones remotas, un sistema de almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo no puede ser satisfecho por los medios, ya que es el único tipo de sistema de almacenamiento ampliamente predominante entre todos los sistemas de energía eléctrica. Por otra parte, los lugares adecuados para un sistema de almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo son limitados y por lo tanto, se desean sistemas de almacenamiento alternativos [7].

Por otra parte, la escala de utilidad de las contribuciones de energía renovable sigue enfrentándose a importantes barreras que dificultan la expansión. La naturaleza intermitente de la radiación solar, el viento y las olas hacen de estas fuentes de energía poco confiables ya que la potencia no se produce siempre cuando se necesita [8].

Por estas razones, el almacenamiento de energía de aire comprimido se ha utilizado como un medio de nivelación de carga. Los CAES se colocan cerca de los consumidores y de las redes de energía eléctrica de las grandes, pequeñas y micro escala. En el almacenamiento de energía de aire comprimido, el aire es comprimido y almacenado bajo presión. Subsecuentemente, la liberación del aire a presión es usada para generar electricidad o movimiento mecánico según sea el caso de aplicación. Este proceso se hace más eficiente realizado en conjunto con una turbina de gas o con un motor de paletas. Los sistemas CAES son una

tecnología de almacenamiento de energía madura para alta potencia y para aplicaciones de nivelación de carga a largo plazo. Los sistemas CAES son una tecnología híbrida de almacenamiento y generación de energía. El compresor opera en el día solar y proporciona electricidad a bajo costo durante la noche o fuera de horas punta de consumo de energía. En los últimos años, la investigación se ha llevado a cabo para mejorar la eficiencia de las turbinas y los mecanismos de transferencia de calor usados para bombear y recuperar aire comprimido [3].

Recientemente, el Instituto Coreano de Maquinaria y Materiales ha producido un establecimiento de investigación mediante la aplicación de un ciclo de Ericsson de una isoterma de compresión/expansión con un Micro-CAES utilizando muy buenas características de transferencia de calor con máquinas de desplazamiento. En particular, el pequeño o Micro CAES está siendo considerado cada vez más como una posibilidad para la generación de energía. Este micro-CAES puede ser el método más alto de almacenamiento de energía, especialmente con la utilización adicional de calor residual (casi igual a la fuerza de almacenamiento) producido en el proceso de compresión de aire. Se espera que el micro-CAES tenga un papel muy importante en las redes de distribución de energía o futuras redes de energía mediante la realización simultánea de almacenamiento y la cogeneración de energía [9].

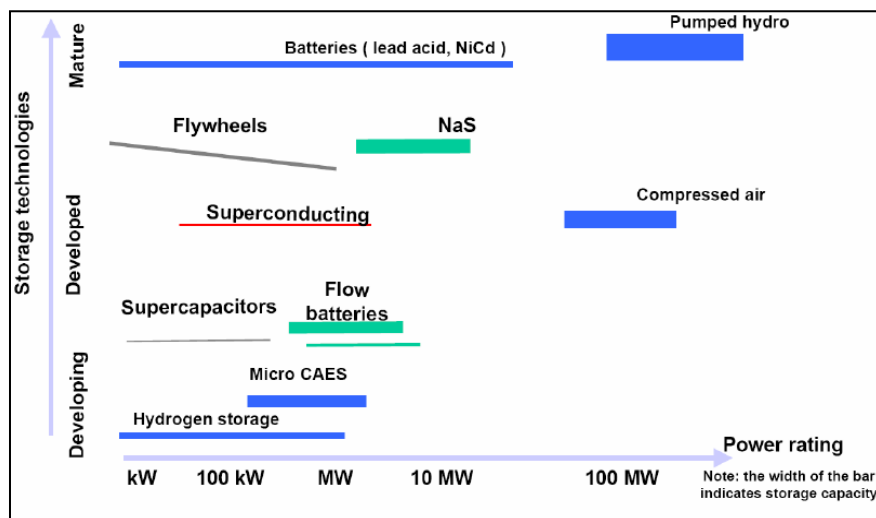


Figura 1. Estado del desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía [6].

La figura 1 representa la relación entre la potencia y la tecnología de almacenamiento para sistemas de almacenamiento de energía tales como almacenamiento de energía en baterías, superconductores, supercapacitores, bombeo hidráulico, almacenamiento de hidrógeno, aire comprimido, etc. [6].

La Tabla II resume y compara varios sistemas de almacenamiento de energía en aspectos de costos, vida útil, densidades de potencia de salida, densidad de almacenamiento de energía y pérdidas de operación para algunos de los parámetros de los sistemas de almacenamiento de energía ya desarrollados [6]:

Tabla II. Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía [6].

Tipo	Densidad de energía (MJ/m ³)	Vida útil (Años)	Vida útil (Ciclos)	Eficiencia energética (%)	Estado de la tecnología
Potencial eléctrico					
Batería de Ion- Litio	594	10	800	85	Desarrollo
Batería NaS	800	10	2500	75	Desarrollo
Baterías (VRB, PSB, ZnBr)	120	30	N/A	80	Desarrollo
Mecánico					
Aire comprimido a 300 bar (CAES)	74	20	N/A	75	Maduro
Bombeo de agua (500 m elevación)	5.4	50	N/A	75	Maduro
Hidrógeno					
Tanque de Hidrógeno 350 bar	3000	N/A	N/A	47	Maduro
Tanque de Hidrógeno 700 bar	5010	N/A	N/A	45	Maduro
Hidrógeno en formaciones geológicas	N/A	N/A	N/A	47	Desarrollo
Tanque de H2 350 bar w/10% CHP	3000	N/A	N/A	51	Desarrollo
Tanque de H2 350 bar w/25% CHP	3000	N/A	N/A	57	Desarrollo
Tanque de H2 350 bar w/50% CHP	3000	N/A	N/A	66	Desarrollo

Los sistemas de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) han sido utilizados en Europa y América durante un poco más de 30 años, una de estas plantas es de 290 MW y se encuentra localizada en Huntorf, Alemania y otra planta de 110 MW está localizada en McIntosh, Alabama, NY; estos sistemas de almacenamiento de energía en aire comprimido son de alta capacidad [10].

Actualmente, se llevan a cabo investigaciones respecto a la implementación de sistemas CAES de pequeña capacidad, los cuales utilizan los tanques de depósito sobre la superficie terrestre y ya no en el subterráneo para almacenar aire comprimido [10].

La estructura de los sistemas de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) es presentada en la figura 2:

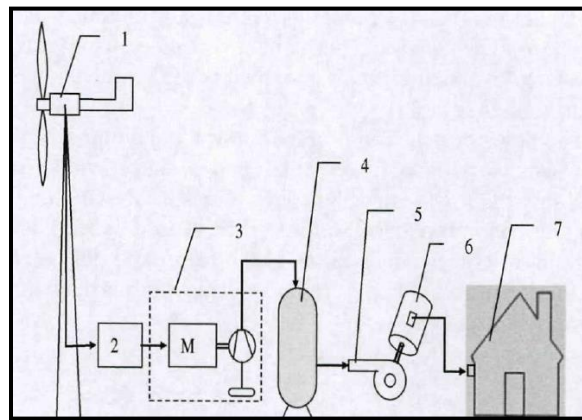


Figura 2. El sistema CAES de pequeña capacidad. 1. Aerogenerador; 2. Inversor; 3. Sistema de compresión; 4. Tanque de almacenamiento; 5. Turbina de gas/motor neumático; 6. Generador eléctrico; 7. Consumidores [10].

Algunos desarrollos que se han realizado y otros que se están haciendo se mencionan a continuación:

Naser M. Jubeh y Yousef S. H. Najjar han discutido y analizado el uso de almacenamiento de energía de aire comprimido con el uso de la alta temperatura de descarga de un compresor. Se calculó el rendimiento para un sistema CAES adiabático y se comparó con los sistemas CAES convencionales. Las variables de operación en dicho estudio son el flujo de masa de aire de descarga, la temperatura del aire ambiente y la relación global de presión. Se evaluó el efecto de estas variables sobre la potencia generada, la relación de la energía, la

eficiencia y otros parámetros de rendimiento. Los resultados mostraron que los sistemas CAES adiabáticos ofrecen una eficiencia relativamente alta de almacenamiento de energía en comparación con la tecnología CAES convencional [1].

Los sistemas CAES tienen la ventaja de ser capaz de funcionar con una gran flexibilidad en pequeña y gran escala, y permite que la red funcione de manera más eficiente, con la reducción de emisiones de contaminantes y de los costos totales. Tiene un largo período de almacenamiento, los bajos costos de capital y se puede utilizar para el suministro de energía en horas pico, nivelación de carga, gestión de la energía, energías renovables y de energía de reserva [10].

1.3 Sistemas para el aprovechamiento de la energía del aire comprimido

En este apartado se dan a conocer los principales sistemas que se utilizan en la actualidad para aprovechar la energía que se almacena en forma de aire comprimido, estos sistemas son los motores de pistones, los motores de paletas y las turbinas de gas.

Los motores de aire comprimido han sido estudiados y usados por décadas como motores de potencia conocidos como herramientas motorizadas neumáticas o motores de aire. Estas herramientas y motores de aire pueden operar en ambientes peligrosos con gases inflamables o gases ácidos donde las herramientas convencionales son inaplicables.

Estas herramientas neumáticas motorizadas o motores se pueden categorizar como pistones y motores de tipo paletas, y estos pueden operar a alta velocidad de rotación de acuerdo con funciones específicas. Las herramientas neumáticas motorizadas para operar a alta velocidad de rotación requieren de una alta velocidad de flujo de aire [11].

1.3.1 Motores de pistones

En la figura 3 podemos observar el sistema de motores a pistones el cual cuenta con un pistón inicialmente en el punto inferior, el cual recibe aire a muy alta presión de un depósito mediante una válvula de admisión.

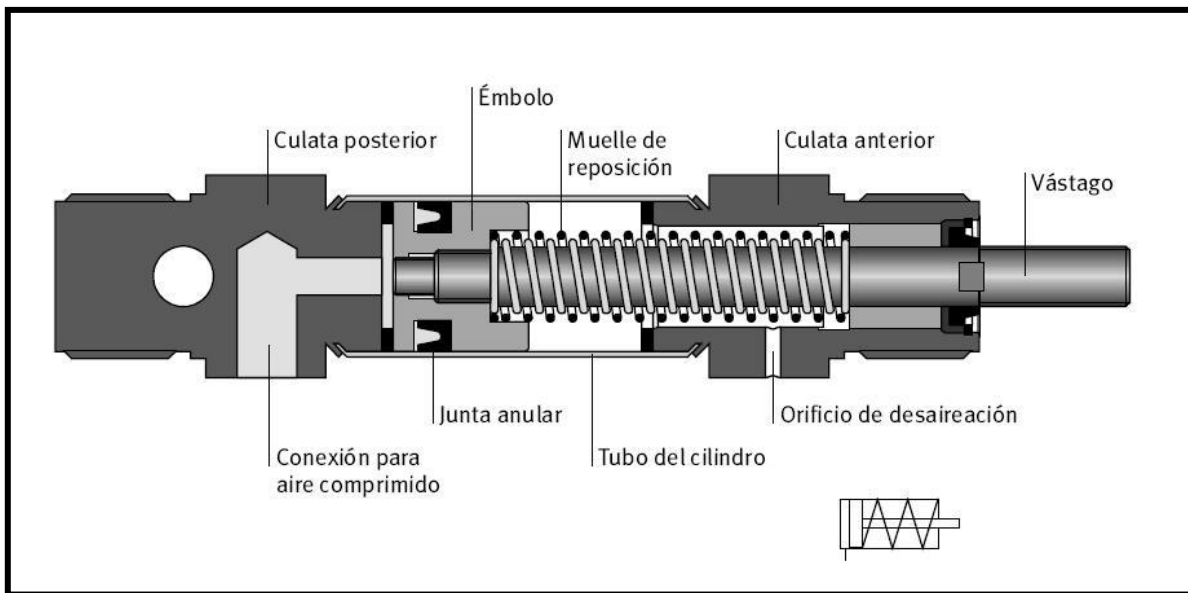


Figura 3. Motor de aire tipo pistón [12].

El pistón empieza a expandirse a lo largo de todo el cilindro hasta llegar al punto superior. A medida que el aire se expande, va perdiendo presión hasta llegar al equivalente de una atmósfera, en este recorrido el aire comprimido ejerce una fuerza, el cual es aprovechado para tirar o jalar de la cadena o banda que va en contacto a una catalina y unido a un resorte en su parte final, este resorte queda estirado y ejerciendo fuerza para cuando se libera el aire por la segunda válvula (válvula de escape), el pistón vuelve a su punto de origen este proceso se repite varias veces completando su ciclo [13].

1.3.2 Turbinas a gas

Se puede decir que antes del año 1940 todas las máquinas térmicas de combustión interna eran del tipo alternativo: émbolo, biela y cigüeñal. Recién,

hacia el año 1940, al lograrse la fabricación de compresores rotativos de alto rendimiento, conjuntamente con los progresos realizados en el campo de la metalurgia, que permitieron la fabricación de aceros refractarios capaces de resistir altas temperaturas, se posibilitó el desarrollo de las turbinas a gas. Fue durante la guerra de 1939 a 1945 que la turbina a gas alcanzó su máxima difusión y desarrollo tecnológico [14].

En el año 1873 GEORGE BRAYTON (1830 – 1892) expuso el principio de funcionamiento del ciclo que lleva su nombre que originariamente se desarrolló empleando una máquina de pistones con inyección de combustible, para luego realizarlo como ciclo abierto simple llamado turbina a gas. Si bien se le llama ciclo termodinámico, en realidad el fluido de trabajo no realiza un ciclo completo dado que el fluido que ingresa es aire y el que egresa son gases de combustión, o sea en un estado diferente al que se tenía cuando se inició el proceso, por eso se dice que es un “ciclo abierto”. Las turbinas a gas son máquinas térmicas rotativas de combustión interna a flujo continuo cuyo esquema se representa en la figura 4:

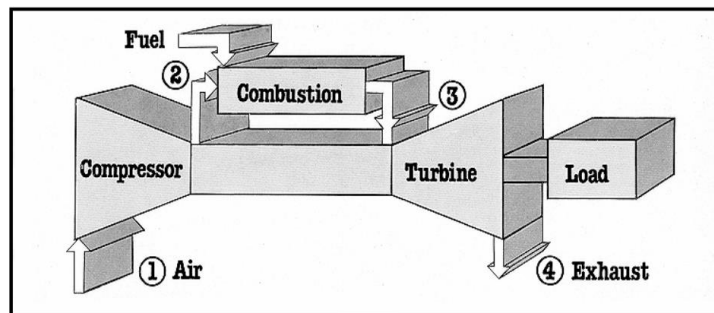


Figura 4. Principio de funcionamiento de una turbina de gas [14].

El objetivo de ésta máquina térmica es convertir energía calórica contenida en el combustible utilizado en energía mecánica (trabajo mecánico) en el eje de la misma.

La máquina acciona una carga la cual se encuentra montada en el eje de la misma. La carga podrá ser de diversos tipos, tales como: un generador eléctrico, una bomba de gran potencia, un compresor, un soplante de aire, la hélice de un navío, etc. Según el tipo de carga de que se trate podrá existir una caja reductora

de velocidad entre la máquina y la carga, en caso de que la carga sea un generador eléctrico. También se aplica con gran éxito como planta propulsora de aeronaves, barcos y vehículos terrestres tales como trenes y automóviles, dada la importante característica que presenta ésta máquina en cuanto a la relación potencia/peso y tamaño que la distingue fundamentalmente de otras máquinas térmicas [14].

1.3.3 Motores de paletas

Estos motores tienen un rotor montado excéntricamente en un cilindro, con paletas longitudinales alojadas en ranuras a lo largo del rotor como se muestra en la figura 5.

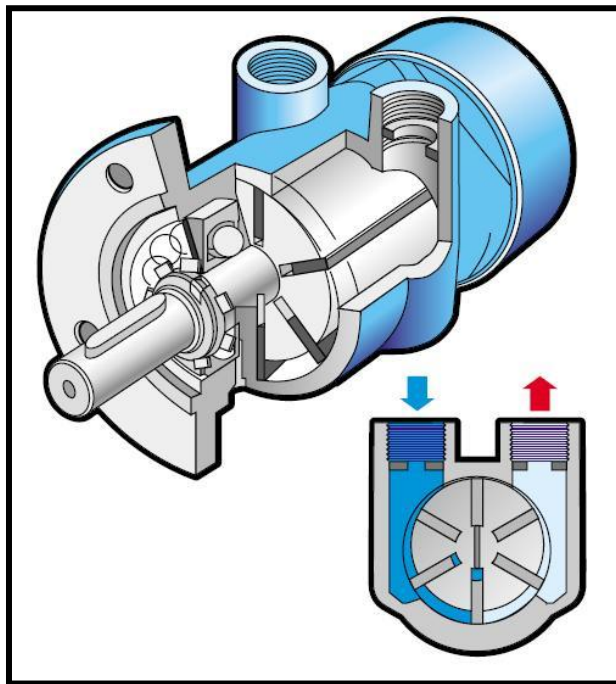


Figura 5. Motor de paletas [12].

El par se origina cuando el aire a presión actúa sobre las paletas. El número de paletas suele ser de 4 a 8. Normalmente cuatro o cinco paletas son suficientes para la mayoría de las aplicaciones. Se utilizan mayor número de paletas cuando

se necesita mejorar la fiabilidad de la máquina y su par de arranque. Los motores de paletas giran desde 3000 a 25000 R.P.M. en vacío. Como norma general, los motores deben trabajar con una precarga para evitar que giren a velocidades altas. Al girar en vacío el motor, el número de veces que las paletas rozan sobre el cilindro es casi doble que en carga. Esto supone un desgaste innecesario de las paletas y de la pared del cilindro sobre la que deslizan. La vida de las paletas se prolongará a varios cientos de horas trabajando el motor a velocidades moderadas y metiendo aire al motor debidamente limpio y lubricado con aceite en suspensión. Los motores de paletas giran a velocidades más altas y desarrollan más potencia en relación con su peso que los motores de pistones, sin embargo tienen un par de arranque menos efectivo. Los motores de paletas son más ligeros y más baratos que los motores de pistones de potencia similar. Son los motores de uso más frecuente [15].

Las características generales de los motores de paletas es que cuentan con un diseño compacto y ligero. Un motor neumático pesa menos que un motor eléctrico de la misma potencia y tiene un volumen más pequeño. Los motores neumáticos desarrollan más potencia con relación a su tamaño que la mayoría de los otros tipos de motores. El par del motor neumático aumenta con la carga. Los motores neumáticos no se dañan cuando se bloquean por sobrecargas y no importa el tiempo que estén bloqueados. Cuando la carga baja a su valor normal, el motor vuelve a funcionar correctamente. Los motores neumáticos, se pueden arrancar y parar de forma ilimitada.

El arranque, el paro y el cambio de sentido de giro son instantáneos, incluso cuando el motor esté trabajando a plena carga. Control de velocidad infinitamente variable, simplemente con una válvula montada a la entrada del motor. Par y potencia regulables, variando la presión de trabajo. Como no hay ninguna parte eléctrica en el motor, la posibilidad de que se produzca una explosión en presencia de gases inflamables es reducida. Cuando el motor gira, el aire expandido enfría el motor. Por esto, los motores pueden usarse en ambientes con temperaturas altas (70 grados centígrados). Mantenimiento mínimo.

El aire comprimido debe estar limpio y bien lubricado, lo que reduce desgastes en el motor y elimina tiempos de parada al alargar la vida del motor. Los motores neumáticos pueden trabajar en cualquier posición. Pueden trabajar en ambientes sucios, sin que se dañe el motor.

1.4 Aplicaciones del aire comprimido

El aire comprimido se utiliza para múltiples operaciones en la industria. Casi todas las industrias poseen al menos dos compresores, y en una planta de tamaño medio, pueden existir cientos de puntos de alimentación de aire comprimido [5].

Dentro de los usos más frecuentes se encuentran las herramientas neumáticas, los equipos de control automático, equipos de empaquetado, transportadores, etc. Los accionamientos neumáticos en determinadas aplicaciones pueden resultar más ligeros y maniobrables que los eléctricos, tienen la capacidad de variación continua de la velocidad y control del torque, no se dañan por sobrecargas, pueden alcanzar la velocidad y el torque de trabajo muy rápidamente [5].

Otras aplicaciones del aire comprimido en la industria incluyen los sistemas de combustión, operaciones en reactores químicos, tales como oxidación, fraccionamiento, deshidratación, aireación, etc. [5].

En las siguientes tablas se muestra algunas de las aplicaciones que se le ha dado al aire comprimido en su utilización en diferentes campos, por ejemplo en la industria de la alimentación se ha utilizado para la deshidratación, embotellado; en la industria de muebles se ha usado para accionamientos neumáticos en herramientas; en la industria química se utiliza para transporte, controles y actuadores, normalmente en la mayoría de las industrias se utiliza para enfriar, empaquetar, limpiar, desplazar materiales, etc.

Tabla III. Usos del aire comprimido [5].

Industria	Ejemplos de usos de aire comprimido
Alimentos	Deshidratación, embotellado, controles y actuadores, transporte, limpieza, envase al vacío
Textiles	Agitación de líquidos, transporte, equipo automático, controles y actuadores
Muebles	Accionamientos neumáticos, herramientas, acabados, controles y actuadores
Pulpa y papel	Transporte, controles y actuadores
Química	Transporte, controles y actuadores
Petróleo	Compresión de gas de proceso, controles y actuadores
Goma y plásticos	Herramientas, controles y actuadores, conformado, inyección de moldes
Vidrio	Transporte, mezclado, controles y actuadores, soplado y moldeado de vidrio, enfriamiento
Fundición	Hornos al vacío, controles y actuadores, izaje
Metal mecánica	Ensamblaje, accionamiento de herramientas, controles y actuadores, inyección de moldes, rociado

Las necesidades del aire comprimido se definen en función de la cantidad, calidad y presión requerida por los equipos de uso final de la planta. Como se observa en la Tabla IV, las calidades del aire comprimido van desde el aire industrial hasta el aire para equipos de respiración [5].

Tabla IV. Calidad y aplicaciones del aire comprimido [5].

Calidad del aire comprimido	Aplicaciones
Aire industrial	Herramientas neumáticas, aplicaciones en planta en general
Aire para instrumentos	Laboratorios, atomización de pintura, climatización
Aire de proceso	Procesos farmacéuticos, fabricación de equipos electrónicos
Aire para equipos de respiración	Sistemas hospitalarios, estaciones de relleno de balones para buceo, etc.

Las aplicaciones industriales típicas abarcan una de las tres primeras categorías. La calidad del aire está determinada por la humedad y nivel de contaminantes máximos admitidos por los de uso final, y la misma se logra mediante equipos de filtrado y secado del aire. Una mayor calidad del aire requiere usualmente de equipos adicionales, lo que no solo eleva el costo inicial de la instalación, sino también los gastos en energía y mantenimiento [5].

Para este trabajo en particular se realiza una búsqueda general del uso del aire comprimido en la rama de aire comprimido para herramientas neumáticas y para el uso en vehículos.

1.4.1 Aire comprimido para herramientas neumáticas

Las herramientas neumáticas están ligadas a los fuelles usados por los herreros y fundidores que utilizaban aire en el proceso para fundir y trabajar los metales. Presionando la manija del fuelle hacia abajo se bombeaba aire presurizado en el fuego para mantener la altura y el calor del mismo. De acuerdo con la enciclopedia británica, el siglo XIX vio muchos desarrollos con las compresoras de aire. En 1829 fue patentada una compresora de etapas y en 1872 fue desarrollado un sistema de enfriamiento utilizando agua para incrementar los efectos enfriadores de los compresores de aire durante la operación [16].

Actualmente en la industria de las herramientas neumáticas se encuentra "Chicago Pneumatic (CP)" cuya historia se remonta 1889.

John W. Duntley tenía en mente la idea de comprar y vender herramientas de construcción que aún no estaban disponibles.

En 1894, fundó la Chicago Pneumatic Tool Company, con una oficina en Chicago. La primera planta que empezó a fabricar productos para CP fue la Boyer Machine Shop en St. Louis, Missouri.

En 1901, Duntley conoció al magnate del acero Charles M. Schwab, quien realizó una fuerte inversión en la empresa CP. El 28 de Diciembre de ese año se patentó el primer martillo neumático mono válvula.

En 1904 fue el año de expansión de CP. Se abrieron oficinas en Inglaterra, Canadá y Alemania, y se diseñaron nuevas líneas de productos, tales como herramientas neumáticas y martillos.

En 1912, CP inicio la fabricación de un motor semi-diesel horizontal de 2 ciclos para accionar sus compresores. Un año después, CP finalizo la válvula Simplate; se eliminó el engranaje del diseño que tenían las válvulas y por ende se consiguió mayor control a altas velocidades y más capacidad.

En 1925, CP fabricó el motor diesel Benz que se utilizó en diversos coches de competición en Europa de aquella época. El mismo año, CP comenzó a fabricar equipos neumáticos de perforación rotativa de pozos de petróleo.

En 1939, CP diseño y fábrico la primera llave de impacto del mundo en versión neumática y eléctrica. En respuesta a la movilización Bélica, CP desarrolló "la máquina de punzonado en caliente", un dispositivo que calentaba remaches a 1000 °F y utilizaba una presión de 100000 libras por pulgada cuadrada para dar forma final a la cabeza del remache [17].

1.4.2. Vehículo a base de aire comprimido

El uso de motores neumáticos, es decir, que funcionan con aire comprimido, no es nada nuevo, ya que en el siglo XIX ya existían locomotoras propulsadas por motores de aire comprimido. Charles B. Hodges fue el primero en aplicar el motor de aire comprimido a un coche. Que además de inventar el coche con motor a aire comprimido tuvo un considerable éxito comercial [18].

En 1925, Louis C. Kiser, de Decatur consiguió convertir un motor de gasolina en un motor de aire comprimido [18].

En 1926, Lee Barton Williams de Pittsburg, invento un motor híbrido que arrancaba con gasolina, pero que al llegar a la velocidad de 10 millas/hora se apagaba y empezaba a funcionar con aire [18].

En 1934, Johannes Wardenier de 21 años, anunció el desarrollo del primer automóvil sin combustible del mundo. Durante semanas los periódicos Holandeses

divulgaron la increíble invención que cambiaría el mundo para siempre. Poco después de la divulgación de la noticia, Johannes fue misteriosamente encarcelado en una institución mental, el diseño del motor fue robado y el fue puesto bajo vigilancia constante sin permitirle ver nunca a nadie. Tiempo después, cuando su idea de un motor que funcionaba con aire ya había sido olvidada, Johannes es enviado a un campo de concentración donde permaneció hasta poco tiempo antes de su muerte. Según su diseño el aire caliente era presionado en un motor que contenía un número de cilindros, la mitad de los cilindros bajaban cuando el resto de los cilindros subían y como en un motor ordinario, el cigüeñal forzaba un movimiento rotatorio. La diferencia principal a un motor de combustión interna convencional es que el aire después de formar su ciclo al pasar por los cilindros, este volvía a pasar de nuevo mediante la ayuda de un compresor provocando una circulación continua y generando un movimiento perpetuo durante tres meses [18].

Otro antecedente del vehículo a base de aire comprimido se debe al ingeniero Armando Regusci, quien lleva más de veinte años desarrollando vehículos en los que se almacena la energía que les permite moverse en forma de aire comprimido en unos tanques instalados en el vehículo. Un sistema de almacenamiento de energía económico y sostenible. siempre y cuando el compresor utilizado para comprimir el aire se accione por medio de las energías renovables ya que si se utiliza un compresor a base de combustible fósil, electricidad convencional o planta nuclear no se obtendrán buenos resultados. Primero construyó un vehículo que funcionaba con transmisión hidrostática y giróscopo, con el que tuvo problemas con algunas empresas que no querían que funcionara, de este modo le compraron la mayoría de las acciones diciéndole que se desarrollaría el proyecto cuando en realidad querían pararlo. Después de esto observó e investigó en el campo del aire comprimido como almacenamiento de energía y se dio cuenta de que era mucho mejor que el proyecto anterior. Con este proyecto llegó a trabajar en la Universidad de Nort Texas, hasta que el Departamento de Energía mando a detener el proyecto. Su proyecto funcionaba de la siguiente manera: para

comprimir el aire utilizaba un motor aerogenerador y de este modo podía obtener de 200 a 1000 bares de presión, 1000 kilos por centímetro cuadrado (las mismas presiones que los vehículos de hidrógeno), energía suficiente con la que se podía realizar hasta 500 km con una sola carga de aire comprimido, esto comparado con un compresor casero se pueden llenar tanques en un tiempo de veinte minutos y recorrer 100 kilómetros de distancia. Las velocidades que alcanzan los vehículos que el desarrolló alcanzan velocidades iguales e incluso mayores que la de los vehículos tradicionales. Como regulador de velocidad el utilizaba un microprocesador que va abriendo y cerrando electroválvulas, estos vehículos no necesitan caja de cambios ni embrague, solo un pequeño microprocesador con un chip que se programa para controlar un pedal de acelerador, un pedal de freno y otro pedal de marcha atrás. Los vehículos que desarrollo este ingeniero se muestran en la figura 6 y son muy sencillos de manejar, muy eficientes, silenciosos y con las mismas prestaciones que puede tener cualquier vehículo tradicional [18].

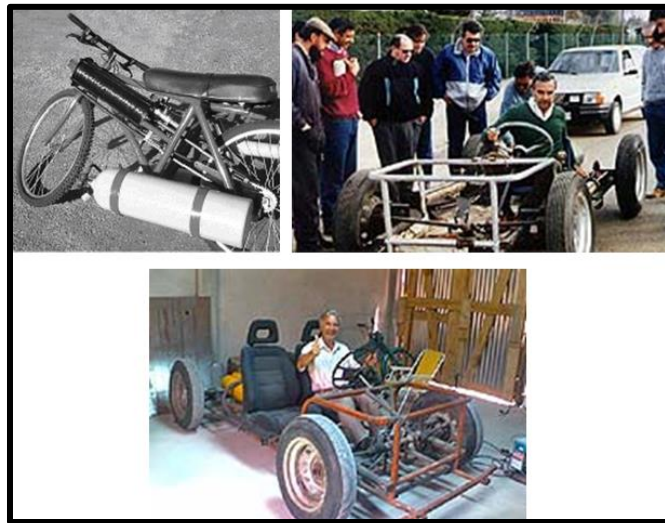


Figura 6. Vehículos a base de aire comprimido por el Ing. Armando Regusci [18].

Una empresa que actualmente se dedica al desarrollo de la tecnología de motores de aire comprimido es la EngineAir Pty Ltd. Australia. A diferencia de los motores de aire convencionales, el motor de EngineAir, inventado por Angelo Di Pietro, prácticamente ha eliminado el desgaste y el rozamiento entre las partes del motor

ofreciendo de este modo un rendimiento superior en una gran variedad de aplicaciones. El motor de Di Pietro es excelente y versátil comparando con otros tipos de tecnologías, este motor ofrece un gran par a bajas revoluciones, rendimiento superior y peso mínimo. Las ventajas que proporciona sobre otras tecnologías son las siguientes: funciona con aire comprimido, diseño revolucionario, una pequeña fracción del peso de motores de pistones, gran potencia, gran eficiencia, se recarga en minutos, no necesita combustibles, no produce humo, no requiere baterías costosas ni sustituciones [18].

En la figura 7 se presentan algunas imágenes reales y diseños por computadora de este tipo de tecnología:

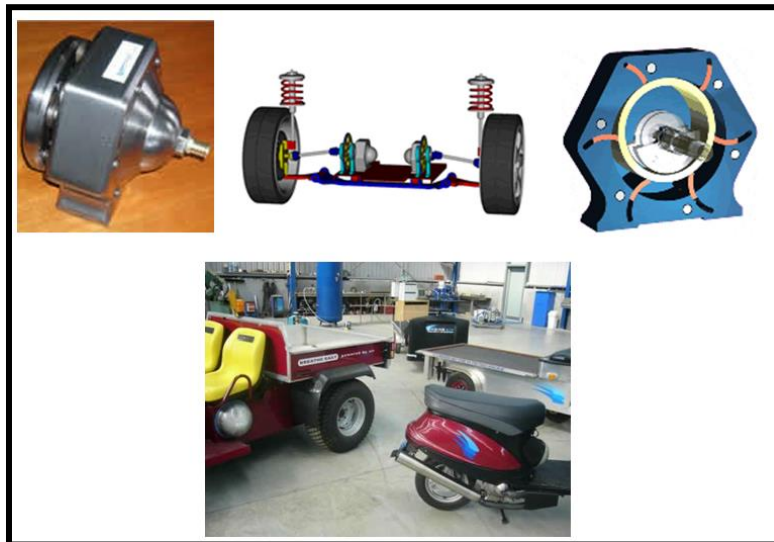


Figura 7. Diseño de tecnología de motores y vehículos a base de aire comprimido por EngineAir [18].

Otro coche de aire comprimido interesante es el modelo Coreano de Energine, es el denominado Pneumatic Hybrid electric Vehicle, PHEV (Vehículo Híbrido eléctrico neumático). El motor de aire comprimido se utiliza en los momentos en que se requiere gran cantidad de energía, por ejemplo al arrancar y acelerar, el motor eléctrico entra en función para mantener la velocidad constante, por lo que requiere menor cantidad de energía que un vehículo puramente eléctrico [18].

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se describe los principios para accionar un vehículo con aire comprimido; iniciando con la teoría del almacenamiento del aire comprimido continuando principalmente en los temas de compresión de aire por medio de los procesos adiabático y politrópico; siguiendo con la teoría de los sistemas CAES haciendo énfasis en el funcionamiento de los diferentes dispositivos que integran un sistema CAES como son compresor, sistemas de almacenamiento de aire, sistemas de aprovechamiento del aire comprimido en expansión como puede ser turbinas, motores de pistones y motores de paletas, y finalmente la carga que para este caso específico es el movimiento de un vehículo; después se tratarán los fundamentos mecánicos de la transformación de la energía cinética del fluido hacia el movimiento de desplazamiento del vehículo tomando como principales temas las siguientes etapas en el funcionamiento de los vehículos a base de aire comprimido: fluido - motor neumático, motor neumático - sistema de engranes, sistema de engranes - vehículo y finalmente termina el capítulo con una conclusión general de los fundamentos teóricos que abalan el presente proyecto.

2.1 Presión

La presión se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. Se habla de presión sólo cuando se trata de gas o líquido, mientras que la contraparte de la presión en los sólidos es el esfuerzo normal. Puesto que la presión se define como la fuerza por unidad de área, tiene como unidad el *newton por metro cuadrado* (N/m^2), también conocida como *pascal* (Pa). Es decir,

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

La unidad de presión pascal es demasiado pequeña para las presiones que se suscitan en la práctica. De ahí que sus múltiplos *Kilopascal* ($1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$) y

Megapascal ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$) se usan más comúnmente. Otras tres unidades de presión de uso extendido, principalmente en Europa, son *bar*, *atmosfera estándar* y *kilogramo fuerza por centímetro cuadrado*:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} = 0.9807 \text{ bar} = 0.9679 \text{ atm}$$

Observe que las unidades de presión *bar*, *atm* y *kgf/cm²* son casi equivalentes entre sí. En el sistema inglés, la unidad de presión es la *libra fuerza por pulgada cuadrada* (*lbf/pulg²*, o *psi*), y $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psi}$. Las unidades de presión *kgf/cm²* y *lbf/pulg²* también se denotan por *kg/cm²* y *lb/pulg²*, respectivamente, y se usan regularmente en medidores de presión de llantas. Se puede demostrar que $1 \text{ kgf/cm}^2 = 14.223 \text{ psi}$.

La presión también se usa para sólidos como un sinónimo de esfuerzo normal, el cual es la fuerza que actúa perpendicularmente a la superficie por unidad de área. Por ejemplo, una persona de *150 libras* cuya área total de *50 pulg²* dejada por la huella de su zapato ejerce una presión en el piso de $150 \text{ lbf}/50 \text{ pulg}^2 = 3.0 \text{ psi}$. Si la persona se apoya en un pie, la presión se duplica. Si la persona aumenta de peso, es probable que sienta incomodidad en el pie como resultado del aumento de presión (el tamaño de la superficie del pie no aumenta con la ganancia de peso). Esto explica también por qué una persona puede caminar en la nieve recién caída sin hundirse si usa raquetas para nieve grandes, y por qué si una persona usa un cuchillo afilado puede cortar con poco esfuerzo.

La presión real en una determinada posición se llama presión absoluta, y se mide respecto al vacío absoluto (es decir, presión cero absoluta). Sin embargo, la mayor parte de los dispositivos para medir la presión se calibran a cero en la atmosfera, por lo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica local; esta diferencia es la presión *manométrica*. Las presiones por debajo de la

atmosférica se conocen como presiones de vacío y se miden mediante medidores de vacío que indican la diferencia entre las presiones atmosféricas y absoluta. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío son todas positivas y se relacionan entre sí mediante:

$$P_{manométrica} = P_{abs} - P_{atm} \quad (1)$$

$$P_{vacío} = P_{atm} - P_{abs} \quad (2)$$

dónde:

P_{abs} es la presión absoluta y

P_{atm} es la presión atmosférica.

Al igual que otros medidores de presión, el usado para medir la presión del aire en una llanta de automóvil indica la presión manométrica, de manera que una lectura común de 32 psi (2.25 kgf/cm^2) indica una presión de 32 psi por arriba de la presión atmosférica.

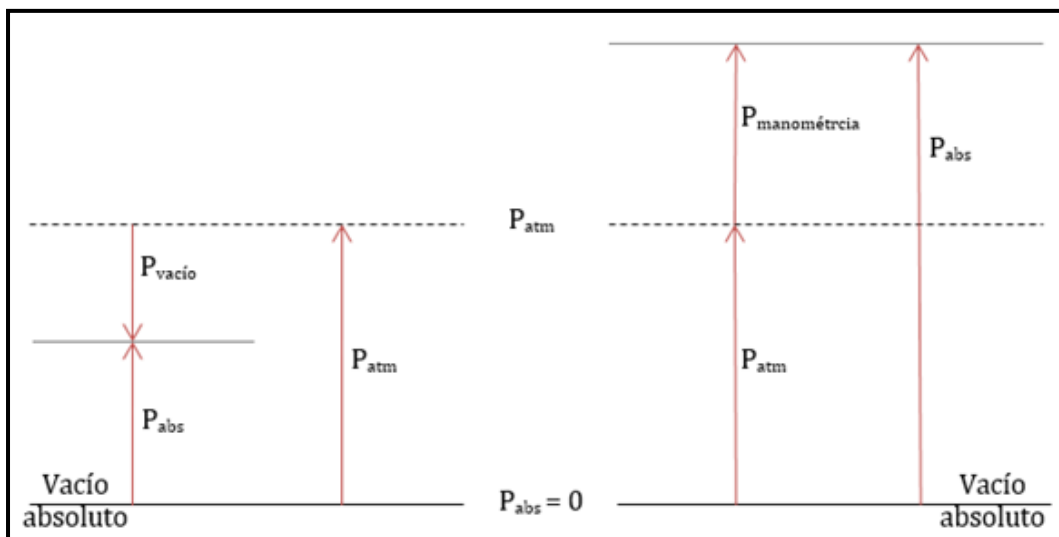


Figura 7. Presiones absoluta, manométrica y de vacío [19].

La presión es la fuerza de compresión por unidad de área y de la impresión de ser un vector. Sin embargo, la presión en cualquier punto de un fluido es la misma en

todas direcciones, es decir, tiene magnitud pero no dirección específica y por lo tanto es una cantidad escalar [19].

2.2 Procesos para la compresión y expansión del aire comprimido

El trabajo es la energía transferida cuando una fuerza actúa sobre un sistema a lo largo de una distancia. La forma más común de trabajo mecánico es el trabajo de frontera, que es el trabajo relacionado con la expansión y compresión de sustancias. En un diagrama P-V, el área bajo la curva del proceso representa el trabajo de frontera para un proceso de cuasi-equilibrio [20]. Varias formas de trabajo de frontera se expresan como:

1) General

$$W_b = \int_1^2 P dV \quad (3)$$

dónde P es la presión y dV es la variación de volumen.

2) Proceso isobárico

$$W_b = P_0 V_2 - V_1 \quad (P_1 = P_2 = P_0 = \text{constante}) \quad (4)$$

dónde V_1 y V_2 son los volúmenes inicial y final respectivamente.

3) Proceso politrópico

$$W_b = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - n} \quad (n \neq 1) \quad (PV^n = \text{constante}) \quad (5)$$

4) Proceso isotérmico de un gas ideal

$$W_b = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = mRT_0 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (PV = mRT_0 = \text{constante}) \quad (6)$$

dónde T_0 es la temperatura ambiente y m es la masa.

Proceso politrópico

Durante procesos reales de expansión y compresión de gases, la presión y el volumen suelen relacionarse mediante $PV^n = C$, donde n y C son constantes. Un proceso de esta clase se llama proceso politrópico. A continuación se desarrolla una expresión general para el trabajo realizado durante un proceso politrópico [20]. La presión para un proceso de este tipo se puede expresar como:

$$P = CV^{-n} \quad (7)$$

Al sustituir esta relación en la ecuación general de trabajo se obtiene:

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 CV^{-n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad (8)$$

dato que $C = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$. Para un gas ideal ($PV = mRT$), esta ecuación se puede escribir también como:

$$W_b = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad n \neq 1 \quad (\text{Kj}) \quad (9)$$

Para el caso especial de $n = 1$, el trabajo de frontera se convierte en:

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 CV^{-1} dV = PV \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (10)$$

Proceso de expansión isotérmica de un gas ideal

Suponga que le permite a un gas ideal expandirse cuasi-estáticamente a temperatura constante. Este proceso se describe mediante el diagrama PV que se muestra en la figura 9.

La curva es una hipérbola, y la ley de gas ideal con T constante indica que la ecuación de esta curva es $PV = constante$. El trabajo consumido en el gas se conoce por la ecuación del trabajo invertido en un gas, ya que el gas es ideal y el

proceso es cuasi estático, la ley del gas ideal es válida para cada punto en la trayectoria.

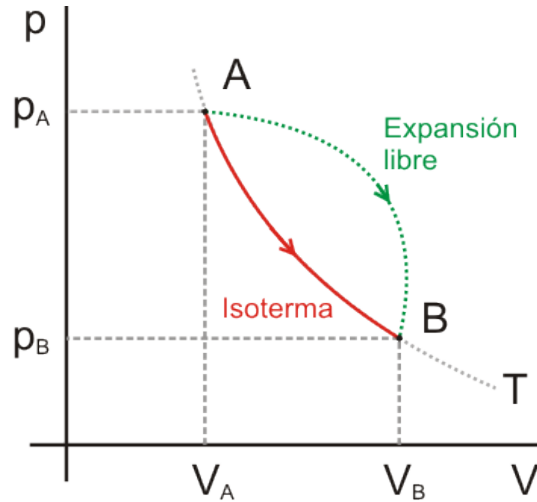


Figura 9. Diagrama PV para una expansión isotérmica de un gas ideal desde un estado inicial hasta un estado final. La curva es una hipérbola.

Debido a eso:

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV \quad (11)$$

Ya que T es constante en este caso, se puede retirar de la integral junto con n y R :

$$W = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -nRT \ln V \Big|_{V_i}^{V_f} \quad (12)$$

Para evaluar la integral, use $\int (dx/x) = \ln x$.

Evaluar el resultado en los volúmenes inicial y final produce:

$$W = nRT \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right) \quad (13)$$

En términos numéricos, este trabajo W es igual al negativo del área bajo la curva PV que se exhibe en la Figura 9. Porque el gas se expande, $V_f > V_i$ y el valor para el trabajo consumido en el gas es negativo, si el gas se comprime, en tal caso $V_f < V_i$ y el trabajo consumido en el gas es positivo [21].

Proceso adiabático para un gas ideal.

Un proceso adiabático es aquel en el que no se transfiere energía por calor entre un sistema y sus alrededores. Por ejemplo, si un gas se comprime (o se expande) rápidamente, muy poca energía se transfiere afuera (o dentro) del sistema por calor, así que el sistema es casi adiabático. Tales procesos se presentan en el ciclo de un motor a gasolina. Otro ejemplo de un proceso adiabático es la lenta expansión de un gas que está térmicamente aislado de sus alrededores. Las tres variables en la ley de gas ideal (P, V y T) cambian durante un proceso adiabático, se muestra en la figura 10 [20].

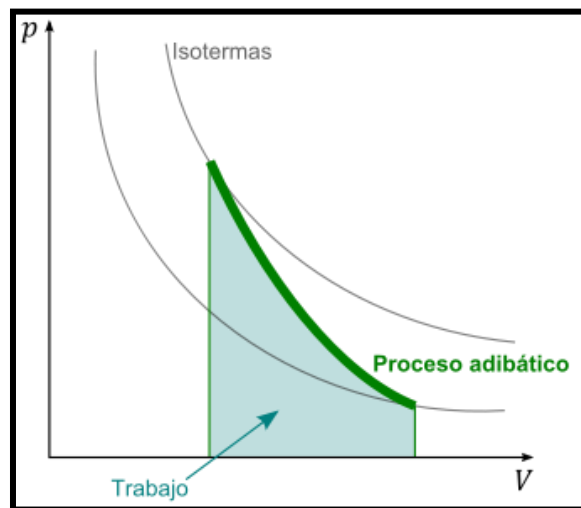


Figura 10. Diagrama PV para una expansión adiabática de un gas ideal [22].

Imagina un proceso adiabático de un gas que incluye un cambio infinitesimal en volumen dV acompañado de un cambio infinitesimal de temperatura dT , el trabajo consumido en el gas es $(-PdV)$. Ya que la energía interna de un gas ideal sólo depende de la temperatura, el cambio en la energía interna en un proceso

adiabático es el mismo que para un proceso isovolumétrico entre las mismas temperaturas, $dE_{int} = nC_v dT$ [22]. Por tanto, la primera ley de la termodinámica, $\Delta E_{int} = Q + W$, con $Q = 0$ se convierte en:

$$dE_{int} = nC_v dT = -PdV \quad (14)$$

Al tomar la diferencial total de la ecuación de estado de un gas ideal, $PV = nRT$, da:

$$PdV + VdP = nRdT \quad (15)$$

Al eliminar dT de estas dos ecuaciones, se encuentra que:

$$PdV + VdP = -\frac{R}{C_v} PdV \quad (16)$$

Al sustituir $R = C_p - C_v$ y dividir entre PV produce:

$$\frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = -\left(\frac{C_p - C_v}{C_v}\right) \frac{dV}{V} = (1 - \gamma) \frac{dV}{V} \quad (17)$$

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 \quad (18)$$

Al integrar esta expresión, se tiene:

$$\ln P + \gamma \ln V = \text{constante} \quad (19)$$

que es equivalente a:

$$PV^\gamma = \text{constante} \quad (20)$$

El diagrama PV para una expansión adiabática se muestra en la figura anterior, ya que $\gamma > 1$, la curva PV es más pronunciada de lo que sería para una expansión isotérmica. Por definición de un proceso adiabático, no se transfiere energía por calor hacia adentro o hacia afuera del sistema. Por lo tanto a partir de la primera ley, se ve que ΔE_{int} es negativo (el trabajo se consume *por* el gas, así que su energía interna disminuye) y por eso ΔT también es negativo. En consecuencia, la temperatura del gas disminuye ($T_f < T_i$) durante una expansión adiabática. Por el contrario, la temperatura aumenta si el gas se comprime adiabáticamente [22].

Al aplicar la ecuación anterior a los estados inicial y final, se ve que:

$$P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma \quad (21)$$

Al aplicar la ley del gas ideal, la ecuación se expresa como:

$$T_i V_i^{\gamma-1} = T_f V_f^{\gamma-1} \quad (22)$$

2.3 Sistemas CAES

El almacenamiento de un gas en un determinado volumen es una tecnología de almacenamiento de energía probada, capaz de almacenar energía en forma de aire comprimido dentro de un volumen.

Las plantas Huntorf y Alabama utilizan esta tecnología para almacenar energía eléctrica durante las horas de carga máxima comprimiendo aire dentro de un volumen y después usando este aire comprimido en la operación de una turbina de gas para generar electricidad durante las horas picos de demanda de carga. La operación de un almacenador de energía típico de aire comprimido a base de plantas de turbinas de gas implica el funcionamiento de varios componentes, incluye principalmente el compresor, el volumen para almacenar, el quemador, la

turbina, etc. La dinámica de toda la planta depende del rendimiento de sus componentes individuales [23].

Uno de los principales retos en el funcionamiento de red es equilibrar la carga y la generación de una forma económica. La diferencia entre la demanda de carga y la generación es altamente fluctuante especialmente con el incremento de la penetración de las fuentes de energías renovables. Las fuentes renovables de energía son intrínsecamente intermitente en la naturaleza y generalmente tienen una baja densidad de poder. Hay una necesidad de almacenar energía durante las horas de baja demanda y después suministrar la energía durante las horas pico de carga. Esto podría aliviar la necesidad de tener la capacidad de extra generación y reserva de energía durante las horas pico. Esto puede reducir el costo de la generación de electricidad pico demandada [23].

Una planta de almacenamiento de energía en aire comprimido es una planta de turbinas de gas modificada en la cual la operación del compresor y de la turbina están desfasadas con el fin de lograr una mejor eficiencia en la generación de potencia. El compresor funciona fuera de las horas pico o por medio de las fuentes renovables de energía, ya que de ese modo se obtiene un bajo costo para comprimir el aire y almacenarlo en un tanque a alta presión. Cuando la turbina se encuentra funcionando el primer paso es calentar el aire comprimido en una cámara de combustión y después se extrae la energía del aire por medio de la turbina. Los sistemas de almacenamiento de energía en aire comprimido conducen a un incremento de la eficiencia en la generación de potencia debido al desfase o desacople de la operación del compresor y de la turbina. En particular los sistemas CAES proporcionan la flexibilidad para almacenar aire comprimido usando energías renovables o usando la red nacional fuera de horas punta [23].

Actualmente se están desarrollando investigaciones científicas en sistemas adiabáticos de almacenamiento de energía en aire comprimido en la cual el calor perdido durante la refrigeración intermedia y postenfriamiento del compresor es almacenado y después reusado para precalentar el aire durante la operación de la

turbina. El calor térmico perdido puede también ser almacenado en materiales de cambio de fase [19].

Luego la turbina puede ser operada con el precalentamiento del aire sin necesitar de una cámara de combustión. Esto incrementaría en gran medida la eficiencia de operación de una planta de almacenamiento de energía de aire comprimido y significativamente reducir la emisión de CO₂. Sin embargo existen varios desafíos a lograr antes de llevar a cabo una operación exitosa de una de estas plantas así como modelarlas [23].

Es esencial modelar las cámaras de combustión para un sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido basado en turbinas de gas para evaluar el rendimiento de diferentes combustibles en la eficiencia total de la planta, por ejemplo el uso de biocombustibles puede ser una alternativa muy atractiva y también aumenta el uso de las fuentes renovables de energía.

En cuanto al rendimiento de la turbina puede existir un cambio el cual está en dependencia del rendimiento de la cámara de combustión. Los gases de escape fluyen a través de la turbina y por lo tanto las propiedades de la turbina deben estar basadas sobre la composición de los gases de escape. Por lo tanto, un modelo detallado de un sistema de almacenamiento de energía es esencial para obtener un mejor entendimiento del diseño de una planta de almacenamiento de energía en aire comprimido. Un buen modelo permite identificar y optimizar elecciones y diseños de cada componente individual. Además las áreas claves de pérdida de calor y de energía pueden ser identificadas y por lo tanto algún diseño alternativo se puede proponer un diseño para que recupere el calor perdido. También el rango de condiciones óptimas de operación para lograr un buen rendimiento de la planta CAES pueden ser identificadas [23].

La clave está en determinar cada componente individual y su interacción con el resto de los componentes para después ser ensamblados para llegar a ser un componente particular y característico del diseño de una planta CAES. Por ejemplo, la variación de la temperatura dentro del compresor, de la turbina y de la

cámara de combustión es enorme y por tal razón es que el modelo del diseño de cada componente individual debe ser realizado para que operen con la capacidad de calor específico variable.

Para el diseño de la turbina se toma en consideración el calor específico de los gases de escape a la salida de la cámara de combustión. Similarmente, el calor perdido en el tanque de almacenamiento se toma en consideración.

Estudios anteriores indican que para hacer un modelo preciso de transferencia de calor se requiere de estudiar la dinámica del tanque de almacenamiento durante la operación de la planta. Las cámaras de combustión son precisamente modeladas dentro de un marco dimensional cero para modelar la cinética química para producir información importante sobre la combustión completa de combustibles dentro de la cámara de combustión [23].

Operación de una planta de almacenamiento de energía en aire comprimido

Una planta de almacenamiento de energía en aire comprimido está constituida principalmente de (I) compresor, (II) motor-generador, (III) turbina de gas, (IV) tanque de almacenamiento de aire comprimido, (V) cámara de combustión [23].

Durante la operación del compresor, el aire es tomado del ambiente y comprimido en un tanque por medio del compresor. Conforme se introduce aire en el tanque de almacenamiento la presión dentro del tanque incrementa. El compresor es operado hasta que la presión dentro del tanque llega a su límite establecido. Típicamente la operación del compresor es realizada en dos etapas las cuales son de alta presión (HP) y baja presión (LP) con el fin de aumentar la eficiencia total del sistema.

La figura 11 muestra el esquema típico de una planta CAES basado en turbinas de gas.

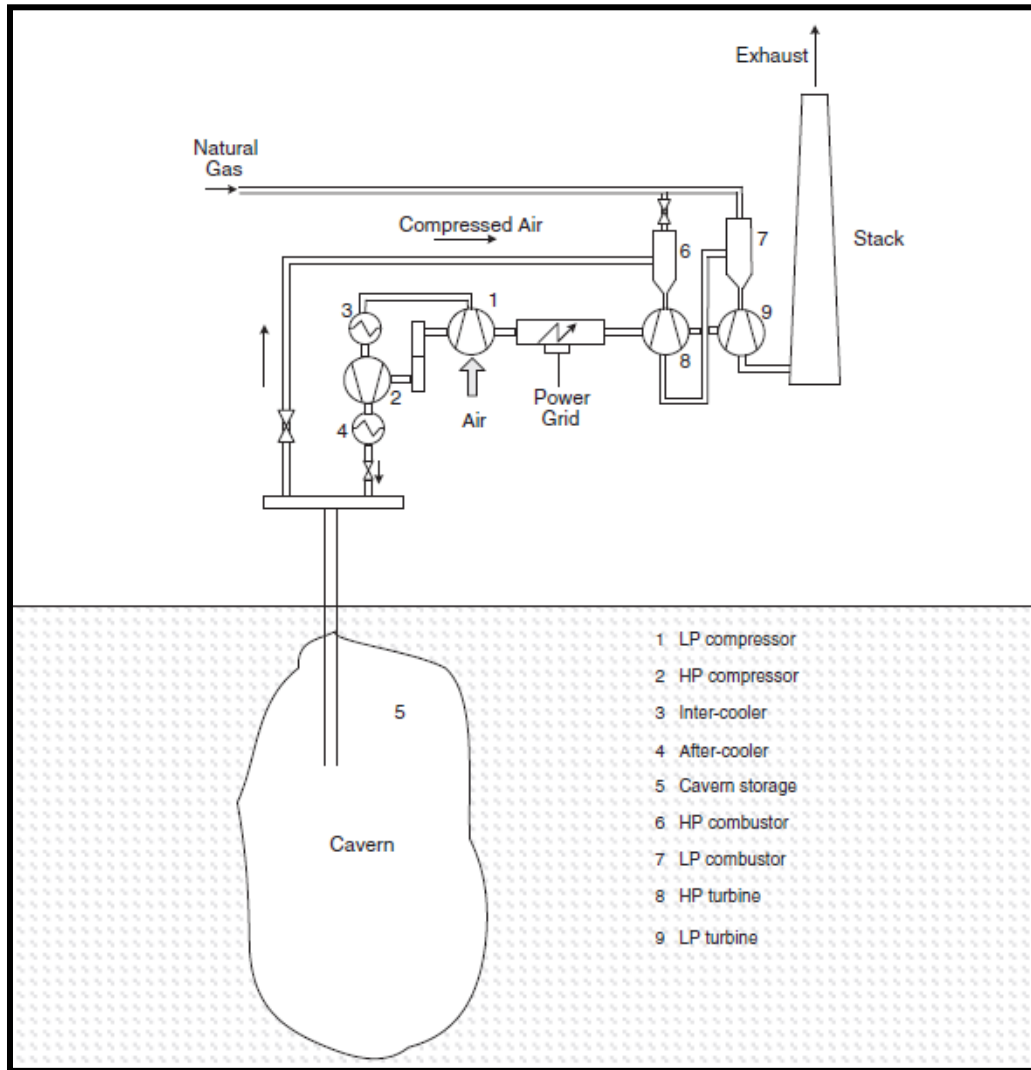


Figura 11. Esquema típico de una planta de almacenamiento de energía en aire comprimido [23].

Durante el funcionamiento de la turbina, tanto la turbina como la cámara de combustión están en operación. La cámara de combustión es alimentada con gas natural y mezclado con el aire comprimido a la presión específica que se tiene en el tanque.

La combustión toma lugar dentro de la cámara de combustión, dando como resultado gases calientes los cuales son enviados directamente a la turbina para extraer la energía cinética que llevan. El funcionamiento de la cámara de combustión y de la turbina se realiza en dos etapas, la etapa de alta presión y la etapa de baja presión. Durante la operación de la turbina a alta presión la presión del aire es reducida desde la presión que se encuentra en el tanque de almacenamiento hasta una presión intermedia. Durante la operación de la turbina a baja presión, la presión del aire se reduce aún más hasta que la presión de escape sea similar a la presión atmosférica. Todo el calor que adquirieron los gases durante la combustión puede no ser recuperado en la etapa final a baja presión en la operación de la turbina. Sin embargo, se puede proporcionar un recuperador de calor para recuperar el calor residual que queda en los gases de escape con el fin de mejorar mucho más la eficiencia total del sistema [23].

La siguiente sección presenta en detalle el modelado de los componentes individuales de un sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido.

Modelado de los componentes de un sistema CAES

Compresor

Un modelo simple de un compresor sirve para calcular el calor de compresión basado en la relación de aire comprimido asumiendo que el calor específico (cp) es constante. Sin embargo, la realidad es que el calor específico del aire varía significativamente conforme la variación de la temperatura. Para obtener un modelo más preciso de este componente es necesario incorporar la variabilidad del calor específico. En el modelado de este componente pueden ser previstas las posibles fugas, esto con la finalidad de evitar que el compresor se detenga y también para reducir la carga térmica en los álabes del compresor. EL gas de entrada está compuesto por una mezcla de " ns " especies, donde " ns " es el número de especies. Los datos de entrada dados son caudal másico de entrada,

temperatura del gas de entrada, presión (presión de salida o relación de presión) y el término de la eficiencia (eficiencia politrópica o eficiencia isentrópica). El gas se trata como si fuese un gas ideal [23].

Las ecuaciones que rigen este componente son presentadas para compresores adiabáticos de una sola etapa y multi-etapa [23].

Compresión sin fugas de una sola etapa

Calor específico constante:

$$T_{out} = T_{in}(P_{out}/P_{in})^{((\gamma-1)/(\eta_p\gamma))} \quad (23)$$

$$H_{in} = C_p(T_{in} - T_0) \quad (24)$$

$$H_{out} = C_p(T_{out} - T_0) \quad (25)$$

$$P_{comp} = \dot{m}(H_{out} - H_{in}) \quad (26)$$

Calor específico variable:

$$\frac{\eta_p(S_{out}^0 - S_{in}^0)}{R} = \ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad (27)$$

$$P_{comp} = \dot{m}(H_{out} - H_{in}) \quad (28)$$

$$S_i^0 = \int_0^T C_{p,i}(T) \frac{dT}{T} \quad (29)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^{ns} Y_i \phi_i; \phi = S^0, H \quad (30)$$

Las ecuaciones (27) a (30) son válidas para el caso de calor específico variable. Nótese que todas las propiedades de las especies son evaluados usando

polinomios basados en datos termodinámicos. Las ecuaciones de los datos dados de relación de presión, tasa de flujo másico y flujo de entrada son resueltos repetidamente para obtener la temperatura de salida y la potencia del compresor [23]

Compresor multi-etapas con fugas

Los compresores multi etapa pueden lograr alta relación de compresión y por tal razón son utilizados en muchas aplicaciones industriales. Para N etapas de compresión, la potencia requerida y la eficiencia politrópica en cada etapa son supuestas para ser idénticas.

$$P_{comp,k} = P_{comp}/N \text{ (} k\text{th stage)} \quad (31)$$

$$H_{out,k} = H_{in,k} + P_{comp,k}/\dot{m}_{k,in} \quad (32)$$

$$\dot{m}_{k,out} = \dot{m}_{k,in} - \dot{m}_{k,bleed} \quad (33)$$

$$\frac{\eta_{p,k}(S_{out,k}^0 - S_{in,k}^0)}{R} = \ln\left(\frac{P_{out,k}}{P_{in,k}}\right) \quad (34)$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \prod_{k=1}^N \left(\frac{P_{out,k}}{P_{in,k}}\right) \quad (35)$$

En las ecuaciones mostradas anteriormente, el subíndice k se refiere a k th stage. Las ecuaciones de la (31) - (35) son resueltas repetidamente para obtener la potencia del compresor y la información de cada etapa. El calor específico de cada gas individual componente en la mezcla de aire-combustible es evaluado sobre la base de los datos termodinámicos del NIST [23].

CAES.

El aire comprimido es físicamente almacenado en un tanque. Durante el funcionamiento del compresor el aire es presurizado dentro del tanque, y durante el funcionamiento de la turbina el aire es removido del tanque. Típicamente, el

compresor y la turbina no entran en funcionamiento simultáneamente. El tanque es, ya sea rellenado por el compresor o vaciado mediante el funcionamiento de la turbina. Sin embargo, se puede proporcionar disposición para poner en marcha al compresor y a la turbina simultáneamente. La otra posibilidad es contar con múltiples tanques de almacenamiento llenos para después ir descargando uno de ellos y continuamente utilizar el resto de tanques mientras los vacíos se rellenan nuevamente. Los balances de energía y de masa dentro del tanque son dados en las siguientes ecuaciones, se contempla al aire comprimido como un gas ideal. La figura 12 muestra esquemáticamente un tanque de almacenamiento de aire comprimido y se continúa mostrando las ecuaciones que lo rigen [23].

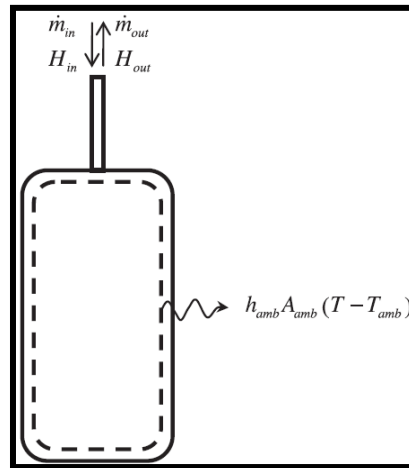


Figura 12. Esquema de un tanque de almacenamiento de aire comprimido [23].

Balance de masa.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}{V} \quad (36)$$

Balance de energía.

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \frac{\dot{m}_{in}}{V} c_p (T - T_{in}) - \frac{dP}{dt} + \frac{h_{amb} A_{cavern}}{V} (T - T_{amb}) = 0 \quad (37)$$

En la ecuación del balance de energía, el primer término es la razón de calor acumulado en el tanque de aire. El segundo término es la tasa del flujo de calor

convectivo dentro de la caverna debido a la entrada del aire. El tercer término es el calor de compresión y el último término es el calor transferido al ambiente. El coeficiente de transferencia de calor y el área de calor transferido tienen su complejidad para ser determinados. Todos estos términos son agrupados para obtener la siguiente ecuación:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \frac{\dot{m}_{in}}{V} c_p (T - T_{in}) - \frac{dP}{dt} + h_{eff} (T - T_{amb}) = 0 \quad (38)$$

h_{eff} es el parámetro de calor transferido efectivo en unidades de (W/m^3K) . Para determinar el parámetro de calor transferido efectivo se tienen que llevar a la experimentación demostrativa con respecto al almacenamiento de energía en aire comprimido. En general, el coeficiente de transferencia de calor no es valor constante. Esto es afectado debido a las características de carga y descarga de aire comprimido en el tanque. La transferencia de calor dentro del tanque es una combinación de convección forzada y convección natural. El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada es proporcional a la tasa de flujo másico convectivo dentro de la caverna. Sin embargo, el parámetro de transferencia de calor puede ser aproximado como:

$$h_{eff} = a + b |\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}|^{0.8} \quad (39)$$

Los coeficientes desconocidos a y b pueden ser obtenidos por comparación de experimentos [23].

Cámara de combustión.

Un modelo simple de una cámara de combustión se propone para su estudio en el cual se supone que suceda una combustión completa de los gases y así evaluar el calor liberado durante el proceso de combustión. Sin embargo, en la realidad, el

grado de la combustión esta en dependencia de las condiciones de operación de la cámara de combustión y el tiempo de residencia del combustible dentro de la cámara de combustión.

Una representación más precisa del fenómeno de combustión en un análisis es incluyendo la reacción cinética para la mezcla de aire-combustible. En general, la reacción dentro de la cámara de combustión puede no darse completa en su totalidad ya que depende de las condiciones de funcionamiento dentro de dicha cámara, así como la tasa de flujo másico de aire-combustible y la configuración geométrica de la cámara de combustión. Esto implica que los gases de escape puedan contener restos de combustible no quemados parcialmente, estos restos pueden ser CO, NO_x y otros gases emitidos. La combustión incompleta tiene 2 desventajas, (I) la temperatura a la salida de los gases es más baja que lo esperado y (II) las emisiones de los gases contaminantes causan un gran daño al medio ambiente.

Por lo tanto, es útil detectar estas emisiones para estudiar las ineficiencias en el funcionamiento de la cámara de combustión y así evaluar su impacto en el medio ambiente.

El efecto de la configuración geométrica de la cámara de combustión para una combustión incompleta puede ser estudiada solo por un modelo detallado de dinámica de fluidos computacional (CFD). Sin embargo, el efecto de las condiciones de operación y la tasa de flujo en la cinética de combustión puede ser evaluado utilizando un modelo de parámetros agrupados usando aproximaciones razonables [23].

Detallados mecanismos de reacción para la combustión de varios combustibles están disponibles en la literatura. Un mecanismo de reacción consiste en una serie de reacciones, indicando diferentes vías de reacción, involucrando diferentes especies junto con las constantes de velocidad de reacción.

La información termodinámica apropiada para las especies involucradas es extraída de bases de datos termodinámicos. La base de datos es esencialmente el mismo formato que se usa en la NASA, código de equilibrio químico complejo [23].

2.4 Vehículo a base de aire comprimido

En este apartado se muestra la teoría mecánica de los procesos individuales que se llevan a cabo para propulsar un vehículo utilizando la energía del aire comprimido para su accionamiento.

2.4.1 Descripción macroscópica de un gas ideal

La ecuación de expansión volumétrica $\Delta V = \beta V_i \Delta T$ es de acuerdo con la suposición de que el material tiene un volumen inicial V_i antes de que se presente un cambio de temperatura. Tal es el caso para sólidos y líquidos porque tienen volumen fijo a una temperatura determinada. El caso para gases es por completo diferente. Las fuerzas interatómicas dentro de los gases son muy débiles y, en muchos casos, se puede imaginar dichas fuerzas como inexistentes y aún así hacer muy buenas aproximaciones. Debido a eso, no hay separación de equilibrio para los átomos ni volumen estándar a una temperatura determinada; el volumen depende del tamaño del contenedor. Como resultado, no es posible expresar cambios en volumen ΔV en un proceso sobre un gas porque no se definió el volumen V_i al comienzo del proceso [24].

Para un gas es útil saber cómo se relacionan las cantidades volumen, presión y temperatura para una muestra de gas de masa m . En general, la ecuación que interrelaciona estas cantidades, llamada ecuación de estado, es muy complicada. Sin embargo, si el gas se mantiene a una presión muy baja (o densidad baja), la

ecuación de estado es muy simple y se encuentra experimentalmente. Tal gas de densidad baja se refiere como un gas ideal. Conviene usar el modelo de gas ideal para hacer predicciones que sean adecuadas para describir el comportamiento de gases reales a bajas presiones. Es provechoso expresar la cantidad de gas en un volumen determinado en términos del número de moles n . Un mol de cualquier sustancia es aquella cantidad de la sustancia que contiene un número de Avogadro $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ de partículas constituyentes (átomos o moléculas) [24].

El número de moles n de una sustancia se relaciona con su masa m a través de la expresión:

$$n = \frac{m}{M} \quad (40)$$

donde M es la masa molar de la sustancia. Ahora suponga que un gas ideal está confinado a un contenedor cilíndrico cuyo volumen puede variar mediante un pistón móvil, si supone que el cilindro no tiene fugas, la masa del gas permanece constante. Para tal sistema, los experimentos proporcionan la siguiente información:

- Cuando el gas se mantiene a una temperatura constante, su presión es inversamente proporcional al volumen. (Ley de Boyle).
- cuando la presión del gas se mantiene constante, el volumen es directamente proporcional a la temperatura. (Ley de Charles).
- Cuando el volumen del gas se mantiene constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura. (Ley de Gay-Lussac) [24].

Estas observaciones se resumen mediante la ecuación de estado para un gas ideal:

$$PV = nRT \quad (41)$$

En esta expresión, también conocida como ley de gas ideal, n es el número de moles de gas en la muestra y R es una constante. Los experimentos en numerosos gases demuestran que, conforme la presión tiende a cero, la cantidad PV/nT tiende al mismo valor R para todos los gases. Por esta razón, R se llama constante universal de los gases. En unidades del SI la presión se expresa en pascales ($1 Pa = 1 N/m^2$) y el volumen en metros cúbicos [m^3], el producto PV tiene unidades de newton por metro, o joules, y R tiene el valor de:

$$R = 8.314 J/mol \cdot K$$

Si la presión se expresa en atmósferas y el volumen en litros ($1L = 10^3 cm^3 = 10^{-3} m^3$), por lo tanto R tiene el valor de:

$$R = 0.08206 L \cdot atm/mol \cdot K$$

Modelo molecular de un gas ideal

Al desarrollar un modelo microscópico de un gas ideal, llamado teoría cinética, se hacen las siguientes suposiciones:

- En los gases las moléculas son numerosas y la separación promedio entre ellas es grande en comparación con sus dimensiones.
- Las moléculas obedecen las leyes del movimiento de Newton, pero como un todo tienen un movimiento aleatorio.
- Las moléculas interactúan sólo mediante fuerzas de corto alcance durante colisiones elásticas.
- Las moléculas tienen colisiones elásticas contra las paredes. Estas colisiones conducen a la presión macroscópica sobre las paredes del contenedor.
- El gas en consideración es una sustancia pura; es decir, todas las moléculas son idénticas [22].

Aunque con frecuencia se ilustra un gas ideal que consiste en átomos simples, el comportamiento de los gases moleculares se aproxima al de los gases ideales, más a presiones bajas. Por lo general, las rotaciones moleculares o vibraciones no tienen efecto sobre los movimientos considerados en este caso [22].

La presión de un gas es proporcional al número de moléculas por cada unidad de volumen y a la energía cinética traslacional promedio de las moléculas, $\frac{1}{2}m_0v^2$. Al analizar este modelo simplificado de un gas ideal, se obtiene un resultado importante que relaciona la cantidad macroscópica de presión con una cantidad microscópica, el valor promedio del cuadrado de la rapidez molecular. Debido a eso, se establece un vínculo clave entre el mundo molecular y el mundo a gran escala. Una forma de aumentar la presión dentro de un contenedor es aumentar el número de moléculas por cada unidad de volumen N/V en el contenedor [22]. A continuación se muestra una ecuación de correspondencia entre presión y energía cinética molecular:

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \left(\frac{1}{2} m_0 v^2 \right) \quad (42)$$

2.4.2 Motores neumáticos

Los motores neumáticos son unos elementos capaces de transformar la energía neumática en energía mecánica según un movimiento rotativo. Existen muchas herramientas que funcionan con aire comprimido y necesitan un motor, por ejemplo, taladros. Los motores neumáticos no solamente son útiles como herramientas de trabajo, también tienen un uso industrial, aunque no sea lo más común, porque ya existen los motores eléctricos. Sin embargo, en ciertas industrias, pueden llegar a ser necesarios, por temas de seguridad o higiene [25]. Las principales ventajas que obtenemos del uso de motores neumáticos son:

- Compactos y livianos: Un motor neumático con la misma potencia que un motor eléctrico pesa sólo una cuarta parte que éste y ocupa sólo una sexta

parte de espacio. Además, desarrollan mucha más potencia con relación a su tamaño y peso que la mayoría de los otros tipos de motor [25].

- Sencilla instalación: Debido a lo dicho anteriormente.
- Fácil inversión del giro: Por medio de una válvula de control, funcionando con la máxima eficiencia hacia la derecha o a la izquierda.
- Par creciente con la carga: La potencia de un motor neumático es relativamente constante dentro de una amplia gama de velocidad - cuando la velocidad se reduce debido a un incremento de la carga, el par aumenta.
- Sin daños por sobrecargas: Los motores neumáticos se pueden ahogar indefinidamente sin que se recalienten ni experimenten ningún otro tipo de daño. También se pueden arrancar y parar repetidamente sin límite.
- Potencia ajustable: El par y la potencia de un motor neumático se pueden ajustar progresivamente variando la presión de trabajo. Además, la velocidad también se puede ajustar progresivamente en toda su gama variando el caudal de aire.
- Robustez: Los motores neumáticos no se ven afectados por el calor, vibración, corrosión o golpes. Su rendimiento en ambientes hostiles no puede ser igualado por ningún otro tipo de motor. El diseño y la construcción son sencillos, con muy pocas piezas móviles, aseguran una fiabilidad óptima y un mantenimiento mínimo.
- Resistencia a ambientes hostiles y agresivos: Al no generar chispas, resultan ideales para zonas con riesgo de explosión y/o incendio. Además, su construcción los hace ideales en ambientes salinos y otras atmósferas corrosivas [25].

Tipos de motores neumáticos.

Los motores neumáticos más típicos son de engranaje, de pistones y de paletas. Los primeros son los más comunes, y son capaces de dar hasta 60CV de potencia. Están considerados de bajo rendimiento, porque consume mucha más energía que la que transmite, en las figuras 13 y 14 se muestran los tipos de motores neumáticos de manera esquemática [25].

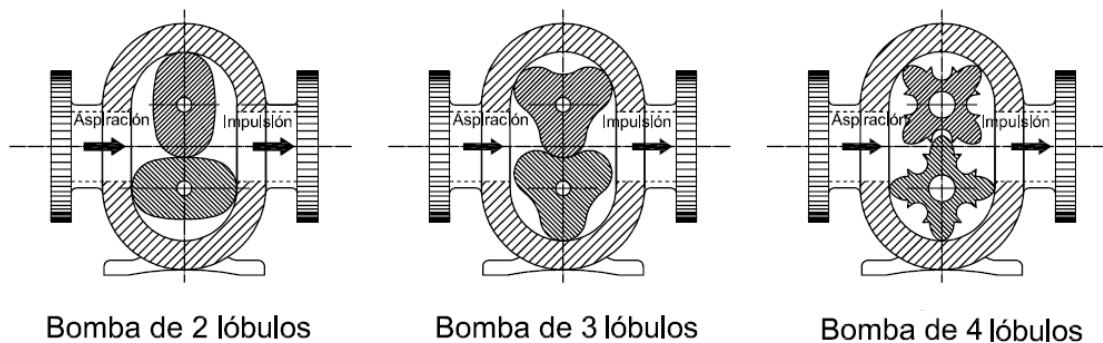


Figura 13. Esquema de motor neumático de engranaje [25].

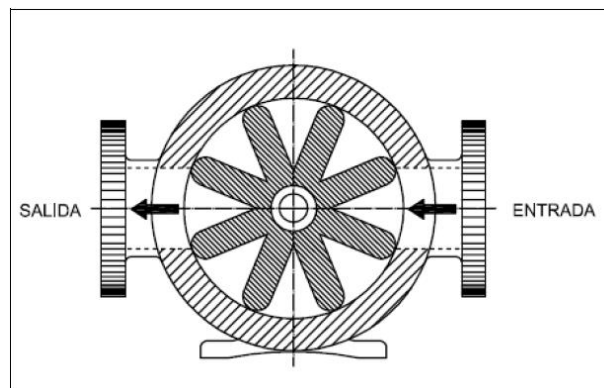


Figura 14. Esquema de motor neumático de paletas [25].

Los motores de pistones consiguen potencias de hasta 30 CV y los de paletas son el tipo de motor que se usan en las herramientas, como lijadoras y taladradoras. Dan una potencia máxima de 20 CV, y tienen unas velocidades de 3000 hasta 9000 r.p.m.

2.4.3 Sistema de transmisión de potencia de engranes

Los engranes y las transmisiones de engranajes están presentes en muchas de las máquinas que podemos encontrar a nuestro alrededor, además de ayudar a mover las ruedas y hélices de nuestros medios de transporte, ya sea por tierra, mar o aire [26].

El objetivo de los engranajes es transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Así, se habla de "Par de Engranajes, Ruedas Dentadas o Engrane" para referirse al acoplamiento que se utiliza para transmitir potencia mecánica entre dos ejes mediante contacto directo entre dos cuerpos sólidos unidos rígidamente a cada uno de los ejes. La "Relación de Transmisión" es el cociente entre la velocidad angular de salida ω_2 (velocidad de la rueda conducida) y la de entrada ω_1 (velocidad de la rueda conductora): $\mu = \omega_2/\omega_1$. Dicha relación puede tener signo positivo (si los ejes giran en el mismo sentido) o negativo (si los giros son de sentido contrario). Del mismo modo, si la relación de transmisión es mayor que 1 ($\mu > 1$) se hablará de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1 que suele resultar lo más habitual de un mecanismo reductor, o simplemente de un reductor. Por otro lado, este objetivo de transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante se puede conseguir también mediante otros dispositivos como correas, cadenas, ruedas de fricción, levas o mecanismos de barras articuladas, pero todos ellos tienen sus limitaciones:

- Las correas, cadenas, ruedas de fricción y levas no pueden transmitir grandes potencias.
- Los mecanismos de barras articuladas son aplicables solo en casos concretos [26].

Por el contrario, los engranajes presentan toda una serie de ventajas:

- Son relativamente sencillos de construir.

- Pueden transmitir grandes potencias.
- Están universalmente aceptados, de tal modo que, además, su diseño está normalizado.
- Permiten obtener soluciones variadísimas y adaptarse, por tanto, a cualquier tipo de problema de transmisión de rotación con relación constante entre ejes [26].

Todo ello da lugar a que los engranajes sea el elemento de máquinas más utilizado: cajas de velocidades, reductores, diferenciales, cadenas de transmisión.

Según que los ejes sean paralelos, se corten o se crucen hablaremos de tres familias de engranajes: Cilíndricos, Cónicos o Hiperbólicos [26].

A su vez, en todo engranaje podremos distinguir dos partes claramente diferenciadas: el núcleo (limitado por la superficie, generalmente de revolución, del axoide) y los dientes (integrados en el axoide y cuya aplicación se verá posteriormente). De esta manera, partiendo del tipo de axoide que caracteriza el movimiento, y considerando la disposición de los dientes, podemos establecer una primera clasificación de los engranajes:

Tabla V. Clasificación de sistemas de engranes.

Cilíndricos	Dientes rectos exteriores	Transmiten mov. de rotación en sentido contrario.
	Dientes rectos interiores	Transmiten mov. de rotación en el mismo sentido.
	Rectos piñón cremallera	La rotación produce la traslación.
	Rectos escalonados	Transmiten potencia de forma más suave.
	Dientes helicoidales	Paso al límite de los escalonados.
Cónicos	Rectos	
	Helicoidales	
Hiperbólicos	Sin fin – corona	Transmiten potencias elevadas.
	Helicoidales de ejes cruzados	
	Hipoidales	
No circulares	Mas compactos y equilibrados, más costosos.	

En los mecanismos de contacto directo, en los que se produce contacto entre superficies que deslizan y/o ruedan, la relación de velocidades angulares es inversamente proporcional a la relación de segmentos que determina el "punto primitivo" sobre la línea de centros (la demostración se apoya en el teorema de Aronhold Kennedy), es decir:

$$\mu = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{O_1P}{O_2P} \quad (43)$$

dónde O_1P y O_2P se denominan "Radios Primitivos" y a las circunferencias trazadas desde O_1 y O_2 con esos radios "Circunferencias Primitivas". En consecuencia, para que la relación de transmisión se mantenga constante, el punto P deberá permanecer fijo: la línea de acción, para cada punto de contacto, deberá pasar siempre por P [26]. A continuación se enuncia la ley general del engrane:

"Para que la relación de transmisión entre dos perfiles se mantenga constante, es necesario y suficiente que la normal a los perfiles en el punto de contacto pase en todo instante por un punto fijo de la línea de centros" [26].

2.4.4 Vehículo

Energía cinética y el teorema trabajo-energía cinética.

El trabajo es un mecanismo de transferencia de energía en un sistema. Un resultado posible de hacer trabajo sobre un sistema es que el sistema cambie su rapidez. Esta situación involucra un tipo de energía que un sistema puede tener, llamada energía cinética [27].

Considere un sistema que consiste de un solo objeto. Imagine un bloque de masa m que se mueve a través de un desplazamiento dirigido hacia la derecha bajo la acción de una fuerza neta $\sum \vec{F}$, también dirigida hacia la derecha [27].

Se sabe de la segunda ley de Newton que el bloque se mueve con una aceleración \vec{a} . Si el bloque (y por tanto la fuerza) se mueven a través de un desplazamiento $\Delta\vec{r} = \Delta x\hat{i} = (x_f - x_i)\hat{i}$, el trabajo neto realizado sobre el bloque por la fuerza neta $\sum \vec{F}$ es:

$$W_{neto} = \int_{x_i}^{x_f} \sum F dx \quad (44)$$

Al aplicar la segunda ley de Newton, se sustituye para la magnitud de la fuerza neta $\sum F = ma$ y después se realizan las siguientes manipulaciones de la regla de la cadena en la integración:

$$W_{neto} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \quad (45)$$

dónde v_i es la rapidez del bloque cuando está en $x = x_i$ y v_f es su rapidez en x_f .

La ecuación anterior se generó por la situación específica de movimiento unidimensional, pero es un resultado general. Dice que el trabajo invertido por la fuerza neta en una partícula de masa m es igual a la diferencia entre los valores inicial y final de una cantidad $\frac{1}{2}mv^2$. La cantidad $\frac{1}{2}mv^2$ representa la energía asociada con el movimiento de la partícula u objeto [26]. Esta cantidad es tan importante que se le ha dado un nombre especial, energía cinética:

$$K \equiv \frac{1}{2}mv^2 \quad (46)$$

La energía cinética es una cantidad escalar y tiene las mismas unidades que el trabajo. Por ejemplo, un objeto de 2.0 kg que se mueve con una rapidez de 4.0 m/s tiene una energía cinética de 16 J . La ecuación del trabajo neto afirma que el trabajo realizado en una partícula por una fuerza neta $\sum \vec{F}$ que actúa sobre él es igual al cambio en energía cinética de la partícula [27]. Con frecuencia es conveniente escribir la ecuación en la forma:

$$W_{neto} = K_f - K_i = \Delta K \quad (47)$$

Otra forma de escribirla es $K_f = K_i + W_{neto}$, que dice que la energía cinética final de un objeto es igual a su energía cinética inicial más el cambio debido al trabajo neto invertido sobre él [27]. Estas ecuaciones del trabajo neto se generaron al suponer que se realiza trabajo en una partícula. También se podría hacer trabajo sobre un sistema deformable, en el que las partes del sistema se muevan unas respecto de otras. La ecuación anterior es un resultado importante conocido como teorema trabajo-energía cinética:

"Cuando se consume trabajo en un sistema, y el único cambio en el sistema es en su rapidez, el trabajo neto consumido en el sistema es igual al cambio en energía cinética del sistema" [27].

El teorema trabajo-energía cinética indica que la rapidez de un sistema aumenta si el trabajo neto invertido sobre él es positivo porque la energía cinética final es mayor que la energía cinética inicial. La rapidez disminuye si el trabajo neto es negativo porque la energía cinética final es menor que la energía cinética inicial [27].

Otro tipo de movimiento es el movimiento rotacional, en el que un objeto gira en torno a un eje. El teorema trabajo-energía cinética también es válido para sistemas que se someten a un cambio en la rapidez rotacional debido al trabajo realizado sobre el sistema. Ejemplos de trabajo que causa movimiento rotacional puede ser un molino de viento, el giro de una llanta de un vehículo, etc. [27].

Capítulo 3. Metodología.

En este capítulo se presenta la metodología del proyecto que involucra desde el cálculo de potencia para mover un vehículo hasta la construcción y prueba de puesta en marcha o arranque de este. Esta metodología se desarrolla en etapas las cuales involucra metodología para el cálculo de potencia para mover el vehículo, el diseño esquemático hecho por computadora del sistema de aire comprimido y su acoplamiento en el vehículo, la selección y adquisición de los materiales que se utilizarán para obtener el prototipo físico, después se describe el proceso de construcción del prototipo en el que se realizan actividades tales como adaptación e implementación de los diferentes tipos de materiales y sistemas seleccionados para lograr que el vehículo funcione con aire comprimido y finalmente se continua con la descripción del proceso de evaluación que se llevará a cabo para evaluar el vehículo.

3.1 Determinación de los parámetros para la implementación de un sistema CAES en un vehículo

Para diseñar el acople del sistema CAES se determinarán los parámetros para la implementación del sistema, para lo cual se deben seleccionar datos como masa a mover, velocidad del vehículo y distancia a recorrer principalmente con la finalidad de tomar estos datos e iniciar con cálculos necesarios que servirán para llevar a cabo el dimensionado energético así como para obtener las características físicas y geométricas que deben tener los dispositivos que componen el sistema CAES.

Se iniciará determinando la masa a mover en el vehículo para lo cual es necesario contemplar factores como materiales que se utilizaran en el vehículo como material de chasis, carrocería, la cantidad y dimensiones de esos materiales para poder conocer su masa, la masa de una persona quien será la que desarrollara las

pruebas experimentales en el vehículo, la masa de los tanques de almacenamiento de aire a alta presión, la masa del aire a alta presión, la masa de dispositivos como medidores de presión, reguladores de presión, válvulas de paso, mangueras para aire a alta presión, sujetadores, abrazaderas, tornillería, etc. hasta este punto se tendrá determinada la masa total a mover sin embargo se aplicará un factor de sobredimensionado para garantizar el accionamiento del vehículo y por otra parte en caso que se necesite alguna modificación o adición de materiales del vehículo en la cual pueda repercutir en la masa del mismo no le afecte demasiado.

El segundo parámetro importante a tomar en cuenta es la distancia a recorrer por él vehículo, para ello simplemente se fijará una distancia finita a recorrer con el vehículo sobre la horizontal. Otro parámetro que se determina es la velocidad que se desea alcanzar en el vehículo durante su accionamiento, para lo cual basta con fijar la velocidad máxima con la que operará, tanto la masa del vehículo con usuarios incluidos, distancia a recorrer y velocidad a alcanzar por el vehículo servirán para desarrollar cálculos en el apartado de dimensionado energético durante la fase de diseño del vehículo.

Se tomará en cuenta también que la fuente de energía que se encargue de accionar el vehículo sea libre de emisiones de contaminantes, tales como gases de efecto invernadero que pueda dañar la atmosfera o la superficie del planeta así como a las diversas formas de vida que habitan en el, debido a que en este trabajo se pretende dejar de contaminar el medio ambiente de todo el planeta, por lo tanto el siguiente parámetro se buscará como fuente de energía nulo de contaminantes. El último parámetro importante que se tomará en cuenta es el tipo de vehículo a utilizar en términos del tipo de sistema que utiliza para su accionamiento ya sea de tipo puramente mecánico o electro-mecánico, teniendo en cuenta que se buscará en la bibliografía otros tipos de sistemas que puedan satisfacer la necesidad de poner en movimiento un vehículo sobre la superficie y de este modo se elegirá la mejor opción del sistema de transmisión que se utilizará en el vehículo.

3.2 Dimensionado energético para mover una masa determinada con la energía almacenada en aire comprimido

El siguiente paso será realizar el dimensionado energético para poder accionar el vehículo con el tipo de energía que se haya seleccionado, para ello se llevará a cabo una secuencia de cálculos que involucra tanto las dimensiones y características del vehículo como del tipo de fuente de energía que se utilizará en el.

Primero se determinará el tamaño del vehículo y masa del mismo, para ello se tomará en cuenta el número de personas que se desplazará en el (teniendo en cuenta las dimensiones y masa estandarizadas de estas), masa, dimensiones y geometría del sistema de propulsión, con esos datos se logrará obtener las dimensiones y características con las que debe contar el vehículo.

Después se deberá obtener la masa total a desplazar junto con la masa del vehículo, luego se procede a diseñar por computadora cada una de las partes que constituirá el vehículo y se tomará en cuenta las dimensiones de cada dispositivo que se implemente así como también el tipo de material o materiales que se utilizarán para llevar a cabo sumatorias de masas de cada parte que constituya al vehículo y así conocer la masa total, cabe mencionar que de la masa obtenida será necesario sobredimensionar dicha masa para garantizar accionar el prototipo. Determinando los datos de masa, velocidad y aceleración se procederá a resolver la segunda ley de Newton que dice que la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración, y de este modo se obtendrá la fuerza necesaria para mover el vehículo sobre un plano horizontal en el medio ambiente y para ello también se tomarán en cuenta las resistencias al movimiento las cuales son la fuerza de fricción estática f_s , la fuerza de fricción cinética f_k y la fuerza que ejerce la resistencia del aire f_a . Contemplando estas fuerzas se procede a obtener la fuerza necesaria para poder desplazar el vehículo.

El siguiente paso será conocer la potencia que se necesita para poner en marcha el vehículo, la cual se obtendrá mediante una expresión que relacione la fuerza que se debe aplicar al vehículo para desplazarlo y la velocidad que el vehículo debe alcanzar. El siguiente cálculo que se llevará a cabo es el que respecta al trabajo que se debe invertir para desplazar el vehículo con una masa específica en una distancia finita a una velocidad determinada sobre una superficie horizontal, para ello se utilizará la siguiente expresión:

$$W = F\Delta d \cos \theta$$

Donde W es el trabajo, F es la fuerza, Δd es la distancia a recorrer y $\cos \theta$ es el ángulo sobre la horizontal. Llegando a obtener los cálculos ya mencionados se podrá conocer el tipo y características del motor o sistema de propulsión que se utilizará en el vehículo para su desplazamiento. El siguiente paso será conocer la cantidad de energía que gastará el vehículo durante su funcionamiento para después comparar la cantidad de energía que otorgan los diferentes sistemas de almacenamiento de energía, esto con el fin de determinar el tipo de combustible que se utilizará para accionar el sistema de propulsión que a su vez impulsará el vehículo.

3.3 Determinación de materiales a utilizar

En este apartado se llevará a cabo una búsqueda de materiales con las que se construirá el vehículo, estos materiales y dispositivos deben satisfacer las características obtenidas durante la fase de cálculos, la búsqueda se realizará en el mercado local (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas). A continuación se listan los materiales que necesitarán ser determinados para obtener un prototipo funcional:

1. Vehículo.
2. Tanque de almacenamiento de combustible.

3. Soporte para tanque de combustible (Estructura diseñada por computadora).
4. Fijadores: Tornillos, tuercas, arandelas, abrazaderas, etc.
5. Dispositivos de medición (para presión, velocidad, tiempo, etc).
6. Válvulas de paso.
7. Ductos, mangueras.
8. Motor.
9. Soporte para motor (estructura diseñada por computadora).
10. Uniones: conexiones y pivotes.
11. Transmisión mecánica (piñón, corona y cadena, poleas y banda, engranes, etc.).

3.4 Diseño de base para soporte del sistema CAES en el vehículo y presentación previa del vehículo hecho a computadora

Se diseñará por computadora un vehículo de manera esquemática y en su forma estructural para tener idea de cómo se llevará a cabo la sujeción del sistema CAES en él, teniendo esto se recurrirá a diseñar el soporte del sistema CAES el cual estará seccionado en 2 estructuras principalmente, la primera de ellas es sobre el chasis del vehículo y el segundo de ellos serán sujetadores con forma de abrazaderas que estarán ya sea soldados o a presión entre el sistema CAES y chasis, las piezas que se sujetarán al chasis o a otra parte del vehículo son el motor, la transmisión de potencia mecánica, el tanque de almacenamiento de combustible y la base para el panel de control que servirá para controlar el flujo del combustible almacenado en el tanque, los sujetadores tendrán la función de ser removibles con el fin de poder liberar el tanque de almacenamiento, motor o otro dispositivo implementado cuando sea necesario, cabe destacar que esta pieza será diseñada a computadora para su posterior adaptación en el vehículo real en la fase de construcción y adaptación.

3.5 Construcción de base para soportar el sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido

Para acoplar el sistema CAES en el vehículo se llevarán a cabo tres actividades las cuales son la construcción de las bases que soportarán el sistema de almacenamiento de energía y sistema generador de potencia, el acoplamiento del sistema de almacenamiento de energía al sistema generador de potencia y finalmente la adaptación del sistema CAES en el vehículo. Para la construcción de las bases soportadoras del sistema CAES se tomará en cuenta el tipo de vehículo seleccionado y el diseño por computadora desarrollado, además las bases independientemente de la geometría que necesiten tener se construirá de metales, que cuenten con suficiente resistencia al movimiento, así como también la capacidad de resistir suficiente cantidad de masa sin deformarse, teniendo en cuenta esto se realizará con material de hierro para garantizar el soporte adecuado del sistema CAES en el vehículo, además se utilizará tornillería acerada para concluir con la sujeción de todo el sistema en el vehículo.

3.6 Acoplamiento del sistema de almacenamiento de aire comprimido al sistema generador de potencia

Para el acoplamiento entre el sistema de almacenamiento de energía y el sistema generador de potencia se llevará a cabo por medio de mangueras o ductos y conexiones tipo rosca, dicho acoplamiento también contará con dispositivos de mediciones de presión implementados, para lo cual se utilizarán ductos de alta presión y abrazaderas de presión para garantizar la perfecta sujeción entre dichos dispositivos y evitar fugas de combustible.

3.7 Adaptación del sistema CAES en el vehículo

Para llevar a cabo la adaptación del sistema CAES en el vehículo se realizará en dos etapas, la primera de ellas es colocar y sujetar el sistema CAES dentro del vehículo con sus soportes y tornillos específicos, una vez teniendo esto, se continuará con la segunda etapa la cual consta de instalar el sistema de transmisión de potencia el cual será de piñón, corona y cadena, este sistema de transmisión de potencia interactúa directamente con el sistema generador de potencia mecánica y con el diferencial del vehículo y debe de tener una perfecta alineación entre el piñón y la corona para así garantizar que la transmisión de la potencia mecánica generada pueda darse sin problema, por lo que se realizarán los movimientos necesarios para lograr un buen ajuste en el sistema de transmisión.

3.8 Metodología para la evaluación del prototipo

Para llevar a cabo la evaluación del prototipo se realizarán actividades en tres etapas, la primera etapa consta con pruebas de arranque que servirán únicamente para verificar que la transmisión de potencia mecánica rotatoria es posible, la segunda etapa se desarrollara con una serie de pruebas que servirán para conocer la velocidad del vehículo y la tercera etapa se basa en una serie de pruebas que arrojará los datos de la autonomía obtenida por el vehículo. A continuación se describe la manera en que se ejecutaran dichas pruebas.

3.8.1 Pruebas de arranque

Estas pruebas se realizarán teniendo el vehículo sin carga, con las llantas suspendidas, de este modo evitar que la fricción estática y cinética no le afecte, el número de pruebas que se llevará a cabo en esta etapa son 3 pruebas las cuales

tendrán la finalidad de observar la puesta en marcha del vehículo y asegurar que sea posible generar movimiento rotatorio para el desplazamiento del vehículo con porciones indeterminadas de combustible.

3.8.2 Pruebas de velocidad

En esta etapa se desarrollarán 8 pruebas, cada una de ellas se llevará a cabo teniendo el vehículo sin carga y con las llantas suspendidas para evitar el efecto de las fuerzas de fricción estática y cinética, teniendo en cuenta que la energía que se utilizará para accionar el vehículo es la energía almacenada en aire comprimido, se determina que cada una de las pruebas que se realizarán serán ejecutadas para 8 diferentes presiones de trabajo, las presiones que se tomarán en cuenta durante las pruebas son de 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 y 110 PSI, durante las pruebas se utilizarán dos métodos para la obtención de datos de interés, una de ellas es la utilización de un velocímetro y la segunda es por medio de la observación mediante marcas de longitud en todo el perímetro de la rueda, midiendo el tiempo y la distancia recorrida se puede obtener los datos de velocidad en el experimento y así se conocerá el comportamiento del vehículo en términos de velocidad durante el rango de presiones seleccionadas.

3.8.3 Pruebas de autonomía

Para esta sección de pruebas se ejecutarán 8 pruebas las cuales se realizarán con el vehículo sin carga, con las llantas suspendidas, la evaluación de cada una de estas pruebas se programará para 8 diferentes presiones de trabajo, las cuales son de 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 y 110 PSI, y el modo en el que se ejecutara será poner en marcha el vehículo a velocidad constante a causa de la inyección del combustible a presión constante (por ejemplo 50 PSI) teniendo el tanque de

combustible a su máxima capacidad y con un cronometro se tomará el tiempo que lleva en vaciarse el tanque de combustible, se realizará lo mismo con cada una de las presiones de trabajo para poder tabular los datos obtenidos y de este modo conocer el comportamiento de la autonomía del vehículo a las diferentes presiones de trabajo del combustible utilizado.

Cabe destacar que se repetirán varias veces las etapas de estas pruebas para así tener el mínimo margen de error en los resultados de velocidad y autonomía.

Capítulo 4. Resultados y discusión

En este capítulo se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de los experimentos realizados en el prototipo vehículo a base de aire comprimido, en el cuál se llevaron a cabo 8 pruebas para obtener datos de velocidad, 8 pruebas para obtener datos de autonomía, y finalmente se muestra una comparación del costo en términos económicos de la compresión del aire por medio de diferentes fuentes de energía para su utilización en un vehículo como principal sistema de propulsión.

4.1 Cálculo de potencia para el accionamiento del vehículo

Se determinó un vehículo con una masa de 240 *Kg* que incluye el sistema generador de potencia por medio de aire comprimido más la masa de una persona, así como también se propone alcanzar una velocidad de 20 *km/h*, y se determina que el vehículo se moverá sobre una superficie horizontal. De la segunda ley de Newton se obtiene la fuerza que se requiere para desplazar dicha masa:

$$F = ma$$

$$masa = 240 \text{ Kg}$$

$$velocidad = 20 \frac{Km}{h} = \frac{20,000 \text{ metros}}{3600 \text{ segundos}} = 5.55 \text{ metros/segundo}$$

$$velocidad = 5.55 \text{ m/s}$$

Para conocer la aceleración que tendrá el vehículo con la masa de 240 kg a una velocidad de 20 km/s se calcula para ser alcanzada en un tiempo de 10 segundos, por lo tanto:

$$\text{aceleración} = \frac{5.55 \text{ m/s}}{10 \text{ s}} = 0.555 \text{ m/s}^2$$

De la segunda ley de Newton:

$$F = ma$$

Sustituyendo valores en la ecuación, tenemos:

$$F = (240 \text{ Kg}) (0.555 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 133.2 \text{ N}$$

La potencia necesaria para mover el vehículo se obtiene mediante la siguiente expresión, la cual involucra la fuerza en Newton y la velocidad en metros sobre segundo:

$$\text{Potencia} = \text{Fuerza} \cdot \text{velocidad}$$

$$\text{Potencia} = (133.2 \text{ N})(5.55 \text{ m/s})$$

$$\text{Potencia} = 739.26 \text{ Watts} \approx 1 \text{ hp}$$

Para conocer el trabajo que se requiere invertir para mover un vehículo con una masa de 240 Kg a una velocidad de 20 km/h en una distancia de 10 Km sobre una superficie horizontal se aplica la siguiente expresión:

$$\text{Trabajo} = W = \text{Fuerza} \cdot \text{distancia}$$

$$W = (133.2 \text{ N})(10,000 \text{ m})$$

$$W = 1332000 \text{ J} = 1.332 \text{ MJ}$$

Estos cálculos dan a conocer lo que el vehículo necesita para poder ser propulsado por cualquier tipo de energía, en este trabajo se plantea propulsar el vehículo con aire comprimido, el cual estará almacenado en tanques especiales para almacenar aire comprimido.

Para esta parte específica de cálculos el diseño del vehículo y el sistema generador de potencia que se implementará en él se proponen ciertos dispositivos tales como tanques de fibra de carbono los cuales son la mejor opción a implementar, pero en la construcción del prototipo se puede sustituir por otro tipo de equipo por ejemplo tanques de duraluminio los cuales tienen la misma función pero las capacidades de almacenamiento de aire comprimido diferencian en grandes medidas, esto depende principalmente por factores como son la disponibilidad del recurso económico así como la disponibilidad de esos tipos de tecnología en nuestra región.

A continuación se muestra un estimado de la cantidad de energía que proporciona un tanque de fibra de carbono ya que es la opción ideal para implementar en el vehículo y de este modo poder tener una idea de cuan viable sería el proyecto.

Se supone un tanque de fibra de carbono de 35 MPa de presión, este es el estándar de seguridad que se maneja para este tipo de tanques, el volumen inicial se desconoce por lo que se necesita buscar por medio de una expresión, el volumen final, es el volumen al cual será almacenado en un tanque de fibra de carbono similar en tamaño a un tanque de duraluminio de 3 m^3 , cabe destacar que el volumen al interior del tanque es de 0.09 m^3 , (el dato del tanque de 3 m^3 de duraluminio solo hace referencia a que se utilizará un tanque de fibra de carbono con medidas geométricas de espacio muy similares al tanque de duraluminio, la diferencia en sí es que la presión límite del tanque de fibra de carbono es superior y por tanto el volumen de aire que se puede comprimir y almacenar en el es mucho mayor, y es ese volumen el que se debe conocer).

Ahora se presenta la ecuación que describe el comportamiento del volumen, la presión y la energía de un gas:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

Datos:

$$P_1 = P_{atm} = 101.32 \text{ kPa}$$

$$V_1 = ?$$

$$P_2 = 35 \text{ MPa}$$

$$V_2 = 0.09 \text{ m}^3$$

$$k = 1.4$$

Se necesita conocer el volumen 1, por lo que es necesario despejarlo de la ecuación:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$$

$$V_1^k = \frac{P_2 V_2^k}{P_1}$$

$$V_1 = \sqrt[k]{\frac{P_2 V_2^k}{P_1}}$$

Sustituyendo valores de P_1 , P_2 , V_2 y k en la ecuación para hallar V_1 :

$$V_1 = \sqrt[1.4]{\frac{(35 \times 10^6 \text{ Pa})(0.09 \text{ m}^3)^{1.4}}{101.32 \times 10^3 \text{ Pa}}} = 5.8528 \text{ m}^3$$

Para conocer el trabajo que se puede extraer de esa cantidad de energía almacenada en un tanque de fibra de carbono con características antes mencionadas se utiliza la siguiente expresión:

$$W = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1 - k}$$

Sustituyendo los valores de P_1, P_2, V_1, V_2 y k se obtiene que el trabajo es:

$$W = \frac{[(35 \times 10^6 \text{ Pa})(0.09 \text{ m}^3)] - [(101.32 \times 10^3 \text{ Pa})(5.8528 \text{ m}^3)]}{1 - 1.4}$$

$$W = 6.39 \text{ Mj}$$

Para conocer la autonomía esperada del vehículo a base de aire hace falta convertir los Joules que proporciona el tanque a KWh y dividirlo por la potencia que se requiere para mover el vehículo (para este caso particular se utilizara el dato de potencia de 740 W, se propone utilizar la cantidad de 2 tanques de fibra de carbono como almacenadores de energía:

$$\text{Energía del tanque} = 6.39 \text{ Mj} = 1.77 \text{ KWh}$$

$$\text{Autonomía por tanque} = \frac{1.77 \text{ KWh}}{.740 \text{ KW}} = 2.39 \text{ h} = 143.5 \text{ minutos}$$

$$\text{Autonomía total} = 143.5 \text{ minutos} \times 2 \text{ tanques} = 287 \text{ min} = 4 \text{ h } 47 \text{ min}$$

El valor esperado de la autonomía del vehículo es de 4 horas y 47 minutos con 2 tanques de fibra de carbono de 6 metros cúbicos, si se compara este resultado con lo que proporciona un banco de baterías de un vehículo eléctrico se concluye que es más viable impulsar un vehículo con aire ya que es más liviano que una batería, almacena mayor cantidad de energía y es libre de contaminantes.

4.2 Presentación esquemática hecha a computadora del sistema de aire comprimido y su acoplamiento en un vehículo

Para llevar a cabo la etapa de diseño por computadora se partió desde diseñar un vehículo en el cual dispone de espacio suficiente para poder adaptar cada una de

las partes del sistema de almacenamiento de energía y generador de potencia por medio de aire comprimido, para ello se tuvo que realizar una revisión en el mercado de los diferentes tipos de tecnologías existentes para su futura implementación en el vehículo (mas adelante en este capítulo se muestran los equipos seleccionados a implementar en el vehículo) ya que este diseño es esquemático, sirve como una proyección del vehículo a base de aire comprimido.

Se utilizó el software AutoCad y se inició con el diseño de un vehículo de 4 ruedas tipo Go Kart, sin carrocería, para una sola persona, las dimensiones de este vehículo son de 1 metro de ancho por 1.7 metros de largo, a continuación se muestra la figura 15 en la que se ve desde una toma frontal del vehículo:

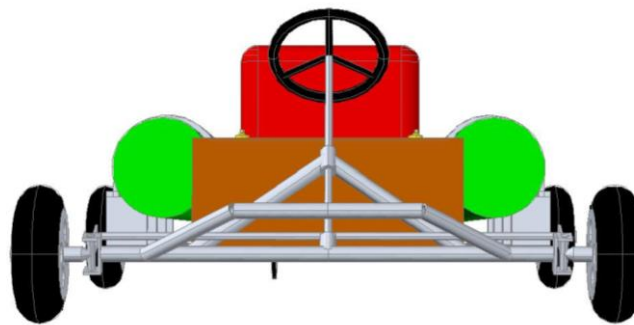


Figura 15. Vista frontal del esquema del vehículo a base de aire.

Como siguiente paso se llevo a cabo la representación de cada uno de los dispositivos que conforman al sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES), lo cual nos lleva listar cada uno de estos dispositivos, iniciando con los tanques de aire comprimido (2 piezas), válvulas de paso de aire comprimido (2 piezas), motor neumático de paletas (1 pieza), Sistema de engranes y cadena o poleas y banda (1 juego de piezas), mangueras de alta presión, bases o soportes sujetadores de las piezas que se van a implementar, etc. Las piezas antes mencionadas son las más importantes y características del vehículo a base de aire, también se requieren de otros tipos de materiales como tornillos, soldadura, etc.

Para este caso en que se muestra con fines esquemáticos es suficiente con mencionar y mostrar cada una de estas piezas montadas en el vehículo diseñado por computadora.

Ahora se muestran cada uno de estos sistemas por separado y después de ello se muestran algunas imágenes desde diferentes vistas del diseño por computadora del vehículo a base de aire comprimido. Para un mayor entendimiento del esquema se le asigno un color diferente a cada parte del sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido, las figuras 16 y 17 muestran esquemáticamente las partes que constituyen al sistema generador de potencia accionado con aire comprimido.

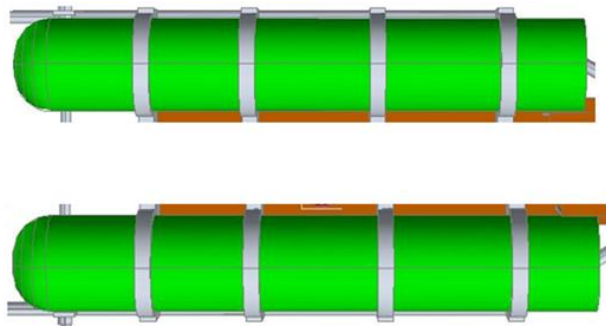


Figura 16. Representación gráfica de los tanques almacenadores de aire comprimido con soportes.

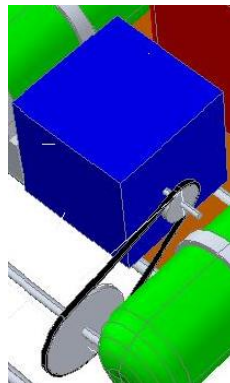


Figura 17. Representación gráfica del motor neumático de paletas (cubo azul) y sistema de cadena y coronas (discos grises y cadena negra).

El disco gris de mayor diámetro es la corona y es una pieza solida con el eje de las llantas traseras (es donde se lleva a cabo el impulso mecánico hacía las llantas); el disco gris de diámetro pequeño es el piñón y es donde el motor neumático de paletas entrega potencia hacia la cadena para después poder accionar al vehículo.

Hasta este momento las figuras mostradas con anterioridad son las principales partes que constituyen al sistema de almacenamiento de energía y generador de potencia por medio de aire comprimido, por consiguiente las figuras 18, 19, 20 y 21 muestran diferentes vistas de la representación esquemática del vehículo a base de aire comprimido:

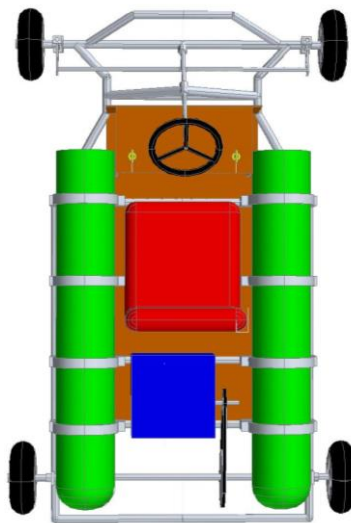


Figura 18. Vista superior del vehículo a base de aire comprimido. Bajo el volante se encuentra el panel de control donde se manejará las válvulas para controlar el flujo de aire comprimido.

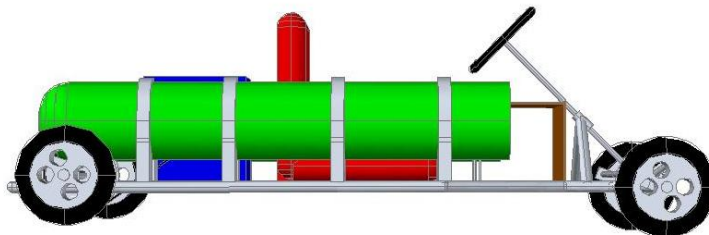


Figura 19. Vista lateral del vehículo a base de aire comprimido.

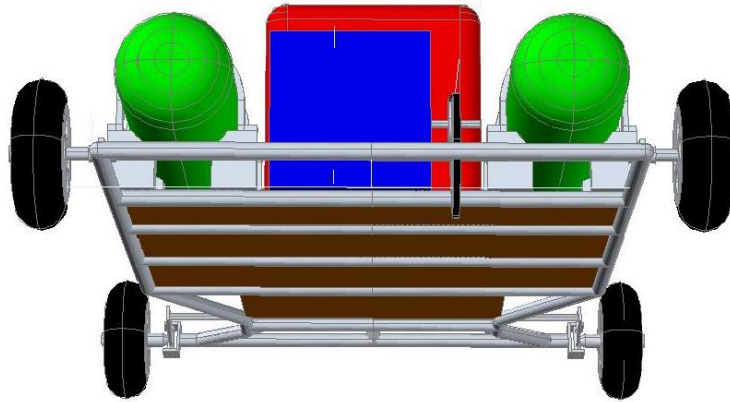


Figura 20. Vista trasera del vehículo a base de aire comprimido.

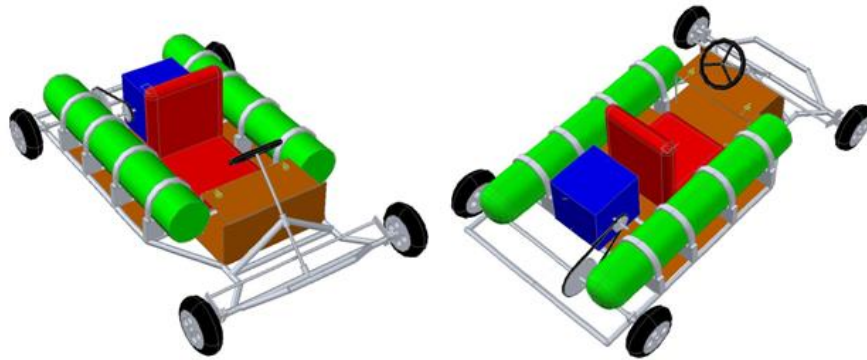


Figura 21. Vehículo a base de aire comprimido.

Como se puede observar en las figuras, el sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido se sujeta al chasis del vehículo por medio de abrazaderas, el motor neumático de paletas se soporta sobre el mismo chasis y se asegura con bases planas metálicas y tornillos por la parte superior, el sistema de engranes se sujeta de dos formas, el piñón se sujeta al motor neumático de paletas y la corona se sujeta hacia el eje de las llantas traseras.

Este esquema es de gran importancia ya que sirve como un manual de cómo llevar a cabo la implementación del sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido en el vehículo.

4.3 Implementación del sistema de almacenamiento de energía y generador de potencia a base de aire comprimido en el vehículo

En este apartado se describe varios pasos para lograr a cabo el desarrollo del prototipo del vehículo a base de aire comprimido. Como primer paso se determinan los materiales y equipos así como dispositivos que se acoplaran, adaptaran e implementaran en el vehículo seleccionado, para ello se llevo a cabo con anterioridad una búsqueda en el mercado de los posibles equipos a utilizar. Luego entonces se lleva a cabo la construcción de soportes y piezas que servirán para la adaptación en el vehículo de cada uno de los equipos determinados, finalmente se muestra como evidencia el vehículo con el sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido implementado en el.

4.3.1 Selección de materiales

En esta sección se muestra la lista con imagen y breve descripción de los materiales y equipos seleccionados a utilizar para el desarrollo del prototipo del vehículo a base de aire comprimido:

1. Vehículo: Ecotaxi de 3 ruedas, 130 Kg de peso bruto, 25 Km/h máximo, carga total 300 kg.



Figura 22. Ecotaxi de 3 ruedas.

2. Tanques para aire comprimido de duraluminio de 3 metros cúbicos a 2000 psi, con regulador de presión.



Figura 23. Tanque de duraluminio con regulador de presión.

3. Motor neumático de paletas GAST, modelo 4AM-RV, 3000 rpm, 1.26 hp.

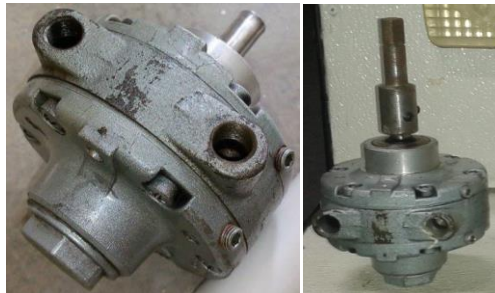


Figura 24. Motor neumático de paletas.

4. Sistema de engranes RAMSEY winch, 5000 rpm, 5 hp.



Figura 25. Sistema de engranes.

5. Piñón, corona y cadena de motocicleta, HONDA 2000.



Figura 26. Piñón y cadena.

6. Perfil de hierro cuadrada de 1.5 pulgadas, 1 metro de largo.



Figura 27. Perfil de hierro.

7. Tornillos de acero inoxidable, 3/8 de pulgada, 2 pulgadas de largo, con tuerca, rondana plana y de presión.



Figura 28. Tornillos de acero inoxidable.

8. Soldadura para hierro y planta para soldar.

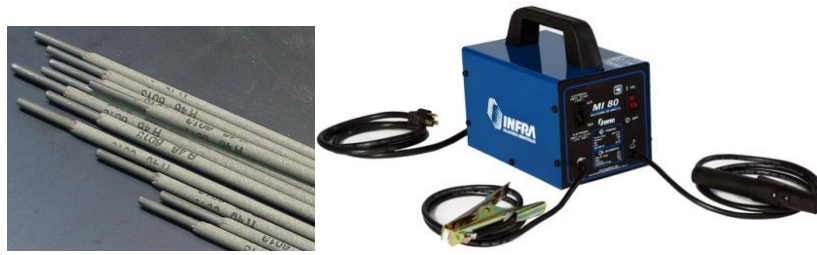


Figura 29. Equipo para soldar.

9. Manguera de alta presión para aire de 1/4 de pulgada y conexiones de bronce para gases, marca Parker Store.



Figura 30. Manguera y conexiones para flujo de gas.

10. Taladro de banco y brocas de 3/8, 1/4 de pulgada.



Figura 31. Taladro de banco y broca.

4.3.2 Proceso de adaptación del sistema CAES en el vehículo

El proceso de adaptación del sistema CAES se realizó en varias etapas, estas etapas se diferencian en el acople de cada parte que constituye al sistema CAES en el ecotaxi, dichas etapas son el acople del tanque para aire en el ecotaxi, el acople del sistema de engranes en el ecotaxi, el acople del motor neumático de paletas en el sistema de engranes, el acople entre el sistema de engranes y el diferencial del ecotaxi y el acople por medio de ductos entre el tanque para aire comprimido y el motor neumático de paletas. Cada una de estas etapas se explicará a continuación y se describirá paso a paso lo que se llevó a cabo para lograr la adaptación del sistema CAES en el ecotaxi.

4.3.2.1 Ensamble de tanque para aire comprimido en ecotaxi

1. Se verificó el área y volumen disponible en el ecotaxi para fijar el tanque.
2. Se determinó el lugar para colocar el tanque, la mejor opción fue en la parte posterior del ecotaxi debido a que cuenta con un volumen ideal y justo en que entraba el tanque y queda soportado y fijado sin tener que hacer demasiadas modificaciones.
3. Se procedió a pintar un círculo como guía para realizar un corte en la carrocería, como se puede observar en la figura 32:



Figura 32. Círculo guía para realizar corte para insertar tanque.

4. Se realizo el corte con segueta sobre el círculo marcado y se limo la circunferencia obtenida con una lima de fierro para eliminar rebabas, se aprecia en la figura 33:



Figura 33. Corte circular para inserción del tanque de aire.

5. Finalmente se inserto el tanque en el lugar que le corresponde, quedando de la manera en que se ve en la figura 34:



Figura 34. Tanque acoplado en el ecotaxi.

4.3.2.2 Acople del sistema de engranes en el ecotaxi

1. Se construyo una base de perfil cuadrado de fierro de 1.5 pulgadas para fijar el sistema de engranes, esta base de fierro cuenta de dos partes separadas las

cuales tienen diferentes medidas de longitud, una de ellas mide 45 cm de largo y la otra 27 cm de largo, se utilizó lima de hierro para eliminar rebabas.

2. Se requirió la utilización de un taladro para perforar los perfiles con una broca de 3/8 de pulgada y de esa manera sujetar el sistema de engranes a la base de hierro, se utilizó lima de hierro para eliminar rebabas.

En la figura 35 se muestra esta actividad:



Figura 35. Perforaciones en la base de hierro para sistema de engranes.

3. Se realizaron algunos desbastes en uno de los perfiles para que pudiese encajar en el diferencial del ecotaxi. Luego se obtuvieron ambas partes de la base terminadas para poder sujetar firmemente al sistema de engranes, Como se visualiza en la figura 36:

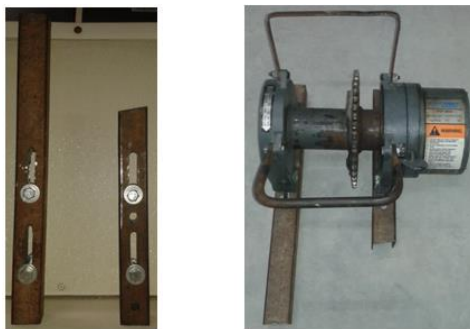


Figura 36. Sistema de engranes sujeta a base de hierro.

4. Se llevó a cabo la sujeción de la base de hierro del sistema de engranes en el ecotaxi por medio de soldadura para 3 extremos de la base y el cuarto extremo se sujetó por medio de un tornillo de 1/4 de pulgada, 2 extremos de la base del

sistema de engranes se soldó a un soporte metálico en la parte trasera del ecotaxi, la punta del soporte más largo se soldó al diferencial del ecotaxi y la punta corta de la base del sistema de engranes se sujeto por medio de tornillos al diferencial, quedando completamente fijado en el vehículo de la manera en que se muestra en la figura 37:



Figura 37. Sistema de engranes acoplado en el ecotaxi.

4.3.2.3 Acople del motor neumático de paletas en el sistema de engranes

Para esta etapa basto con hacer una pieza la cual tiene la función de unir el eje del motor neumático de paletas con el sistema de engranes, esta pieza es una conexión o extensión del eje la cual por un extremo tiene un orificio donde entra el eje del motor neumático y se sujeta por medio de 2 opresores de este modo queda perfectamente fijado al motor neumático como se aprecia en la figura 38:



Figura 38. Pieza torneada para conexión entre engranes y motor neumático.

En el otro extremo se torneo y se le dio la forma precisa que se necesita para que el eje pudiese embonar en el sistema de engranes, al ser una pieza torneada y darle la forma necesaria no se requiere de ningún tipo de sujeción solo bastó con embonar el eje al sistema de engranes, en la siguiente imagen se aprecia esta pieza conectada por un lado al motor neumático de paletas y el otro extremo con el sistema de engranes, a su vez todo el sistema montado en el ecotaxi, quedando como se observa en la figura 39:

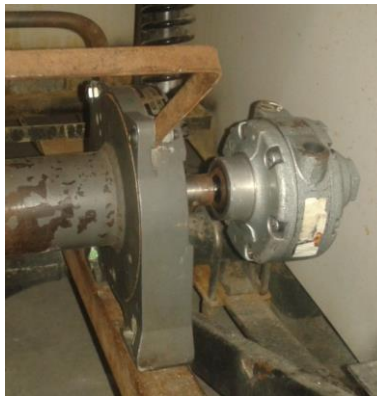


Figura 39. Motor neumático y sistema de engranes acoplados.

4.3.2.4 Acople entre el diferencial del ecotaxi y el sistema de engranes

En esta etapa se realizaron 3 actividades, las cuales se describen a continuación:



Figura 40. Piñón soldado al conector del diferencial del ecotaxi.

1. Del sistema de coronas y cadena que se seleccionó se tomó el piñón (la corona más pequeña) y se soldó a una pieza que conecta al diferencial (esta pieza se conecta con el diferencial por medio de dientes).

La figura 40 muestra la actividad antes mencionada:

2. Se continuó soldando la corona de mayor tamaño al sistema de engranes, debido a que el sistema de engranes proporciona mucha fuerza se decidió que la configuración del piñón y corona quedara de esa manera para poder obtener más velocidad en el ecotaxi, se observa en la figura 41:



Figura 41. Corona soldada al sistema de engranes.

3. Finalmente se llevo a cabo la instalación de la cadena en las coronas, para ello se tuvo que ajustar la cadena al tamaño requerido para que pudiese haber una transferencia de movimiento mecánico rotatorio entre el sistema de engranes y el diferencial, por lo que se requirió de cortar la cadena a una longitud más pequeña a la que traía originalmente, en la figura 42 se observa esta actividad:

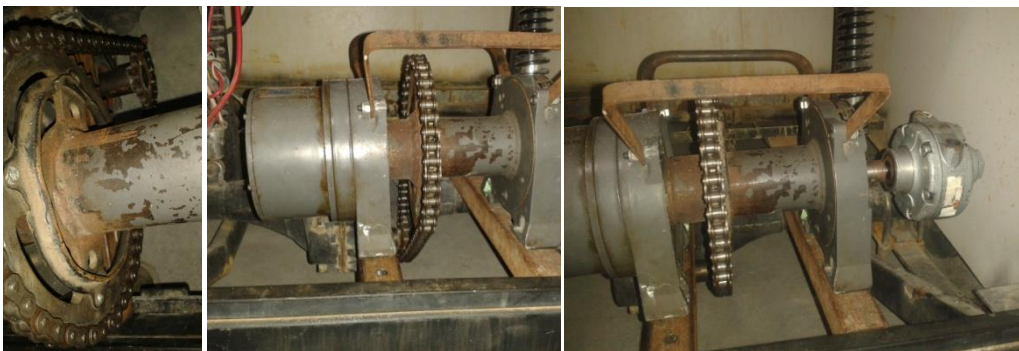


Figura 42. Instalación de coronas y cadena.

4.3.2.5 Acople entre tanque para aire comprimido y motor neumático de paletas.

Como etapa final se procedió a realizar la conexión entre el tanque que almacena aire comprimido con el motor neumático de paletas el cual es el sistema que va a aprovechar la energía del aire comprimido transformándola en movimiento mecánico giratorio, para ello se utilizaron 4 conexiones de bronce, una de ellas se conecto al motor neumático, otra se conecto al tanque de aire comprimido, y las otras 2 se conectaron a una válvula de paso, todas las roscas fueron forradas con cinta teflón para evitar fugas y posteriormente roscadas.

Luego entonces se procedió a conectar la manguera de alta presión para aire en estos conectores, cabe destacar que hasta este punto era necesario llegar para tener listo el prototipo. El prototipo quedo de la manera en que se muestra en la figura 43:



Figura 43. Vehículo a base de aire comprimido.

4.4 Análisis de velocidad

Las siguientes ocho pruebas se realizaron con un tanque de 3 metros cúbicos de capacidad a 3000 PSI y un regulador de presión para ajustar la presión requerida con la intención de adquirir datos de velocidad, tiempo y presión para posteriormente ser analizados y de este modo conocer el comportamiento que tiene el prototipo del vehículo a base de aire comprimido.

Prueba 1. Experimento a 40 PSI

En la figura 44 se muestra la curva del comportamiento del vehículo accionado a 40 PSI.

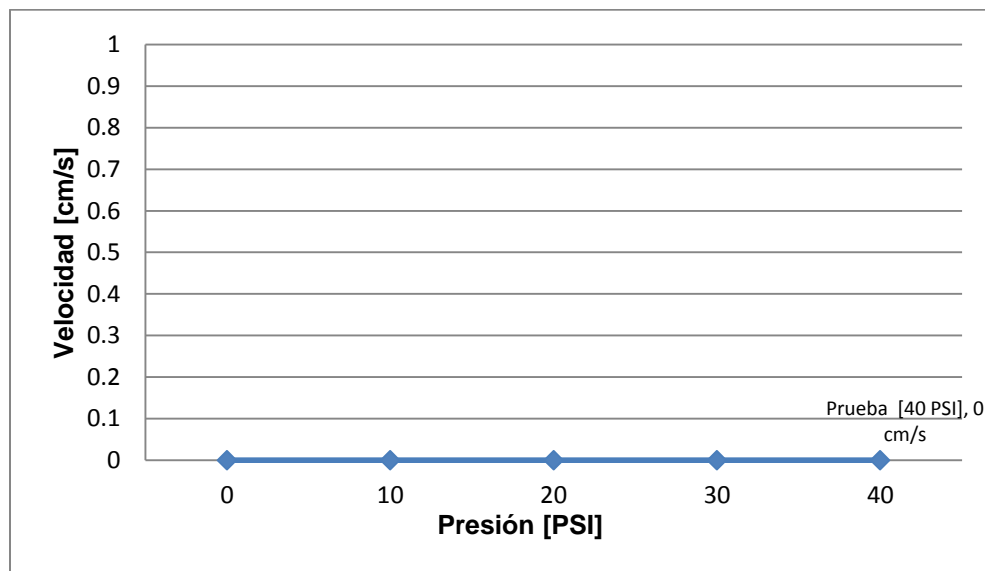


Figura 44. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 1 en vacío a 40 PSI de presión.

Como se observa en la figura la velocidad que alcanzan las ruedas del vehículo al ponerlo en marcha estando en vacío (sin carga) es de 0.0 cm/s , el proceso que se realizó para llevar a cabo la adquisición del dato fue mediante la observación tomando en cuenta la distancia recorrida durante el lapso de tiempo que se suministro aire comprimido a alta presión en el motor neumático que

posteriormente acciona las llantas del vehículo por medio del sistema de engranes a través de la transmisión mecánica de cadena y piñón.

Prueba 2. Experimento a 50 PSI

La figura 45 muestra el comportamiento de la velocidad del vehículo accionado a una presión de 50 PSI en vacío.

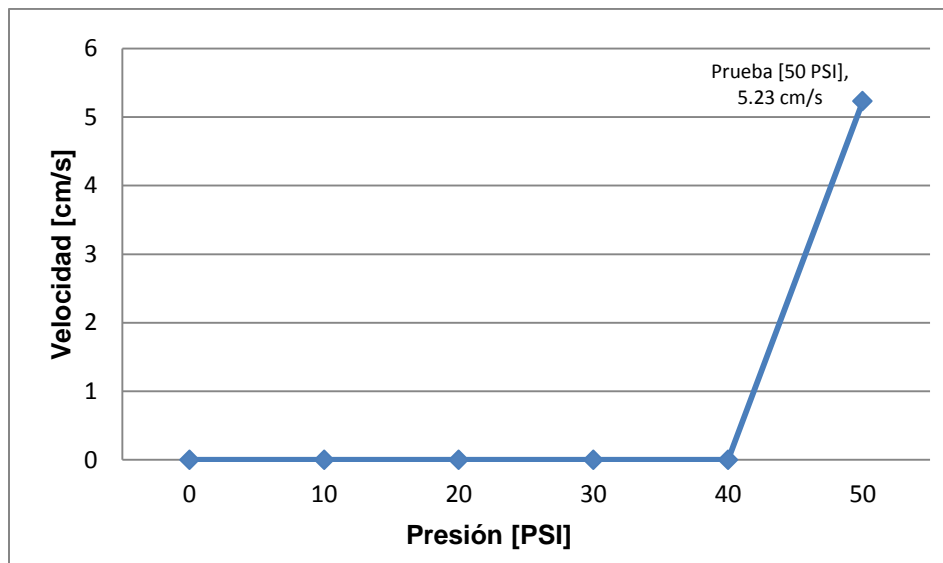


Figura 45. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 2 en vacío a 50 PSI de presión.

En esta figura se observa que la velocidad para la prueba de 50 PSI es de 5.23 cm/s, el proceso realizado se desarrollo liberando aire a alta presión en el motor neumático por medio de una válvula de paso y se obtuvo el dato por medio de la observación, en donde se tomo en cuenta la distancia recorrida por las llantas y el lapso de tiempo de suministro de aire comprimido en el motor neumático durante su funcionamiento.

Prueba 3. Experimento a 60 PSI

Es esta prueba se realizó el mismo experimento, aumentando 10 PSI de presión en el motor neumático, en la figura 46 se muestra la curva del comportamiento de la velocidad del vehículo.

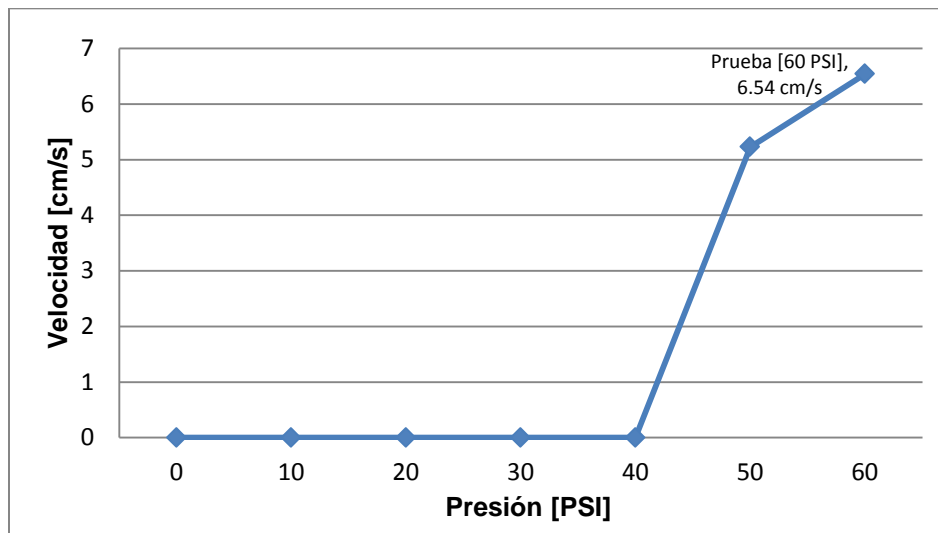


Figura 46. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 3 en vacío a 60 PSI de presión.

En esta figura se observa la velocidad alcanzada por el vehículo al suministrar 60 PSI en el motor neumático, la velocidad alcanzada es de 6.54 cm/s, la adquisición del dato se obtuvo por medio de la observación utilizando los datos de distancia recorrida de las llantas y el lapso de tiempo que se suministro aire comprimido a presión constante.

Prueba 4. Experimento a 70 PSI

La figura 47 muestra la curva del comportamiento de la velocidad para el accionamiento del vehículo a 70 PSI en vacío.

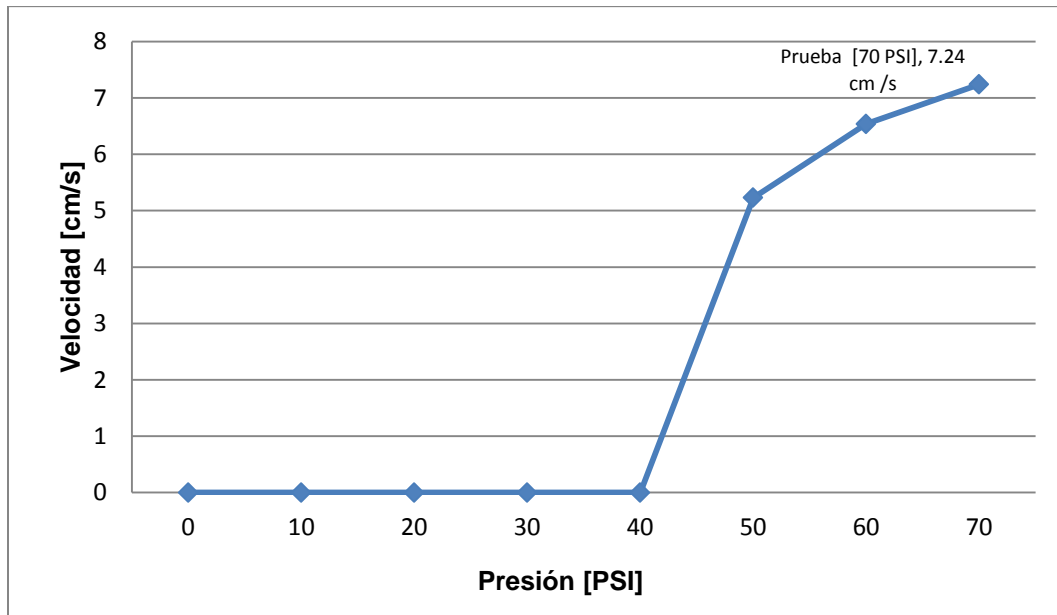


Figura 47. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 4 en vacío a 70 PSI de presión.

En esta figura se aprecia la velocidad alcanzada en las llantas del vehículo al ponerlo en marcha a una presión de 70 PSI, dicha velocidad es de 7.24 cm/s y este dato se obtuvo mediante la observación, realizando la liberación del aire comprimido en el motor neumático por medio de una válvula de paso y tomando los datos de distancia recorrida en el lapso de tiempo que se suministró la presión constante de 70 PSI.

Prueba 5. Experimento a 80 PSI

En este apartado la figura 48 muestra el resultado de velocidad del vehículo a una presión de 80 PSI para accionar el vehículo en vacío.

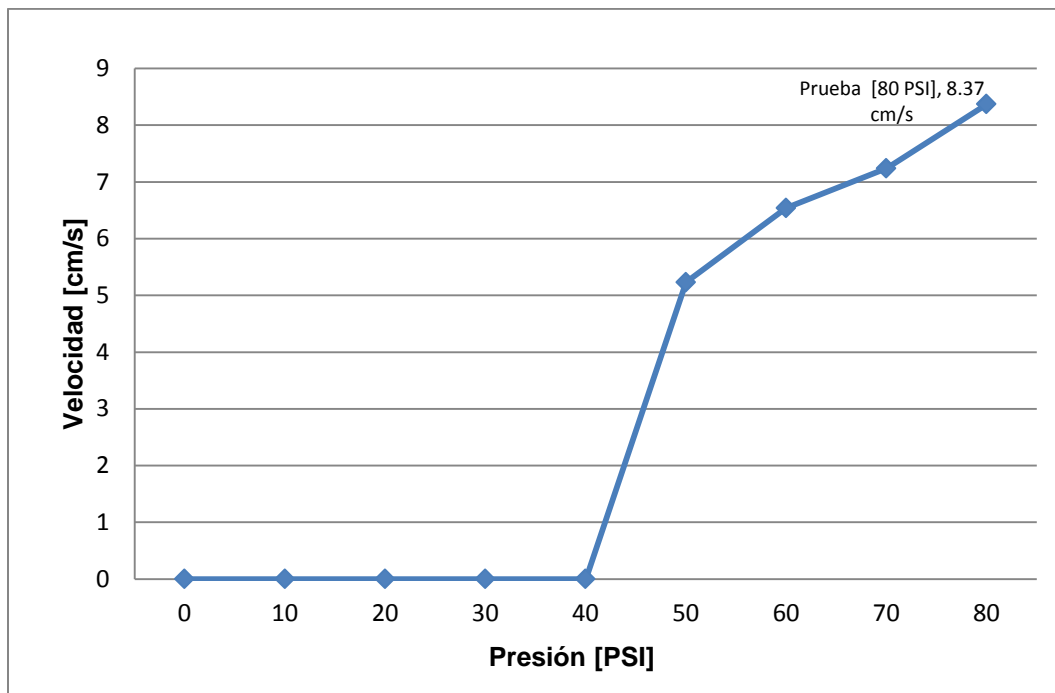


Figura 48. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 5 en vacío a 80 PSI de presión.

En la figura anterior se aprecia la velocidad del vehículo accionado en vacío a una presión de 80 PSI, la cual es de 8.37 cm/s, manteniendo constante la presión del suministro de aire comprimido, el dato se obtuvo de la observación, tomando en cuenta la distancia recorrida y el lapso de tiempo puesto en marcha.

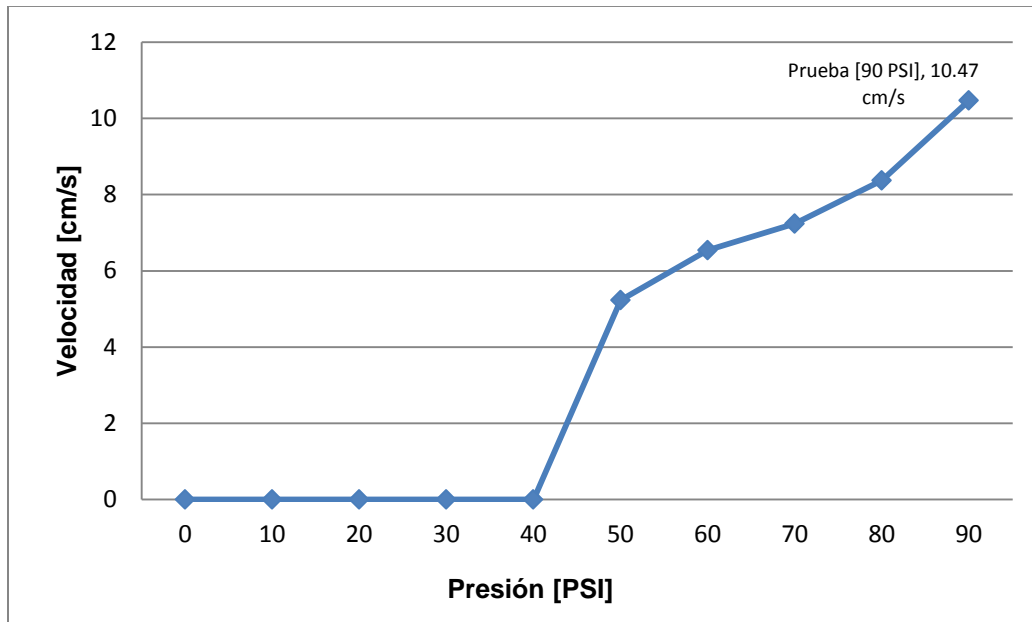
Prueba 6. Experimento a 90 PSI

Figura 49. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 6 en vacío a 90 PSI de presión.

En la figura 49 se conoce con exactitud la velocidad alcanzada durante el accionamiento del vehículo a 90 PSI, el cual es de 10.47 cm/s los cuales se mantienen constantes al mantener constante la presión del aire comprimido suministrado.

La adquisición del dato se obtuvo mediante la observación analizando los datos de distancia recorrida durante el lapso de tiempo de suministro de aire comprimido a alta presión.

Prueba 7. Experimento a 100 PSI

En la figura 50 se muestra la curva del comportamiento del vehículo accionado a 100 PSI.

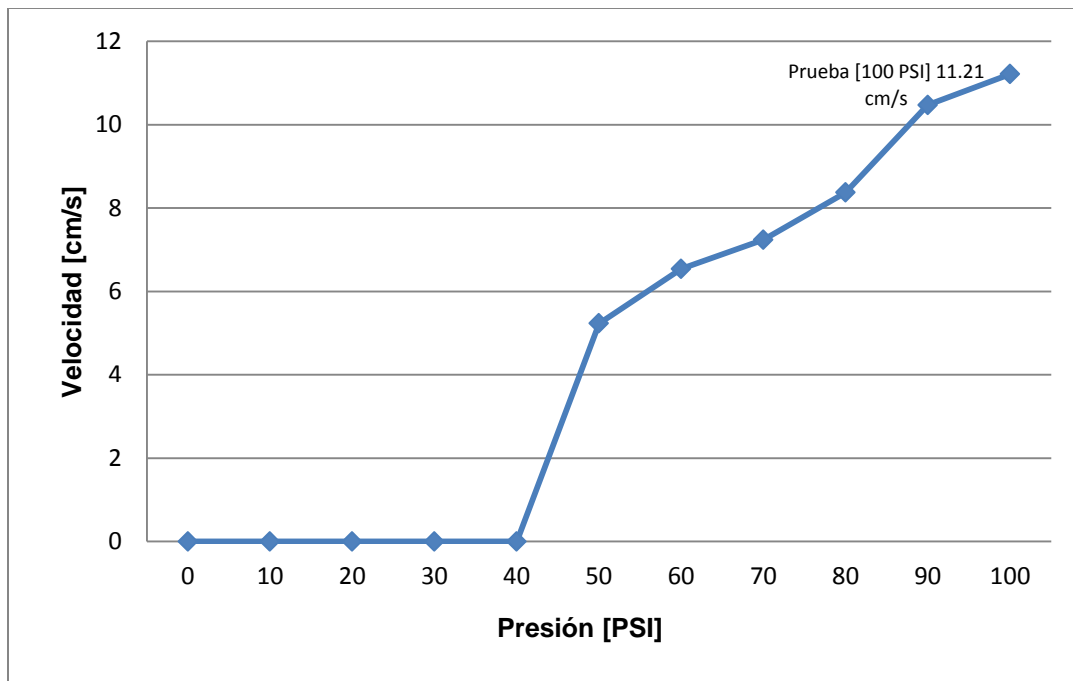


Figura 50. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 7 en vacío a 100 PSI de presión.

En esta figura se aprecia que la velocidad alcanzada para la prueba en vacío del vehículo accionado a una presión de 100 PSI fue de 11.21 cm/s.

El proceso de este experimento fue liberar el aire comprimido del tanque de almacenamiento en el motor neumático por medio de una válvula de paso, la adquisición del dato se tomó mediante la observación tomando en cuenta la distancia recorrida durante el lapso de tiempo que se suministró el aire a alta presión.

Prueba 8. Experimento a 110 PSI

Este prueba es la última prueba realizada debido a que el motor neumático tiene un límite de presión de funcionamiento teórico el cual ronda entre los 105 - 110 PSI, por tal motivo se decidió realizar esta prueba a 110 PSI, en la figura 51 se muestra la curva del comportamiento de la velocidad del vehículo en su puesta en marcha en vacío (sin carga), suministrando los 110 PSI de manera constante.

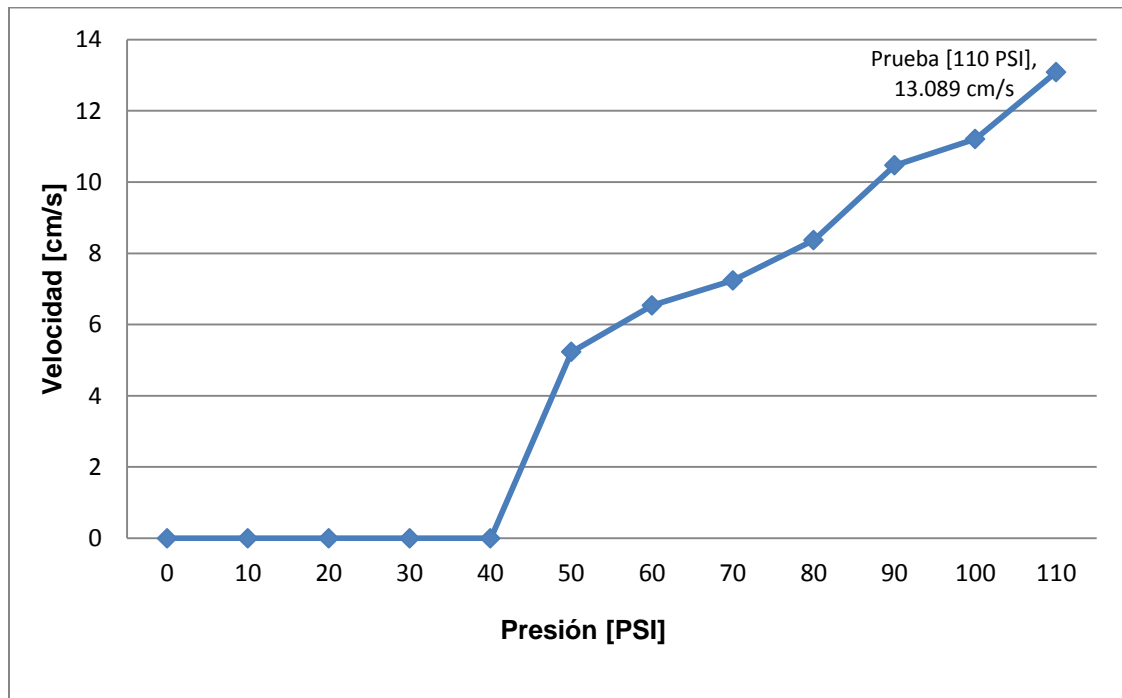


Figura 51. Curva de comportamiento de velocidad en [cm/s] de la prueba 8 en vacío a 110 PSI de presión.

Como se observa en esta figura la velocidad alcanzada por el vehículo es de 13.089 cm/s al suministrarle una presión constante de 110 PSI, la adquisición del dato se llevo a cabo mediante la observación midiendo la distancia recorrida de las

llantas del vehículo en el lapso de tiempo de suministro de aire a presión constante.

Cabe destacar que el proceso que se llevo a cabo en todas las pruebas para poder obtener los datos de velocidad alcanzada fue realizada al liberar presión del tanque de aire comprimido e inyectándola en el motor neumático que se encuentra conectado con el sistema de engranes y éste conectado al diferencial del vehículo por medio de una transmisión de potencia mecánica de cadena y piñón, esta liberación de presión se realizó iniciando con una presión de 0 PSI y posteriormente se liberó el aire comprimido mantenido en el tanque de almacenamiento por medio de una válvula de paso, para ello, logra alcanzar la presión de 110 PSI (para el caso de ésta última prueba son 110 PSI) por medio de un regulador de presión, esta velocidad se obtuvo mediante la observación debido a que la velocidad es muy baja y por lo tanto medirla con un velocímetro análogo o digital no fue posible, por lo que se recurrió a medir distancia recorrida en lapsos de tiempo y de este modo fue posible obtener la velocidad.

Es importante mencionar que este último gráfico muestra el comportamiento de la velocidad a diferentes presiones en rangos de 10 en 10 PSI, en otras palabras muestra en toda su extensión el comportamiento general del vehículo durante diferentes presiones de funcionamiento, esta gráfica muestra la evaluación completa del vehículo en términos de la velocidad.

4.5 Análisis de autonomía

El siguiente análisis corresponde a las pruebas de autonomía, el cual da a conocer el tiempo que el vehículo se mantiene en movimiento con cargas llenas de un tanque de aire comprimido de 3 metros cúbicos a 2000 PSI, sin embargo estas pruebas se realizaron con un compresor de 2.5 Hp y 25 litros de aire comprimido, de este modo se llevaron a cabo estimaciones para conocer la autonomía que brinda el equipo a diferentes presiones de trabajo. Se realizaron 8 pruebas

iniciando con la prueba a 40 PSI y continuando con las de 50, 60, 70, 80, 90, 100 y finalizando con la de 110 PSI, cabe destacar que para estas pruebas es necesario un regulador de caudal para así poder suministrar cierta cantidad de aire a la presión deseada por tal motivo se utilizó un compresor de baja capacidad, ya que éste suministra 25 litros de aire y con esta cantidad es suficiente para accionar el vehículo por algunos segundos, partiendo de esto se realizaron estimaciones suponiendo que el tanque de aire comprimido funcionando con un regulador de caudal proporcionaría los siguientes valores de autonomía que se muestran a continuación.

Prueba 1. Experimento a 40 PSI

La figura 52 muestra la autonomía del vehículo en la primer prueba realizada a 40 PSI.

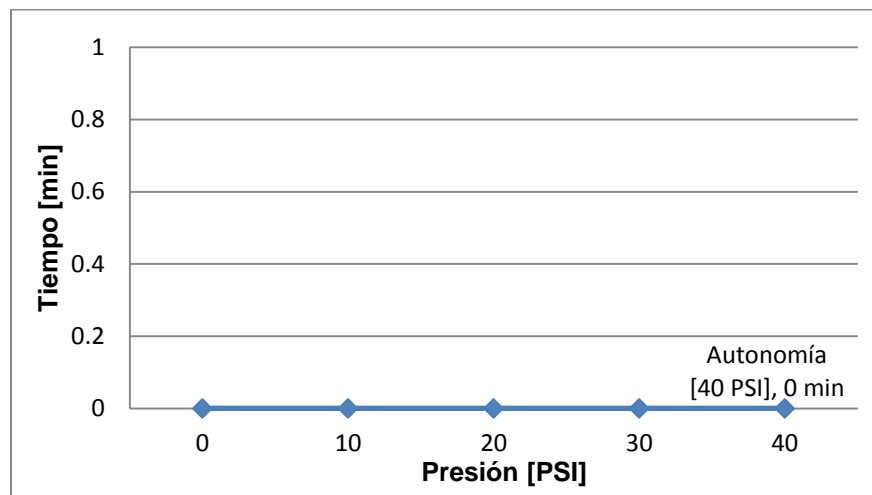


Figura 52. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 1 en vacío a 40 PSI de presión.

Esta figura nos indica que a partir del tiempo 0 a una presión en un rango de 0 - 40 PSI no existe ningún accionamiento del vehículo debido a que la presión es muy

poca y por lo tanto no es posible poner en movimiento las llantas del vehículo, el resultado de autonomía de esta prueba es de 0 minutos con 0 segundos.

Prueba 2. Experimento a 50 PSI

A continuación se muestra la figura 53 que enseña el resultado para la prueba 2 de autonomía para una presión de 50 PSI.

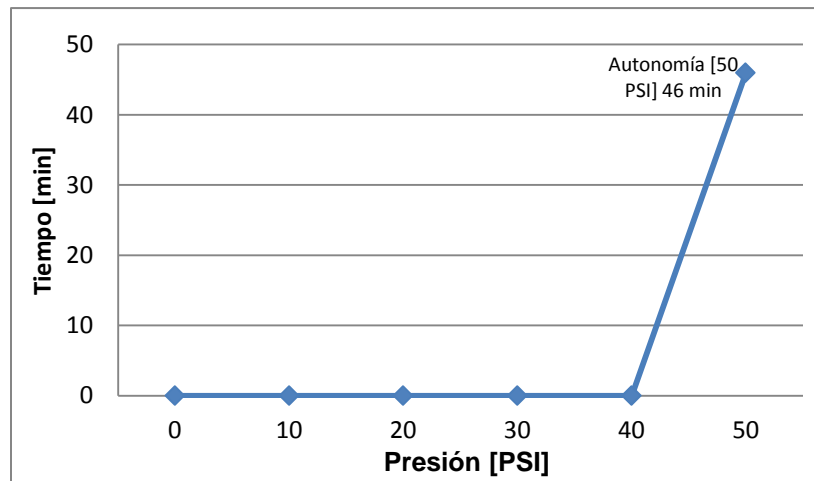


Figura 53. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 2 en vacío a 50 PSI de presión.

En la figura anterior se aprecia el resultado de autonomía para la prueba 2 correspondiente a la presión constante de 50 PSI, la autonomía obtenida en ese análisis fue de 46 minutos siendo ésta la mayor autonomía obtenida en todas las pruebas.

Esta figura nos indica también que a 50 PSI es posible mantener en movimiento el vehículo, (para conocer la velocidad de esta prueba vea el análisis de velocidad mostrado anteriormente).

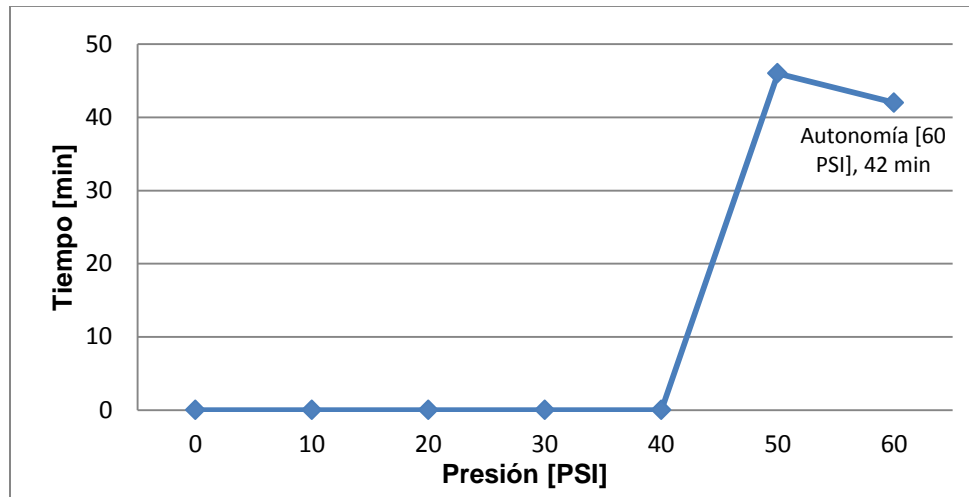
Prueba 3. Experimento a 60 PSI

Figura 54. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 3 en vacío a 60 PSI de presión.

En la figura 54 podemos observar que la autonomía es de 42 minutos para la prueba 3 correspondiente a 60 PSI, como se ve en la gráfica la autonomía a decaído debido a que la presión a la que trabaja es mayor que en la prueba 2, esto quiere decir que nuestra reserva de energía para accionar el vehículo se gastará en un lapso de tiempo más corto.

Prueba 4. Experimento a 70 PSI

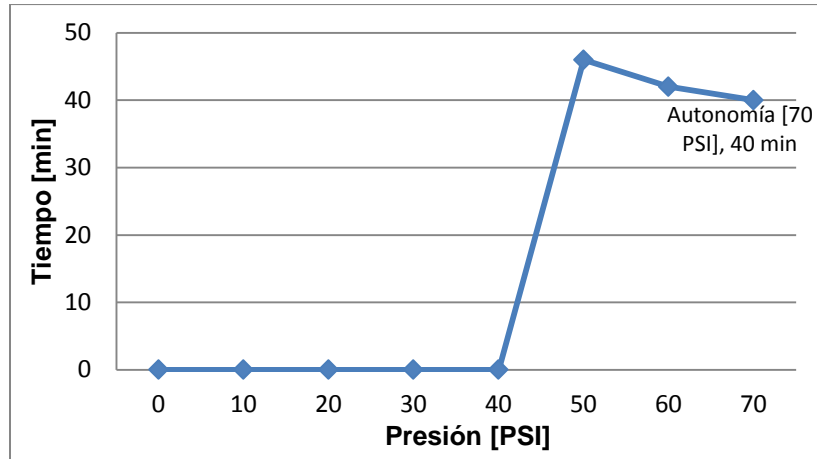


Figura 55. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 4 en vacío a 70 PSI de presión.

Como se muestra en la figura 55 la autonomía para la prueba correspondiente a los 70 PSI es de 40 minutos, podemos observar que la autonomía continúa siendo menor mientras la presión de trabajo aumenta.

Prueba 5. Experimento a 80 PSI

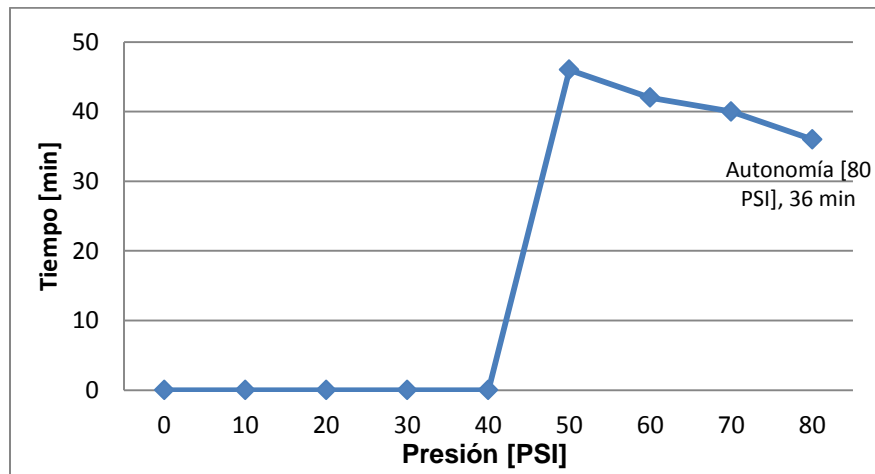


Figura 56. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 5 en vacío a 80 PSI de presión.

En la figura anterior se observa que la autonomía obtenida para la prueba 5 de 80 PSI es de 36 minutos, la autonomía se mantiene descendiendo conforme la presión de trabajo aumenta.

Prueba 6. Experimento a 90 PSI.

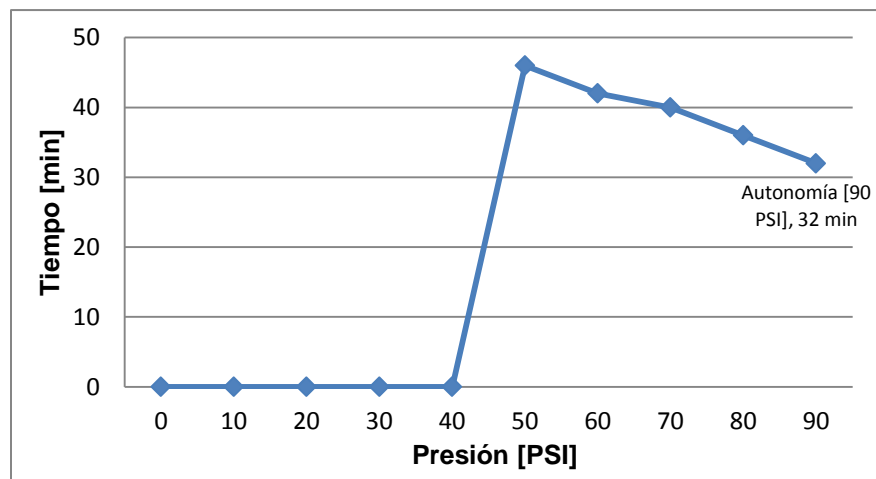


Figura 57. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 6 en vacío a 90 PSI de presión.

Para esta prueba se obtuvo una autonomía de 32 minutos, la cual corresponde a la presión de trabajo de 90 PSI, la autonomía continúa disminuyendo conforme se aumenta la presión de trabajo para accionar el prototipo, el comportamiento se ve en la figura 57.

Prueba 7. Experimento a 100 PSI

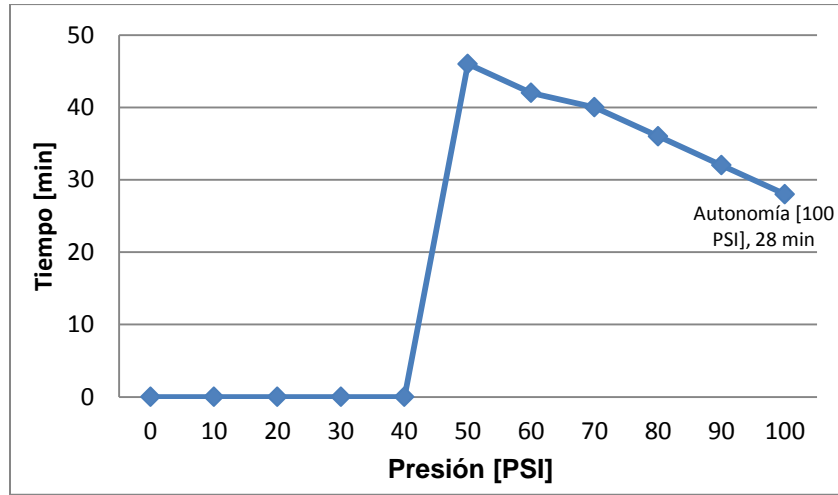


Figura 58. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 7 en vacío a 100 PSI de presión.

En la figura 58 de la prueba número 6 correspondiente a la presión de trabajo de 100 PSI se obtuvo una autonomía de 28 minutos, podemos observar como la autonomía sigue siendo afectada debido al aumento de la presión en el momento de accionar el vehículo, sabemos que a mayor presión la autonomía que ofrece el tanque de aire se acabará más rápido.

Prueba 8. Experimento a 110 PSI

En la figura 59 se da a conocer el valor de la autonomía para la prueba 8 correspondiente a la presión de trabajo de 110 PSI, el valor de la autonomía es de 24 minutos, podemos observar como la autonomía se ve afectada por utilizar mayor presión en el sistema, sin embargo existe lógica en que el comportamiento de la autonomía sea de este modo, debido a que el tanque que se tiene para accionar el vehículo se vaciará más rápido si se utiliza mayor presión y mayor cantidad de volumen de aire, por otra parte se ve reflejado el efecto que tiene la autonomía en las diferentes presiones de trabajo directamente en la velocidad, por

ejemplo, para una presión de 50 PSI el vehículo estará en movimiento por mucho tiempo sin embargo el movimiento será demasiado lento comparándolo con la prueba a 110 PSI en donde la autonomía será mínima pero la velocidad de las llantas del vehículo girarán con mayor rapidez.

Finalmente presentamos la última figura de la prueba de autonomía que corresponde a la presión de trabajo de 110 PSI, el comportamiento se muestra en la figura 59.

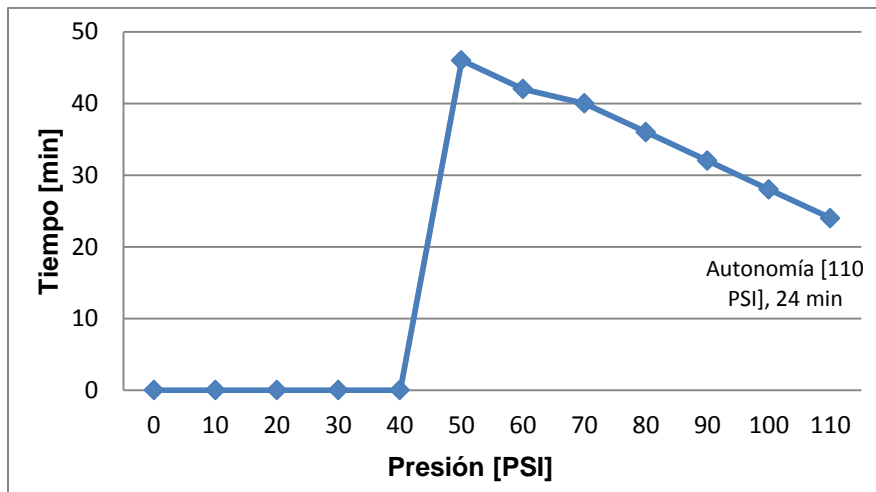


Figura 59. Curva de comportamiento de autonomía en [min] de la prueba 8 en vacío a 110 PSI de presión.

4.6 Comparación de costos para la compresión de aire por diferentes fuentes de energía

Este análisis nos muestra la comparación de costos para comprimir aire por diferentes tipos de fuentes de energía, los tipos de fuentes de energía que se consideraron son cuatro, los cuales son la energía de la red eléctrica nacional (CFE), la energía eólica, la energía solar fotovoltaica y finalmente la energía de combustible fósil particularmente la gasolina.

Continuando con este análisis se ha considerado tener un flujo constante de aire comprimido a 100 PSI y mantenerlo activo por un lapso de tiempo de 5 horas, debido a que ese tiempo es el que se quiere alcanzar como autonomía de este vehículo, cabe destacar que estos datos son dados de acuerdo con los resultados obtenidos de las evaluaciones, por tal motivo se supone mantener el flujo constante por determinado tiempo a determinada presión de aire.

De acuerdo con lo anterior fue necesario conocer la cantidad de energía que se necesita para comprimir 7.5 metros cúbicos de aire a *2000 PSI*, por lo que se realizaron algunos cálculos para obtenerla, la cantidad de energía que se necesita es de *11.19 kWh/día*, el precio de esta cantidad de energía es la que se necesita conocer, y se propone obtener esa cantidad de aire comprimido a las especificaciones dadas por medio de diferentes tipos de energía, de este modo se logra hacer una comparación de costos entre los 4 diferentes fuentes de energía que se proponen como alternativa para comprimir el aire, las cuales son (la red nacional de electricidad CFE, energía eólica, energía solar fotovoltaica y gasolina).

Continuando con el análisis, proseguimos a mostrar los datos de precios actuales y los obtenidos de cada uno de los tipos de fuentes de energía mencionadas para generar la energía que requiere la compresión del aire a las especificaciones determinadas:

1. Energía eléctrica de la red nacional (CFE, México).

La cantidad de energía a suministrar es de *11.19 kWh/día*, la Comisión Federal de Electricidad maneja diferentes tarifas de acuerdo al consumo de energía que se tenga, sin embargo la CFE cobra la energía utilizada bimestralmente, por lo que la cantidad de energía antes mencionada se calculará para un bimestre (60 días), esta cantidad de energía bimestral es de *671.4 kWh/bim*, de acuerdo con las tarifas que la CFE maneja, esta cantidad de energía se pagaría en 2 escalones, de acuerdo con las políticas de la CFE los primeros *300 kWh* consumidos del

bimestre se paga a un precio de \$0.595 MN por cada *kWh* consumido y el resto de los *kWh* (371.4 *kWh*) se pagan a \$ 0.741 MN por cada *kWh* consumido, por lo que la suma de ambos consumos de energía cobrados a diferente precio da un total a pagar de \$ 454.152 MN en el bimestre, al obtener el precio del consumo de energía diaria únicamente se divide el costo de la energía bimestral entre los 60 días que tiene un bimestre y nos arroja el valor diario de dicha cantidad de energía la cual tiene el valor de \$ 7.56 MN.

2. Energía eólica.

La cantidad de energía a suministrar es de 11.19 *kWh/día*, para suministrar esta cantidad de energía con energía eólica se necesita un aerogenerador que tenga una capacidad de 2.25 *kW*, por lo tanto se realizó una búsqueda de un equipo eólico que satisfaga esta necesidad y tomando en cuenta el costo del equipo, el costo de infraestructura, el costo de la instalación y el potencial disponible en la región se obtuvo como resultado que el precio que tendría la compración de 7.5 metros cúbicos de aire es de \$ 6.71 MN.

3. Energía solar fotovoltaica.

Para este apartado se conoce que la energía a suministrar es de 11.19 *kWh/día*, y esta cantidad de energía sería satisfecha por una central fotovoltaica de 2.25 *kW*, para ello se realizaron cotizaciones con diferentes empresas entre ellas se mencionan a Solarever, Conermex, contemplando el costo del equipo, el costo de la infraestructura, el servicio de instalación y el potencial disponible en la región se obtuvo como resultado el precio de la compración de 7.5 metros cúbicos de aire, el cual tiene un valor de \$ 23.49 MN.

4. Energía química almacenada en gasolina (combustible fósil).

Finalmente mostramos el resultado del precio de la compresión de 7.5 metros cúbicos de aire utilizando gasolina como fuente de energía, para este caso se realizaron cálculos para conocer la energía que proporciona este combustible dependiendo del tipo de gasolina y de la cantidad de gasolina a utilizar, como resultado se obtuvo que la compresión de los 7.5 metros cúbicos de aire tendría un costo de \$ 26.85 MN.

A continuación se muestra la figura 60 donde se observan los precios de cada una de las fuentes de energía para comprimir 7.5 metros cúbicos de aire y por ende la comparación de precios se refleja claramente en la gráfica.

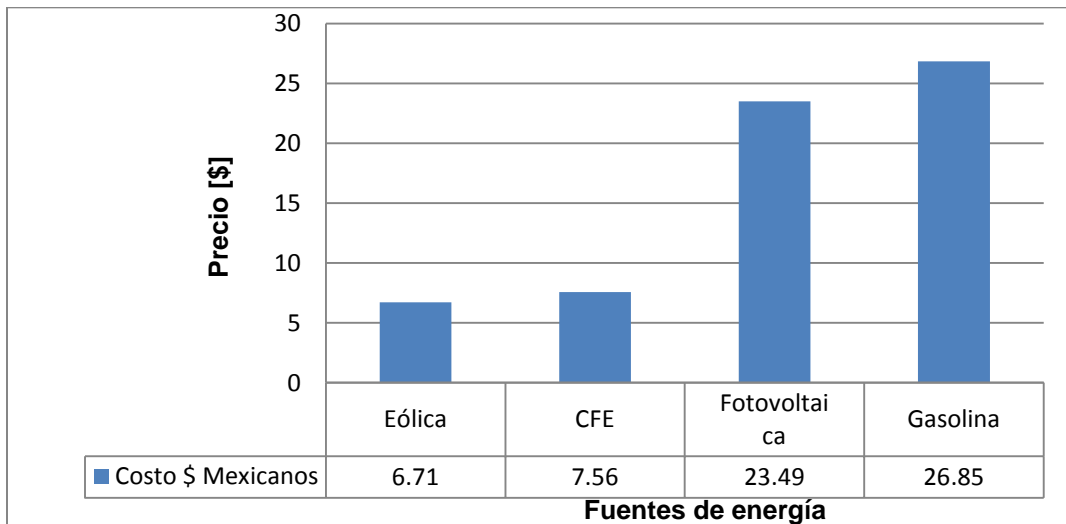


Figura 60. Comparación de precios para la compresión de aire por diferentes fuentes de energía en México.

Como se observa en la figura anterior, la mejor alternativa de energía que se puede utilizar para comprimir aire es la energía eólica debido a que ofrece una mayor viabilidad económica para satisfacer dicha necesidad, esto se debe en gran medida a que el recurso eólico que se tiene disponible en la región es alto y de este modo se vuelve atractivo para llevarlo a la aplicación, la segunda alternativa es utilizar la red nacional de electricidad ya que ofrece un costo accesible para llevar a cabo la compresión del aire a un bajo costo, por otra parte la energía solar fotovoltaica se posiciona en tercer lugar y la gasolina en último lugar, se puede apreciar en la gráfica que el costo para comprimir aire por cualquiera de estos dos

tipos de energía se eleva considerablemente, por lo que no son buenas alternativas para utilizarlos como principal sistema de alimentación para una planta de compresión de aire. Cabe destacar que estos precios varían con el cambio del dólar, los datos que se tomaron para obtener estos precios fueron obtenidos por medio de empresas activas en el 2015 en la Republica Mexicana en el mes de Noviembre del 2015, por lo que estos precios dependen directamente del valor del dólar conforme el paso del tiempo.

5. Conclusiones

1. La implementación del sistema de almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) en el vehículo eco-taxi tipo tres ruedas se logro con éxito.
2. Se logró exitosamente poner en marcha el vehículo en pruebas de vacío con la energía almacenada en un tanque de aire comprimido.
3. Se lograron exitosamente las actividades para la evaluación del prototipo "vehículo a base de aire comprimido" dichas actividades son la evaluación de la velocidad del vehículo y la evaluación de la autonomía.
4. Los datos obtenidos en las pruebas realizadas durante la evaluación de la velocidad son bajos, podemos ver que el motor neumático es de poca potencia para poder obtener una mayor velocidad en él vehículo debido a que el vehículo es muy pesado, en otras palabras se necesita un motor de mayor potencia para accionar el vehículo o en su defecto un vehículo menos pesado para ocupar el motor neumático que se tiene.
5. La velocidad del vehículo esta en dependencia de la presión del aire comprimido, de la cantidad de litros de aire por minuto que se le esté inyectando y de la potencia del motor neumático que se utilice.
6. De los datos obtenidos en la evaluación de autonomía podemos ver que a bajas presiones y bajo caudal de aire comprimido se obtiene la mayor autonomía de movimiento en el vehículo, para altas presiones y alto caudal de aire comprimido la autonomía se ve afectada en gran medida de tal manera que disminuye.
7. El vehículo rompe la inercia de las llantas y continua con su movimiento rotatorio a una presión de 100 PSI, después de esto el vehículo se puede mantener en movimiento hasta en una presión de 50 PSI, abajo de este valor el sistema se detiene y no produce ningún tipo de movimiento debido a que la presión es muy baja y no alcanza a romper la inercia.

8. En la actualidad existen empresas que se dedican a la creación de motores neumáticos para utilizarlos como herramientas a pequeña escala, por otra parte existe también una empresa que ha desarrollado un motor neumático para aplicaciones en móviles sin embargo, por política de esa empresa no comercializan esos motores, por lo tanto se abre una nueva línea de investigación para desarrollar motores neumáticos y así obtener las características deseadas para determinadas funciones que tenga que realizar.

9. En la actualidad en países muy desarrollados existen materiales avanzados para tratar el aire comprimido tal como el tanque de almacenamiento de aire comprimido, sin embargo, en México no se cuenta con ese tipo de tecnologías, por lo que se necesita desarrollar tanques especiales para el almacenamiento de aire comprimido que soporten una presión mayor que la que soportan las tecnologías locales, un ejemplo puede ser el desarrollo de tanques de fibra de carbono o de algún otro material resistente a la presión y liviano.

10. Se necesita diseñar un sistema de engranes ideal para aplicarlo como reductor en el vehículo que tenga la función de realizar cambios entre frecuencia de giro y torque en las ruedas del vehículo, de este modo se podría optimizar el funcionamiento, autonomía y velocidad del vehículo.

11. Del análisis de comparación de costos para comprimir aire por medio de 4 diferentes fuentes de energía el método con mayor viabilidad económica para comprimirlo es por medio de la energía eólica con un costo de alrededor de los \$ 6.97 MN por recarga de un tanque que almacene 7.5 metros cúbicos, continuando en segundo lugar se obtuvo que la red nacional de electricidad (CFE) es otra buena alternativa con un costo por tanque de \$ 7.56 MN y finalmente queda en tercer lugar la energía fotovoltaica y por último la gasolina, estos dos últimos con un costo superior a los \$ 20.00 MN.

12. Durante la etapa de evaluación de la velocidad del vehículo la velocidad máxima alcanzada fue de 13.08 cm/s en pruebas de vacío a una presión de

trabajo de 100 PSI, y el sistema se detiene por completo al disminuir la presión menor a 50 PSI, en este punto el vehículo se mantiene estático.

13. De la etapa de evaluación de la autonomía el máximo tiempo que se mantuvo al vehículo en movimiento fue de 46 minutos a una presión de trabajo de 50 PSI, y la mínima autonomía es de 24 minutos y fue alcanzada a una presión de trabajo de 110 PSI a 2 litros por minuto aproximadamente y para el vaciado completo de un tanque de aire comprimido de 3 metros cúbicos de capacidad.

Referencias

- [1] Naser M. Jubeh, yousef S. H. Najjar. Green solution for power generation by adoption of adiabatic CAES system. Elsevier Vol. 44, 85-89. Abril 2012.
- [2] Prassana Kenkre, Jacobs Engineering India Pvt. Ltd. Design and specification of a compressed air system, Chemical engineering 40-48, Enero del 2013.
- [3] John R. Sears, Thermal and compressed-air storage (TACAS): the next generation of energy storage technology, Active Power, disponible en línea en: <http://www.activepower.com/files/whitepapers/TACASwhitePaper.pdf>.
- [4] Silvent Headquarters, *Aire comprimido como forma de energía*, [en línea] Suecia, [Fecha de consulta: 18 Noviembre del 2014] disponible en: <http://www.silvent.com/es/competencias/aire-comprimido-como-forma-de-energia/>
- [5] Juan Carlos Campos Avella, Omar Prias Caicedo; Eficiencia energética en los sistemas de aire comprimido; Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente.
- [6] Sang Seung Lee, young Min Kim, jong Keun Park, Seung Il Moon, Yong Tae Yoon. Compressed air energy storage units for power generation and DSM in Korea. IEEE, 1. 1-6. 2007.
- [7] F.A. Farret and M.G. Simoes, Integration of alternative sources of energy, Wiley Interscience, 2006.
- [8] R. C. Dugan, T. E. McDermott, and G. J. Ball, Planning for distributed generation, IEEE Industry Applications Magazine, 80-88, April 2001.
- [9] J. S. Kim, Power storage technique using compressed air, KISTI Technical Report, 2003.

[10] PAVEL Valentina, BOBEAN Crina, Claw Pole Synchronous generator for compressed air energy storage. Journal of electric and electronics engineering. Vol.6, No. 1, Mayo 2013.

[11] Yung Huang, Kang Hu, Jie Yu, Kuo Sung. Experimental investigation on the performance of a compressed air driven piston engine. Energies, 6. 1731-1745. Marzo del 2013.

[12] Automatización industrial, Neumática, Hidráulica, Micro-Controladores y Automatas, [En línea] [Fecha de consulta: 18 de Marzo del 2016] Disponible en: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/09/elementos-de-fuerza-cilindros-y-motores.html>

[13] Carlos Ancajima, Jhoan Cubas, Jairo Pinedo, Luis Miguel Marcos; Concepción para el diseño de un motor de aire comprimido para vehículos menores; Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

[14] Jorge Félix Hernández, Ciclo Bryton Turbinas a gas, Edutecne, Universidad Tecnológica Nacional, Mayo 2009.

[15] Neumac, S.A. motores neumáticos, Polígono de Malpica, A, 16, 50016 Zaragoza, España, Diciembre 2004.

[16] Naima Manal, Laura de Alba, Definición de herramientas neumáticas, [En línea] eHow en español, [Fecha de consulta: 20 de Noviembre del 2014] Disponible en: http://www.ehowenespanol.com/definicion-herramientas-neumaticas-sobre_102728/

[17] Chicago Pneumatic, Historia: Décadas de innovación, [En línea][Fecha de consulta: 20 de Noviembre del 2014] Disponible en : <http://www.cp.com/mxes/whoweare/history/>

[18] Simple efficient and usefull technologies, Vehículos de aire comprimido, [En línea][Fecha de consulta: 22 de Noviembre del 2014] Disponible en: <http://usuaris.tinet.cat/sje/transport/aire.htm>

- [19] Y.A. Cengel, M. A. Boles, "Termodinámica", Mexico D.F., Mc Graw Hill, 2012, Capítulo 1.
- [20] Y.A. Cengel, M. A. Boles, "Termodinámica", Mexico D.F., Mc Graw Hill, 2012, Capítulo 4.
- [21] R. A. Serway, J. W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería Volumen 1, México D.F., Cengage Learning, 2008, Capítulo 20.
- [22] R. A. Serway, J. W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería Volumen 1, México D.F., Cengage Learning, 2008, Capítulo 21.
- [23] S. Kumar Khaitan y M. Raju, "Dynamic simulation of air storage-based gas turbine plants", International Journal of Energy Research, 37, Pag. 558-569, Nov. 2011.
- [24] R. A. Serway, J. W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería Volumen 1, México D.F., Cengage Learning, 2008, Capítulo 19.
- [25] A. J. Buenache Vega, Tecnología neumática, Madrid, 2010.
- [26] J. M. Pintor B. Teoría de máquinas, Universidad pública de Navarra.
- [27] R. A. Serway, J. W. Jewett, Física para ciencias e ingeniería Volumen 1, México D.F., Cengage Learning, 2008, Capítulo 7.
- [28] S.Y. Wang, J.L. Yu. Optimal sizing of the CAES system in a power system with high wind power penetration. Electrical Power and Energy Systems, 37. 117–125. Enero del 2012.