

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICRO TURBINA PARA GENERACIÓN,
IMPLEMENTADA EN CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO

AUTOR

DANIEL ALEJANDRO FRANCO URIBE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AERONÁUTICA
AERONÁUTICA
MEDELLÍN
2014

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICRO TURBINA PARA GENERACIÓN,
IMPLEMENTADA EN CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO

AUTOR
DANIEL ALEJANDRO FRANCO URIBE

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico

Director
JORGE IVAN GARCIA SEPULVEDA
MEng. Ingeniería Aeronáutica / MSc. Thermal Power (Gas Turbine Technology)

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

INGENIERÍAS

INGENIERÍA AERONÁUTICA

AERONÁUTICA

MEDELLÍN

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma

Ing. Juliana Niño Navia
Jurado

Firma

Ing. German Urrea Quiroga
Jurado

Firma

Ing. Jorge García Sepúlveda
Decano Facultad de Ingeniería
Aeronáutica

Medellín, Diciembre de 2014.

DEDICATORIA

A la memoria de una de las personas que más influyó positivamente en mi vida, con la cual compartí gran parte de mi infancia. Una mujer muy completa, poseedora de innumerables virtudes, correcta y acertada con lo que debía decir cuándo y cómo lo debía decir. Luchadora y enfocada en lo que quería para ella y su familia.

Me enseñó que aun cuando la vida coloca lastre en tus pies y te tira al fondo del mar, debes luchar por bracear y patalear cada vez más duro para poder salir a flote, hacerlo tan duro como si tu vida dependiera de ello.

Una de las grandes merecedoras de mi título de bachiller, meta que no puede compartirle y que ella se privó de ver, al dejarnos sin su compañía mucho antes de lo planeado. Con su partida de este mundo terrenal me dejó una última lección, dura de asimilar en su momento, pero que me acompaña desde entonces hasta hoy, presente en todos y cada uno de los días que he vivido. **Familia antes que nada.**

Permanentemente la vida nos pone pruebas, a veces duras y que consideramos insalvables. En nosotros está el levantarnos y superar los obstáculos. Hay que luchar por lo que queremos, aprovecharlo, disfrutarlo y cuidarlo celosamente, porque, el día menos pensado ese bienpreciado ya no estará. El tiempo es un recurso no renovable.

Tía desde acá y donde estés, siempre tendrás en mi ser y en mi corazón un espacio muy especial el cual llenaste con tu forma de ser. Infinitamente agradecido por todo el tiempo que compartiste conmigo, siempre vivirá tu recuerdo. Espero algún día me veas como una excelente y exitosa persona.

Te quiero y extraño.

Luz Cecilia Uribe Peláez “Tata”

AGRADECIMIENTOS

Directa o indirectamente todo proyecto involucra personas. Nombrarlas a todas puede ser una tarea dispendiosa o ingrata porque quizás no logre mencionarlas en su justa medida. Sin embargo, a lo largo del desarrollo de este proyecto se agradecí personal mente a quienes de una u otra forma tuvieron algo que ver con el desarrollo del trabajo y contribuyeron al logro, de esta instancia en mi carrera profesional. Recibí conceptos técnicos, de redacción, esquemáticos, y en general, diferentes puntos que consideré y tuve en cuenta en la realización de este trabajo.

Destaco a estas personas que me alentaron a seguir luchando por el título de ingeniero, cuando tantas veces consideré el desistir: Fernando Franco y Berta Uribe, mis padres siempre presentes para recibir mis momentos de alegría y de desaliento. A mi hermano, Ricardo Franco, en resumidas cuentas el mejor amigo que me dio la vida. Agradezco a Raquel Uribe y Ana Sofía Uribe, mis tías, quienes siempre han estado ahí para tranquilizarme, ayudarme a pensar con claridad, serenarme en algunas ocasiones y quienes me muestran y proponen otras alternativas de vida a seguir.

También, quiero agradecer en igual medida a los conocidos que me rodean, quienes me muestran cómo debo y no debo ser y actuar ante ciertas situaciones. Algunos de ellos me alentaron a continuar y a afrontar las decisiones ya tomadas, otros me dejaron lecciones de vida que ayudaron a forjar la persona que soy y me permitirá afrontar el mundo laboral.

En conclusión, quiero agradecer a todas las personas con las que he tenido contacto a lo largo de mi vida: por ellas, por lo que hicieron, lo que dijeron y lo que me aconsejaron o no, es que estoy en este momento de mi vida en este punto. Me enfocaron y ayudaron a desarrollar mi personalidad.

Gracias a todos por su apoyo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS	13
• Objetivo general.....	13
• Objetivos específicos	13
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	14
1.1. DISEÑO CONCEPTUAL	16
1.2. MICRO TURBINAS	17
1.3. CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO	21
• Turbinas implementadas en el campo automotriz.	22
2. PARÁMETROS DE DISEÑO	26
2.1. PARAMETROS DE POTENCIA.....	26
2.2. PARAMETROS TERMODINÁMICOS.....	29
2.3. PARAMETROS GEOMÉTRICOS.....	30
2.4. PARAMETROS ELÉCTRICOS	37
3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MICRO TURBINA.....	47
3.1. DESARROLLO TERMODINÁMICO	47
3.2. DESARROLLO GEOMÉTRICO	57
3.3. DISTRIBUCION ELÉCTRICA.....	68
4. VIABILIDAD DEL PROYECTO	73
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO.	73
4.2. MERCADO POTENCIAL; OFERTA Y DEMANDA.	75
• Oferta.....	77
• Demanda.	77
4.3. CANALES DE DISTRIBUCIÓN.....	78
4.4. VEHICULOS DE RANGO EXTENDIDO EN EL MERCADO ACTUAL.	79

CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86
ANEXO 1	1
ARTICULO PUBLICABLE.....	1
ANEXO 2	17
ANEXO 3	20
ECUACIONES IMPLEMENTADAS A TRAVES DEL PROCESO DE CÁLCULO.....	20
CALCULO GENERAL DEL CICLO.....	20
DISEÑO DEL COMPRESOR	21
ANEXO 4	22
GRAFICA DE RELACION ENTRE EL INCREMENTO DE TEMPERATURA EN LA CAMARA DE COMBUSTION VS LA RELACION COMBUSTIBLE AIRE	22

LISTA DE ELEMENTOS DE REFERENCIA

• Tablas

Tabla 1. Comparación cualitativa entre sistemas de generación recíprocos y micro turbinas.	24
Tabla 2. Vehículos de rango extendido comerciales y concepto.....	26
Tabla 3. Datos de potencia eléctrica máxima requerida.	27
Tabla 4. Temperatura de entrada a la generadora.	30
Tabla 5. Dimensionamiento del espacio para la generadora.	36
Tabla 6. Muestreo de datos que constituyen una tendencia en las características de los generadores eólicos.....	44
Tabla 7. Consumo extra de combustible por la demanda eléctrica adicional.....	46
Tabla 8. Datos generales de diseño.....	49
Tabla 9. Consolidado de las variables de presión y temperatura a lo largo del ciclo.....	57
Tabla 10. Parámetros iniciales de diseño geométrico.....	58
Tabla 11. Datos generales para el diseño del compresor.	60
Tabla 12. Valores obtenidos en el proceso iterativo para el cálculo de la velocidad radial.	62
Tabla 13. Datos generales para el difusor.	66
Tabla 14. Proceso iterativo para el cálculo de C_{r2}'	66
Tabla 15. Definición de variables.....	68
Tabla 16. Comparativo entre las variables geométricas.	68
Tabla 17. Requerimientos eléctricos.	68
Tabla 18. Relacion de variables teoricas y experimentales.....	72
Tabla 19. Comparaciones dimensionales	72
Tabla 20. Comparativo en areas de utilizacion.....	72
Tabla 21. Ventajas y desventajas de las microturbinas como sistemas de generación eléctrica en vehículos eléctricos de rango extendido.	73
Tabla 22. Características de las microturbinas como conjunto de generación eléctrica. ...	74
Tabla 23. Vehiculos alternativos de venta en el mercado mundial.	80
Tabla 24. Especificaciones; camión de rango extendido respaldado por una micro turbina	81

• Ilustraciones.

Ilustración 1. Vehículo de combustible fósil.	15
Ilustración 2. Turbinas: a). Microturbina b). Turbina B-777	17
Ilustración 3. Características: a). Aceptación tecnológica. b). Mercado objetivo.	18
Ilustración 4. Ejemplo de operaciones "offshore".	20

Ilustración 5. Vehículo híbrido.	21
Ilustración 6. Vehículo eléctrico de rango extendido.	22
Ilustración 7. Jaguar C-X75: a). Distribución de sistemas. b). Micro turbinas de generación.	23
Ilustración 8. Flujo de aire a través del vehículo.	31
Ilustración 9. Micro turbina empleada en el Jaguar C-X75.	32
Ilustración 10. Modelos de compresores.	32
Ilustración 11. Reducción del área efectiva del flujo.	33
Ilustración 12. Configuración interna de una cámara de combustión.	34
Ilustración 13. Dimensiones Chevrolet Volt.	35
Ilustración 14. Vista superior del Volt, y dimensionamiento geométrico.	36
Ilustración 15. Componentes del sistema de freno regenerativo.	39
Ilustración 16. Esquema de un generador termiónico.	40
Ilustración 17. Esquema de una termocupla.	40
Ilustración 18. Diagrama de un RTG _ " <i>Radioisotope Thermoelectric Generator</i> "	41
Ilustración 19. Composición de un generador eólico.	42
Ilustración 20. Curva de potencia para un generador eólico	42
Ilustración 21. Relación peso potencia en generadores eólicos.	43
Ilustración 22. Tendencia en las variables del generador eólico.	44
Ilustración 23. Generadores termo-eléctricos implementados en vehículos. a). Esquema de montaje del generador termo eléctrico.	45
Ilustración 24. Conjunto de generación general.	48
Ilustración 25. Modelo general para el ciclo de generación.	49
Ilustración 26. Puntos de control dentro del conjunto generador.	51
Ilustración 27. Modelo esquemático del intercambiador.	56
Ilustración 28. Componentes y puntos de control en un compresor centrífugo.	59
Ilustración 29. Triángulo de velocidades a la entrada del impeler.	62
Ilustración 30. Triángulo de velocidades a la salida del impeler.	63
Ilustración 31. Triángulo de velocidades a la entrada del difusor.	65
Ilustración 32. Dimensiones generales de la generadora de gases.	67
Ilustración 33. Esquema eléctrico de generación y almacenamiento.	70
Ilustración 34. Tendencia en ventas de vehículos eléctricos en el mercado norte americano.	75
Ilustración 35. Proyección de la oferta de vehículos propulsados eléctricamente para el mercado mundial.	76

GLOSARIO

Combustibles alternativos: combustibles que no provienen de fuentes fósiles finitas. Normalmente, tienen menos emisiones que contribuyan con la contaminación del aire o al smog. Ej: Celdas de hidrógeno, biocombustibles, electricidad, gas, diésel, entre otros.

Combustibles fósiles: son combustibles provenientes de un largo proceso de degradación, cuya principal característica es que no son energías renovables.

“Damper”: válvula de interconexión entre la generadora de gases y el intercambiador de calor. Se abre o cierra según el régimen de la operación.

Diseño conceptual: abstracción general del entorno, con lo cual se busca dar cuerpo a una idea respondiendo; cómo, por qué y para qué se pretende hacer dicho estudio o desarrollo.

“Eco”: toda persona o entidad que mediante la implementación de nuevos procesos o herramientas ayudan a preservar el medio ambiente.

Energía renovable: la que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, o naturalmente regenerables.

Frenado regenerativo: algunos vehículos eléctricos utilizan los motores que los impulsan como generadores arrancadores (M/G). Los cuales convierten la energía cinética obtenida a través de las llantas en energía eléctrica.

“Go-kart”: es un vehículo unipersonal de cuatro ruedas, el cual es utilizado en competencias deportivas o como elemento recreativo.

“Jetman”: (Yves Rossy), conocido así por ser el diseñador y creador de un ala impulsada por cuatro micro turbinas, la cual se coloca en la espalda a modo de mochila, para poder volar.

Micro turbina: sistema de flujo continuo, al interior del cual se mezclan aire y combustible buscando extraer la energía química presente en la mezcla, para luego transformarla en energía mecánica. El prefijo micro hace alusión a la cantidad de potencia que el sistema puede entregar.

Vehículo eléctrico de rango extendido: un carro eléctrico es aquel que utiliza como único medio de propulsión motores eléctricos. Al hablar de un vehículo eléctrico de rango extendido, nos encontramos con un carro que conserva las características de un carro eléctrico que adicionalmente posee un subsistema de respaldo que recarga las baterías.

TERMINOS Y ABREVIATURAS

A continuación se describen y relacionan las siglas que se han de utilizar a lo largo del desarrollo del proyecto:

$\varnothing_{im}$: Diámetro total del impeller.

A: Área transversal de la microturbina.

A_{ch} : Área del canal.

A_{diff} : Área del difusor.

A_{eff} : Área efectiva.

c: Velocidad del flujo.

C_a o C_{ri} : Velocidad radial en la posición “i” al interior del compresor centrífugo.

C_c : Largo de la cámara de combustión.

CDP: Presión entregada por el compresor.

C_{pa} , C_{pg} : Poder calorífico a presión constante.

D: Diámetro de la micro turbina.

E_A : Espacio de ancho.

$E_{entrada}$: Energía de entrada.

eff: Efectividad del intercambiador.

E_L : Espacio de largo.

E_{salida} : Energía de salida.

E_{sis} : Energía del sistema

E_ϕ : Diámetro del ojo del impeller.

FCV: Valor calorífico del combustible.

Fem: Fuerza electro-motriz.

h_i : Entalpia en la posición “i” del ciclo ($1 \leq i \leq 8$).

HPT: Turbina de alta presión.

I: Corriente.

LPT: Turbina de baja presión.

$\dot{m}$: Flujo másico al interior del intercambiador.

$\dot{m}_{aire}$: Flujo másico de aire.

$\dot{m}_{ff}$: Flujo másico de combustible.

$\dot{m}_{gas}$: Flujo másico de gas.

P: Potencia.

P_a , T_a : Presión y temperatura atmosférica respectivamente.

P_c : Presión crítica.

$P_{Max, req}$: Potencia máxima requerida.

$P_{max, req(c/u)}$: Potencia máxima requerida por cada motor eléctrico.

PR: Relación de compresión.

r: Radio de la micro turbina.

RPM: Revoluciones por minuto.
 RTG: Radio-isotopo Generador Termo eléctrico.
 S: Deslizamiento entre el campo magnético y el rotor.
 SFC: Consumo específico de combustible
 T_i, P_i : Temperatura y presión respectivamente, calculada en la posición “i” descrita en el ciclo ($1 \leq i \leq 8$).
 U o C_{wi} : Velocidad tangencial en la posición “i” al interior del compresor centrífugo.
 UPB: Universidad Pontificia Bolivariana
 V : Voltaje.
 V_R o C_i : Velocidad resultante en la posición “i” al interior del compresor centrífugo.
 W : Trabajo del intercambiador.
 W_c : Trabajo del compresor
 W_n : Trabajo neto ($W_{nt} - W_{nc}$).
 W_{nc} : Trabajo neto del compresor, considera todas las pérdidas del sistema.
 W_{nt} : Trabajo neto de la turbina. Se considera el trabajo entre la HPT y LPT.
 W_t : Trabajo de la turbina.
 α_i : Define el ángulo de entrada o de salida del flujo en la posición “i” al interior del compresor centrífugo.
 $\gamma_{aire}, \gamma_{gas}$: relación entre los poderes caloríficos ($\gamma = C_p/C_v$).
 ΔE_{vc} : Cambio de energía en el volumen de control.
 Δm_{vc} : Cambio de masa en el volumen de control.
 ΔP_b : Cambio de presión en la cámara de combustión.
 ΔP_{ha} : Cambio de presión en la sección de aire del intercambiador.
 ΔP_{hg} : Cambio de presión en la sección de gas del intercambiador.
 ΔT : Cambio de temperatura.
 ΔT_{cc} : Cambio de temperatura en la cámara de combustión.
 ΔT_{x-z} : Cambio de temperatura entre “x” y “z”.
 η_b : Eficiencia del jet.
 η_b : Eficiencia en la cámara de combustión.
 η_c : Eficiencia del compresor.
 η_{im} : Eficiencia del impeller.
 η_m : Eficiencia mecánica.
 η_t : Eficiencia de la turbina.
 ρ : Densidad.

RESUMEN

Este trabajo contiene información sobre carros eléctricos de rango extendido. Refiere, para qué están diseñados, trata aspectos importantes de su operación, métodos alternativos de generación y más ideas al respecto. Al tiempo, establece una comparación entre los vehículos de rango extendido, los vehículos híbridos y los vehículos convencionales, teniendo en cuenta los dispositivos que éstos utilizan para propulsarse y para generar la energía requerida.

Por otro lado se expone sobre las turbinas aeronáuticas como sistemas alternativos de cogeneración (conocidas técnicamente como Aero-derivadas), con fundamento en su estabilidad y eficiencia térmica, la alta confiabilidad y otras características de este tipo de sistemas. Adicionalmente, se ejemplifica el poco espacio requerido por ellas, en comparación con las plantas generadoras que actualmente operan en diversos campos de la industria.

Adicionalmente, se esquematiza el sistema eléctrico que se debe implementar para la generación y distribución eléctrica, dando pie para futuros desarrollos detallados sobre este tema.

Finalmente y como producto de esta investigación, se presenta un breve pero concreto estudio de viabilidad acerca de la implementación de este tipo de sistemas en los vehículos del día a día, basado en encuestas, resultados teóricos obtenidos y conjeturas personales sobre la información adquirida a lo largo del desarrollo de este documento.

INTRODUCCIÓN

El proyecto surge luego de estudiar y exponer las ventajas y desventajas que existen en el campo automotriz entre los vehículos sin y con emisiones, vehículos alternativos y de combustible fósil. Según estudios realizados por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) en el 2011, la aceptación de los vehículos 100% eléctricos ha tenido un desarrollo estancado gracias al poco apoyo que ofrecen los entes gubernamentales de los diferentes países. Ya que a pesar que los clientes conocen en gran medida las características de un vehículo eléctrico, no optan por su compra al ver la carencia de una infraestructura definida para el reabastecimiento fuera de casa de los mismos. Ante esta situación es que surgen dos clases de vehículos los cuales dan cabida a las tecnologías emergentes mientras que aprovechan la infraestructura de reabastecimiento de combustible preexistente. De esta forma se logra mitigar en cierta medida el impacto medioambiental al tiempo que se continúan promocionando los vehículos alternativos. Ambas clases de vehículos se conocen como:

- Híbridos
- De rango extendido

Posteriormente, a medida que se ahonde en el tema, se establecerá la claridad y diferencia entre estos vehículos.

El enfoque puntual del proyecto se dará alrededor del concepto de vehículo de rango extendido, ya que la implementación y desarrollo de carros eléctricos ha venido en constante aumento en los últimos años.

Al tener un vehículo de rango extendido se puede hablar, de dos sistemas principales que lo conforman: el sistema de propulsión y el sistema de reserva (o respaldo), cada uno de ellos destinado a cumplir labores específicas. Para este caso, y retomando lo mencionado en el párrafo anterior, se considera el diseño de una micro turbina implementada para generación eléctrica, como sistema de respaldo de un vehículo eléctrico de rango extendido, con el fin de interrelacionar el enfoque práctico de este trabajo con la información teórica adquirida a lo largo del pregrado en ingeniería aeronáutica. Puntualmente en las áreas de sistemas de propulsión, donde nos familiarizamos con el concepto de generadora de gases (más conocido como turbina).

OBJETIVOS

- Objetivo general
 - ✓ Diseñar conceptualmente una micro turbina para generación eléctrica, implementada en carros eléctricos de rango extendido.
- Objetivos específicos
 - ✓ Determinar el estado del arte que existe en el campo de las micro turbinas, y su implementación en el sector automotriz.
 - ✓ Definir los parámetros y valores relevantes para el diseño conceptual de la micro turbina.
 - ✓ Realizar los cálculos termodinámicos de la micro turbina.
 - ✓ Desarrollar el dimensionamiento de la micro turbina.
 - ✓ Presentar las ventajas y desventajas de implementación, presentando una aproximación a la viabilidad del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En el sector automotriz se vive una dualidad entre avanzar a nuevas tecnologías de locomoción o ahondar y mejorar los sistemas que se utilizan actualmente, ambos lineamientos respaldados por los intereses personales de las compañías directamente beneficiadas o afectadas.

En un punto intermedio se encuentran los clientes, personas comunes a quienes atiborran de información, por un lado, sobre las ventajas que tiene cada desarrollo, y por el otro, con reservas sobre las desventajas que tiene cada sistema con respecto al otro, logrando que la decisión del cliente sea favorable para uno u otro sistema. Con esta actitud del sector, se tiende a agrandar la brecha existente entre los vehículos sin emisiones y los que implementan combustibles fósiles, creando así una polarización del mercado (soy o no “eco”).

Se propone desarrollar un punto intermedio entre ambos puntos de vista, de forma que se aprovechen las ventajas de ambas opciones y se consoliden en un solo producto. Es bajo esta concepción que surge la idea de un vehículo de rango extendido, el cual utilice motores eléctricos para desplazarse y un subsistema de respaldo, en este caso una micro turbina, alimentada por combustibles fósiles para reaprovisionar la carga de las baterías mientras suple la demanda energética del sistema.

Entre los principales beneficios de este tipo de desarrollo pueden resaltarse:

- Prolongación de la vida útil de los yacimientos de combustibles fósiles al disminuir las cantidades consumidas para satisfacer la creciente demanda. De esta forma se extiende el tiempo de vigencia de las grandes multinacionales que operan en el sector.
- Mayor grado de participación de las tecnologías alternativas emergentes en el sector automotriz, permitiéndoles demostrar sus ventajas funcionales y operacionales así como los bajos costos de operación y manutención en los que se incurren tras su implementación.
- Al implementar una micro turbina como sistema de respaldo, físicamente se reducen el peso neto y el espacio requerido para la implementación del sistema de respaldo, y simultáneamente, se obtiene:

- ✓ Mayor eficiencia.
 - ✓ Mejor potencia entregada.
 - ✓ Mayor confiabilidad.
 - ✓ Mejora en los tiempos de servicio.
 - ✓ Reducción en los porcentajes de emisiones.
 - ✓ Reducción del consumo de combustible.
- Satisface parcialmente dos grandes poderes contradictorios en el sector automotriz: a los promotores de las tecnologías “eco” porque, reduce considerablemente el porcentaje de emisiones nocivas, y a los productores de combustibles fósiles, al mantener vigente su mercado y prolongar la vida útil de su producto en el tiempo.
 - Los clientes y beneficiarios de este desarrollo accederían a un vehículo con un alto rango de operación, lo que les permitiría desplazarse a través de largas distancias sin tener que reabastecer combustible.

Ilustración 1. Vehículo de combustible fósil.



Fuente: <http://www.diariomotor.com/imagenes/2011/08/posts/mazda-skyactiv-g-1.jpg>

Es importante establecer la diferencia entonces entre los vehículos de combustible alternativo y los de combustible fósil. Como se mencionó, los vehículos de combustible fósil, utilizan compuestos destilados del petróleo los cuales se combinan con aire y posteriormente se queman para convertir así la energía química presente en la mezcla en energía mecánica (Ver ilustración 1).

Por otro lado, los vehículos de combustible alternativo son un grupo amplio conformado por “combustibles” que tienen mejores características en ciertos aspectos del funcionamiento, con menores emisiones contaminantes, en comparación con los combustibles comúnmente utilizados (gasolina y diésel). En este grupo pueden encontrarse vehículos de diferentes clases:

- | | |
|---------------------------|------------------------------|
| ✓ Solares | ✓ De nitrógeno líquido |
| ✓ Eléctricos | ✓ De aire comprimido |
| ✓ Híbridos | ✓ De agua |
| ✓ De rango extendido | ✓ De biomasa (principalmente |
| ✓ Con celdas de hidrógeno | madera) |

De acuerdo con lo enunciado, casi cualquier fuente de energía puede llegar a transformarse en combustible para vehículos siempre y cuando se tengan presentes las implicaciones y requerimientos propios para la extracción de dicha energía.

1.1. DISEÑO CONCEPTUAL

En todo proceso de diseño pueden establecerse tres fases principales; diseño conceptual, diseño preliminar y diseño detallado, de estas el diseño conceptual constituye la primera fase. En este punto se da forma y cuerpo a la idea, se conoce el cómo, el por qué y el para qué se desarrollará. Al mismo tiempo se sustentan de manera aproximada los conocimientos y teorías que enmarcan el fenómeno.

Al hablar de diseño conceptual se está limitando el alcance de este proyecto a un contexto teórico. Sin embargo, lo que se pretende de fondo es mostrar la pertinencia y proyección que tienen las turbinas en el campo automotriz. Todo este planteamiento sin ir más allá de un desarrollo comparativo e ilustrativo.

En el marco de este proyecto, el diseño conceptual de la micro turbina se tomará como punto de partida para establecer las ventajas y desventajas de utilizar estas tecnologías en el campo automotriz. Y, finalmente, esta información sustentará lo que posteriormente será el estudio de viabilidad en el mercado actual.

En el diseño conceptual, se muestran e ilustran tentativamente como deben estar constituidos los sistemas principales, además del desarrollo de la idea y los valores puntuales de algunas variables con alta relevancia (Potencia requerida del sistema, distribución geométrica, características de generación eléctrica, etc.).

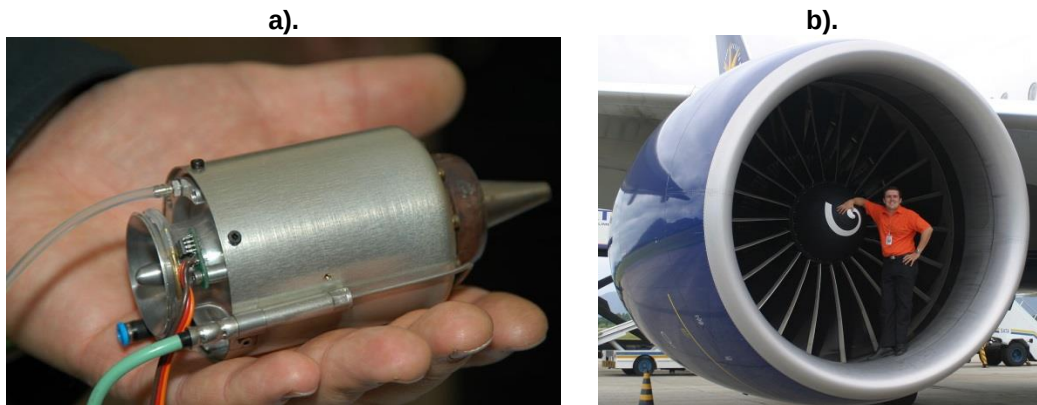
En conclusión, con el diseño conceptual se busca crear una idea, explorarla y finalmente representarla en conceptos e imágenes ^[1] que permitan definir las necesidades de dicha idea para desarrollar un diseño preliminar (Segunda fase del proceso de diseño).

1.2. MICRO TURBINAS

Turbina es el nombre que, popular y erróneamente, recibe una generadora de gases y es, simplemente, uno de los componentes del sistema que se encarga de extraer del flujo la energía cinética y convertirla en energía mecánica, para aprovecharla de diversas formas. No obstante, por motivos prácticos, el término turbina se utilizará en este documento para hacer referencia a una generadora de gases.

Al hablar de una micro turbina, se agrega un calificativo en razón de las dimensiones y capacidad de entregar potencia (Todos los conceptos fundamentales de funcionamiento son los mismos, sin importar que la turbina sea más o menos grande y que genere más o menos potencia).

Ilustración 2. Turbinas: a). Microturbina b). Turbina B-777



Fuentes: a). <http://www.rctech.net/forum/electric-road/649209-turbine-powered-f1-redbull-x1.html>
b). http://1.bp.blogspot.com/_krB5zGCSvnl/ThUsCT4fCWII/AAAAAAAAAHs/loAEoNTwJY4/s1600/EU_TURBINA_777.jpg

Como se observa en la ilustración 2, una turbina puede ser tan pequeña como para caber en una mano o, por el contrario, tan grande como para que una persona pueda pararse en el interior de ella. Sin embargo los componentes

[1] El diseño conceptual enmarca la idea, por lo tanto no se hace indispensable el desarrollo de planos complejos y puntuales sobre cierto tipo de elementos.

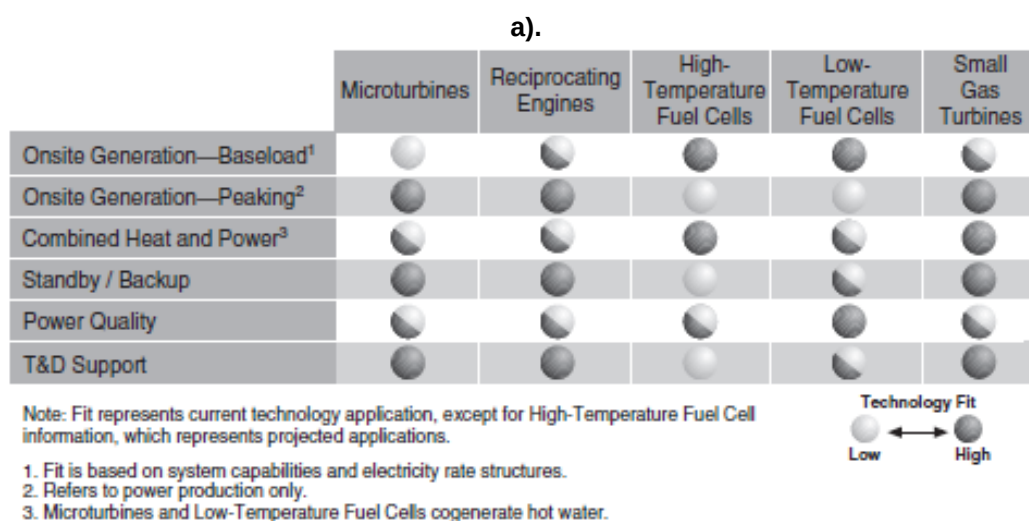
principales siguen siendo los mismos: compresor, cámara de combustión y turbina.

En la actualidad una micro turbina puede implementarse para generar empuje, básicamente con aplicaciones recreativas (“*Jetman*”, “*go-karts*”). Pero el fuerte para estos sistemas se encuentra en la generación, de forma que las micro turbinas se catalogan en una categoría conocida como calor y potencia combinada o CHP por sus siglas en ingles “*Combine Heat and Power*”. Por cuenta de ellas no solo se extrae potencia mecánica sino que además se adquiere energía térmica.

En primera instancia la principal ventaja que se tiene con este tipo de sistemas, en comparación con los motores recíprocos que actualmente se utilizan en generación, radica en que con un menor tamaño en el conjunto generador se puede suplir, y hasta garantizar, una mayor producción energética de la que se obtiene actualmente de las plantas convencionales generadoras de energía.

El campo de las tecnologías CHP, se puede clasificar desde el impacto tecnológico que tienen, como por su mercado objetivo.

Ilustración 3. Características: a). Aceptación tecnológica. b). Mercado objetivo.



b).

	Residential	Commercial	Industrial	Grid-Distributed	Remote / Off-Grid Distributed	Typical Unit Size Range (installation size can be larger)	1999 Installed Capital Cost (\$/kW)	Efficiency (%)	Commercial Availability
Microturbines ¹		1	1	1	2	25–300 kW	750–900	28–33	1999
Reciprocating Engines	1	1	1	1	1	5 kW–20 MW	400–600 ²	28–37	NOW
High-Temperature Fuel Cells		1	1	1	2	100 kW–1 MW	A ³	45–55	2005
Low-Temperature Fuel Cells	1	1	2	1	1	2–250 kW	2,000–3,000	30–40	NOW ⁵
Small Gas Turbines			1	1	2	500 kW–20 MW	650	25–40 ⁴	NOW

1. Recuperated microturbine

2. Large, gas-fired reciprocating engine

3. Not available

4. Forty percent efficiency achieved with advanced turbine cycle

5. PAFC only; PEM available in 2000

1 Primary Target Market

2 Secondary Target Market

Fuente: LITTLE. Arthur D. 1999. “Distributed energy: understanding the economics. Arthur D. Little, Inc. Cambridge, MA”.

Además de lo descrito en la ilustración 3, y por la excelente relación peso potencia, las microturbinas se están implementando como dispositivos portátiles para la generación eléctrica, con el fin de suplir la demanda de diversos subsistemas sin tener que incurrir en la implementación de baterías u otras fuentes perecederas de energía eléctrica. Un claro y amplio campo de aplicación que se tiene en el mercado actual para esta clase de sistemas, se encuentra en las operaciones en lugares separados de una red de abastecimiento, como lo es el caso de las plataformas marítimas (ver ilustración 4), lugares apartados donde una de las formas de generación más viable y rentable es ésta.

La versatilidad de las microturbinas se debe en parte a la amplia gama de combustibles con los que pueden operar, ya que varían en el grado de refinamiento, poderes caloríficos, y las diversas propiedades térmicas que el combustible entregue. Todo, teniendo en cuenta el tipo de inyector o método de inyección que posteriormente se implemente, así mismo como los rangos de funcionamiento ideal que se tengan preestablecidos dentro del diseño del micro generador. Adicionalmente, las microturbinas son sistemas que no requieren de líquidos refrigerantes ni lubricantes por que implementan el concepto de “air bearings” (por la circulación del aire el sistema rotor permanece en el centro de la carcasa suspendido en un colchón de aire), utilizan el mismo aire que pasa a través de ellas como elemento de refrigeración (canales en la periferia del conjunto desvían y transportan el aire más frío a lo largo de toda la estructura para conservar refrigerado el sistema).

Ilustración 4. Ejemplo de operaciones "offshore".

Environmentally Sensitive



- Due to air bearings, there are no lubricants to store or maintain on site.
 - No Filters, Coolers, or Pumps to maintain.
- Due to the air cooling, there are no coolants to store or maintain on site.
 - No Coolers or Pumps to maintain.

No Leaks, Drips, Pigs, or Pads

1999: Platform in Gulf of Mexico to use untreated casing gas to fuel a Capstone MicroTurbine

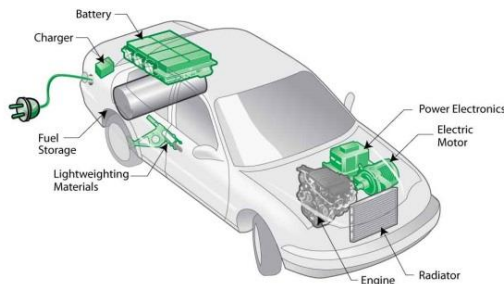
© 2008 Capstone Turbine Corporation • www.microturbine.com

Fuente: <http://www.epa.gov/gasstar/documents/workshops/2008-tech-transfer/neworleans5.pdf>

A la hora de hablar del mantenimiento, según “Capstone Turbines”, las micro turbinas pueden tener intervalos de 8.000 hrs en comparación con los motores recíprocos que llegan a intervalos de 200 hrs y hasta 3 días, dentro de la línea de mantenimiento, lo cual se traduce en gran cantidad de insumos e intervención manual.

En conclusión, y con base en los argumentos expuestos anteriormente, se podría afirmar que las micro turbinas pueden ser consideradas como un excelente sistema de generación de respaldo. Todo esto sin darle mayor importancia a las características desfavorables que se puedan destacar de ellas, ya que a la final todas estas desventajas pueden llegar a ser parcialmente controladas.

Ilustración 5. Vehículo híbrido.



Fuente: <http://www.tokyotimes.com/2013/honda-to-launch-japans-most-efficient-hybrid-car-in-september/>

1.3. CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO

Los carros de rango extendido, al igual que los híbridos, constan de dos sistemas fundamentales para su funcionamiento. La única diferencia existente entre ambos modelos tecnológicos radica en que los vehículos de rango extendido solo ocupan uno de esos dos sistemas para su propulsión, mientras que el otro se encarga de funcionar como respaldo para suplir las necesidades de “combustible” que presente el sistema principal. Los vehículos híbridos pueden propulsarse por uno u otro sistema.

Comúnmente los vehículos híbridos están propulsados por motores eléctricos ^[1] y motores recíprocos alimentados por diésel o gasolina. Como se ve en la ilustración 5, ambos sistemas funcionan por separado, pero dado el caso y según el diseño del vehículo, pueden trabajar en conjunto.

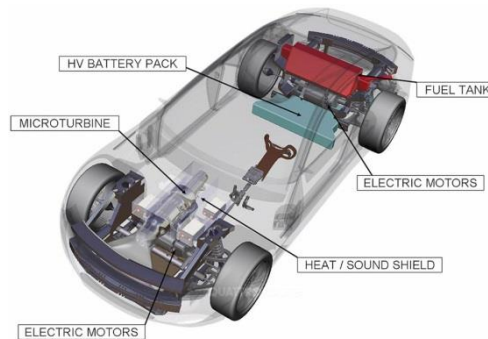
Para este caso ambos sistemas funcionan en regímenes variables, controlados por las exigencias y características de manejo que solicite el conductor.

Como se mencionó anteriormente, los carros híbridos pueden variar su fuente de propulsión según sea el caso y las necesidades del sistema. A la hora de realizar trayectos cortos las llantas son propulsadas por un motor eléctrico el cual se alimenta por un conjunto de baterías previamente cargadas desde una fuente externa al vehículo.

Por el contrario, si lo que se busca es transporte a lo largo de grandes distancias (fuera de la ciudad) el vehículo será propulsado inicialmente por el motor eléctrico,

[1] Un motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Este puede funcionar con AC o DC según sea el diseño del motor.

Ilustración 6. Vehículo eléctrico de rango extendido.



Fuente: http://www.disenio-art.com/news_content/wp-content/uploads/2012/02/Pininfarina-Cambiano-10.jpg

pero al momento de agotarse las baterías, un sistema de embrague desconecta el motor eléctrico y conecta directamente las llantas al motor recíproco.

Al igual que con los híbridos, los vehículos de rango extendido comúnmente constan de un motor eléctrico y un motor recíproco encargados de la propulsión y de la generación eléctrica respectivamente. Sin embargo, actualmente se viene dando un vuelco para estas unidades de generación, las cuales se quieren reemplazar con micro turbinas.

Al hablar de un carro eléctrico de rango extendido, lo primero que se debe tener en cuenta es que la propulsión del vehículo se hace únicamente mediante motores eléctricos los cuales adquieren la energía de las baterías. El papel que desarrolla el segundo sistema (en este caso la micro turbina), es de respaldo, lo cual implica que únicamente funcionaría al momento en que se tengan bajos niveles de carga. Es en ese momento cuando la micro turbina entra a funcionar, supliendo la demanda energética del sistema al tiempo que va cargando las baterías.

En este tipo de tecnologías, la micro turbina siempre opera bajo un régimen constante lo cual prolonga su vida útil. Para este caso es indiferente si el vehículo se utiliza para trayectos cortos o largos, porque siempre será propulsado por los motores eléctricos. La gran ventaja que otorga el tener una micro turbina como sistema de generación de respaldo es el amplio rango que el vehículo tiene sin necesidad de reabastecer ninguno de los dos sistemas (Según colaboradores de “Car News”, teóricamente entrega hasta 900 km).

- Turbinas implementadas en el campo automotriz.

A febrero de 2014 el mayor y mejor exponente que se tiene en el medio con este desarrollo, es el Jaguar C-X75 (ver ilustración 7), uno de los prototipos que se presentaron en el Salón del Automóvil de París 2010 con sistema de

propulsión híbrido y una carrocería coupé. Éste se concibió como vehículo concepto para conmemorar los 75 años de la compañía inglesa Jaguar. Posteriormente los ejecutivos de la compañía anunciaron la fabricación de un modelo de producción en serie basado en este prototipo (en este caso las microturbinas tienden a ser reemplazadas por un motor recíproco). Pininfarina, más recientemente también entró en este campo al dar a conocer su nuevo concepto el Cambiano (Ver ilustración 6).

A lo largo de la historia automotriz mundial, existen evidencias que demuestran que la implementación de turbinas no es algo de vanguardia, por el contrario fue un campo en el que se incursionó sin generar un gran impacto. Previamente, y con varios años de diferencia, se llevó a cabo la manufactura de vehículos exclusivos propulsados netamente por “turbinas” (1963 - Chrysler / Turbina, 1980 - Chrysler Defense / M1 Abrams, 2000 - MTT / Y2K Superbike). Ideas que no tuvieron acogida por los tiempos de reacción, las condiciones de contaminación auditiva, el rápido deterioro en los componentes por las condiciones ambientales en las que se utilizaban, entre otras razones.

Tales desventajas, en su momento, relegaron a las turbinas al campo del cual provenían. Sin embargo, tiempo después su estudio e implementación en el sector automotriz resurgió de la mano de los carros eléctricos, en razón de sus características como dispositivos de generación.

Ilustración 7. Jaguar C-X75: a). Distribución de sistemas. b). Micro turbinas de generación.



Fuentes: a). <http://www.zercustoms.com/news/images/Jaguar/Jaguar-C-X75-57.jpg>
b). http://2.bp.blogspot.com/_MSM9eFk9HH8/TKQ5UmfY8aI/AAAAAAAAAGI8/6_8XSD8oQzE/s1600/Jaguar%2BC-X75%2Bd.jpg

Finalmente, y con la intención de acentuar las ventajas de promover este tipo de desarrollos, se indican las diferencias entre utilizar un motor convencional o una micro turbina para generación eléctrica.

Tabla 1. Comparación cualitativa entre sistemas de generación recíprocos y micro turbinas.

Característica	Motor recíproco				Micro turbina			
	NOx	HC	CO	PM	NOx	HC	CO	PM
Emisiones contaminantes ^[1]	3.9	0.1	0.9	0.04	0.75	0.3	0.4	0.01
Emisiones de ruido	Baja, por el pequeño ΔP y temperatura a la salida (Máximo 80 dB / Promedio 77dB) ^[2]				Altas, en mayor medida para despegue y aterrizaje (Máximo 108 dB / Promedio 78 dB) ^[3] .			
Espacio requerido	Gran cantidad de espacio debido a los subsistemas adiciones.				No demanda mucho. Solo consta de dos subsistemas; conjunto rotor y carcasa.			
Peso	Adiciona gran peso al vehículo restando capacidad de carga.				Más liviano por los materiales implementados.			
Costo de adquisición	Más bajo, por ser un sistema estudiado y probado.				Mayor. Es una tecnología emergente, requiere de análisis			
Costo de mantenimiento	Alto, requiere más insumos y tiempo en mano de obra. (Según Capstone Turbine)				Bajo. Gracias a sus amplios periodos de mantenimiento y poca demanda de insumos.			
Costos de operación	Aumentan por el reabastecimiento de líquidos refrigerantes y lubricantes entre periodos de mantenimiento.				No requiere más que reabastecer combustible, y su monitoreo se hace en tiempo real a través de sistemas computacionales.			
Velocidades de reacción	Responde directamente a la demanda exigida por el sistema.				Tiene un tiempo de reacción largo.			

[1] _ Fuente: Estudio de emisiones realizado por "Castone Turbine Corporation".

[2] _ Fuente: "International Institute of Noise Control Engineering"

[3] _ Fuente: Circular informativa FAA No. 36-1H.

De acuerdo con la tabla 1 y sopesando las ventajas y desventajas que presenta un sistema ante otro, se puede apreciar que son más relevantes los puntos a favor que tienen las micro turbinas. Esto no quiere decir que las desventajas se dejen a un lado sin consideración alguna, por el contrario, estas entran a ser punto de estudio procurando mitigarlas al máximo.

El hecho de tener un sistema con una lenta reacción no implica que la demanda será insatisfecha al momento de requerirse, solo nos pone sobre aviso para anticipar el momento de encendido del sistema con el momento en que se necesitará el sistema de respaldo. Además, una vez estabilizada la micro turbina, es capaz de generar la potencia necesaria de una forma más estable que la entregada por el motor recíproco.

En cuanto a los niveles de ruido, hay que considerar que estos se generan debido a la expansión de los gases y al choque térmico sufrido entre estos y el ambiente. Por esto se hace indispensable estudiar la implementación de elementos y/o sistemas capaces de cambiar dichos parámetros del flujo, logrando así que tanto el diferencial de presión como de temperatura entre los gases de escape y el ambiente sea lo más pequeño posible.

2. PARÁMETROS DE DISEÑO

Para definir los parámetros teóricos al iniciar el proceso de diseño de la micro turbina, en principio se buscó información para crear una base de datos con las demandas energéticas, la potencia entregada por el sistema de generación y otros datos relevantes existentes en los sistemas actualmente en funcionamiento.

Tabla 2. Vehículos de rango extendido comerciales y concepto.

Vehículo	Características del motor				
	Sistema de respaldo	Motor	Combustible	Motor eléctrico	Autonomía
Jaguar / C-X75	2 micro turbinas [2]	70 [kW] c/u	Alternativo [4]	4 x 145 kW	900 km
Chevrolet / Volt	Motor-generator	1398 cc	Gasolina	1 x 111 kW 1 x 55 kW	610 km
Opel / Ampera	Motor-generator	1398 cc	Gasolina	1 x 110 kW 1 x 54 kW	500 km
Fisker / Atlantic	Motor-generator [1][2]	2000 cc	[3]	--	--
Fisker / Karma	Motor-generator [1][5]	2000 cc	Gasolina	2 x 120 kW	370 km
Cadillac / Converj	Motor-generator [2]	1398 cc	Gasolina	--	--
Lamborghini / Perdigon	Micro turbina [2]	0 cc	--	--	--
Pininfarina / Cambiano	Micro turbina [2][5]	0 cc	ACPM	4 x 149 kW	800 km
Lotus / Evora 414E	Motor-generator [2]	1200 cc	Flex-fuel [4]	2 x 152 kW	483 km
VIA Motors / E-REV [6]	Motor-generator	4300 cc	Gas	1 x 150 kW	644 km

[1] _ Motor turbo-cargado.

[2] _ Vehículo concepto.

[3] _ Implementa N₂O como combustible.

[4] _ La operación del sistema está aprobada para diversos combustibles.

[5] _ No es totalmente un vehículo de rango extendido.

[6] _ Presentan un marco base adaptable para múltiples plataformas (Camionetas, Vehículo sub-urbano o van).

2.1. PARÁMETROS DE POTENCIA

Considerando la potencia necesaria y el número de motores implementados para cada uno de los diferentes sistemas implementados en los vehículos previamente

expuestos (ver tabla 2), puede obtenerse un valor promedio que defina un punto de partida teórico para realizar el diseño conceptual de la micro turbina (para este caso se implementó el concepto de promedio, visto en el módulo de estadística descriptiva). No se trabajó con el concepto de mediana ya que este limitaría el valor de la potencia requerida a uno de los valores presentes dentro del muestreo (240 KW).

Se procede entonces de la siguiente manera, para calcular el valor promedio de la potencia máxima requerida por el sistema (ver ec. 1). Valor que será establecido como el punto de partida para el proceso de diseño global.

$$P_{total,sis} = P_{M,E} * \#motores \quad \text{Ec. 1}$$

Dónde: $P_{total,sis}$ _ Potencia total del sistema.

$P_{M,E}$ _ Potencia del motor eléctrico.

$\#motores$ _ Numero de motores eléctricos que tiene el sistema.

Por ejemplo, si tenemos una $P_{M,E} = 149 \text{ kW}$ y $\#motores = 4$

$$P_{total,sis} = 149 \text{ kW} * 4$$

$P_{total,sis} = 596 \text{ kW}$

De esta forma se logra conformar la información de la ...tabla 3...

Tabla 3. Datos de potencia eléctrica máxima requerida.

Potencia del motor eléctrico [kW]	Cantidad de motores	Potencia total del sistema [kW]
150	1	150
164	1	164
166	1	166
120	2	240
152	2	304
145	4	580
149	4	596

Una vez calculada la $P_{total,sis}$ se ha de calcular el valor promedio para obtener $P_{Max,req}$. Donde m es el número de muestras que se tiene (7) y m_i el valor particular de cada una.

$$P_{Max,req} = \sum_{i=1}^m \frac{m_i}{m} \quad P_{Max,req} = \frac{150 + 164 + 166 + 240 + 304 + 580 + 596}{7}$$

$P_{Max,req} = 314.3 \text{ kW}$

Este valor coincide con el rango de generación que se definió en la ilustración 3: b), donde se establece que el rango promedio de generación de las micro turbinas se encuentra entre 25 – 300 kW, pudiendo entregar valores más altos después de la instalación (o bien como se define en el capítulo 2 del texto de Claire Soares el rango de generación para micro turbinas está definido entre 30 – 400kW).

Adicionalmente, es prudente considerar la demanda eléctrica generada por todos los subsistemas implementados al interior del vehículo, tales como las pantallas de control, el generador arrancador, el sistema de aire acondicionado, los vidrios eléctricos, la radio, entre otros. Para esto hay que considerar que la potencia máxima que estos sistemas puedan demandar, no debe superar la potencia máxima que entrega la batería del carro, porque que de lo contrario los sistemas tienden a disminuir su vida útil. Según colaboradores de “*All About Circuits*”, en su publicación virtual “*Battery ratings*”, se establece que en promedio la corriente que entrega una batería (en vehículos convencionales) es de 70 amp y 12 voltios. Con estos valores se puede definir la potencia eléctrica adicional requerida.

$$P = VI = 12 * 70$$

$$P = 840 \text{ W}$$

Basados en el libro de Claire Soares. “Microturbinas”, se pudo establecer qué; a la salida del generador se cuenta con 12 voltios y 56 amp lo que se traduce en una potencia a la salida de 672W. Al promediar este valor con la potencia entregada por las baterías de un vehículo convencional ($P = 756\text{W}$), logramos establecer una buena aproximación de la demanda pasiva que a lo sumo pueden tener los subsistemas del vehículo y que por consiguiente debe ser igualmente satisfecha por el conjunto generador. Estos 756kW se han de sumar a los 314.3 kW originales para de esta manera definir la potencia eléctrica máxima requerida por el vehículo. Por motivos prácticos el valor se aproxima con el fin de trabajar con valores enteros.

$$P_{\text{Max,req}} = 315 \text{ kW}$$

Dicha potencia puede dividirse y entregarse de acuerdo con el número de micro turbinas que se implementaran en el diseño del vehículo. De igual forma, hay que considerar, la cantidad de motores eléctricos que serán utilizados para propulsar el vehículo.

Mecánicamente es correcto utilizar dos motores ubicados en las llantas traseras, al tiempo que se podría pensar en la implementación de sistemas que nos

garanticen un control de tracción independiente. De esta manera se evitan pérdidas de eficiencia por la implementación de sistemas mecánicos de transmisión de potencia, lo que sería necesario si el diseño considera un solo motor eléctrico. Por otro lado, al utilizar un motor eléctrico por cada llanta (cuatro motores eléctricos en total), la complejidad en el diseño eléctrico aumentaría al igual que los costos de fabricación.

Con esto se tiene que los motores eléctricos que se deben adquirir o diseñar deben tener, a lo sumo cada uno la mitad de la $P_{Max,req}$:

$$P_{max.req(c/u)} = 157.5 \text{ kW}$$

Este valor es muy similar al indicado en la tabla 2 donde se exponen las especificaciones del Lotus Evora 414E. Vehículo que es propulsado por dos motores eléctricos de 152 kW cada uno.

2.2. PARAMETROS TERMODINÁMICOS

Los principales lineamientos vienen dados por los parámetros de potencia requeridos en el aparte anterior de este documento (Capítulo 2: Parámetros de diseño: 2.1. Potencia, pág. 25). Una vez establecidos, se sabe implícitamente cuáles son las temperaturas con las cuales operarán cada uno de los componentes del sistema.

Adicionalmente, es indispensable desarrollar un muestreo a través del cual se identifiquen los valores actuales de temperatura que describen las micro turbinas operativas dentro del mercado. De esta forma, se garantizará que el diseño conceptual es coherente con lo que actualmente se implementa en el campo de la generación eléctrica.

Es correcto considerar dos puntos o lugares a lo largo del sistema de generación en los cuales la temperatura juega un papel crucial para alcanzar los valores de potencia y eficiencia deseados.

Tabla 4. Temperatura de entrada a la generadora.

a). Micro turbina Capstone con "damper" totalmente abierto.		b). Micro turbina Capstone con "damper" cerrado a 3/8.	
Demanda de potencia; configuración (W)	T_{aire_intrada} (°F)	Demanda de potencia; configuración (W)	T_{aire_intrada} (°F)
30000	27.6 ± 1.2	30000	37.9 ± 1.6
25000	29.3 ± 0.9	25000	40.1 ± 0.9
20000	29.2 ± 0.9	20000	41.1 ± 0.9
15000	35.4 ± 0.7	15000	41.3 ± 0.7
10000	35.4 ± 0.8	10000	41.2 ± 0.4

Fuente: Publicación virtual "Experimental and Theoretical Study of Microturbine-Based BCHP System".
Made by: P.D. Fairchild , S.D. Labinov, A. Zaltash, B.D.T. Rizy. Noviembre 11-16 de 2001.

Tras la revisión del libro, Micro turbinas de Claire Soares se encontró que:

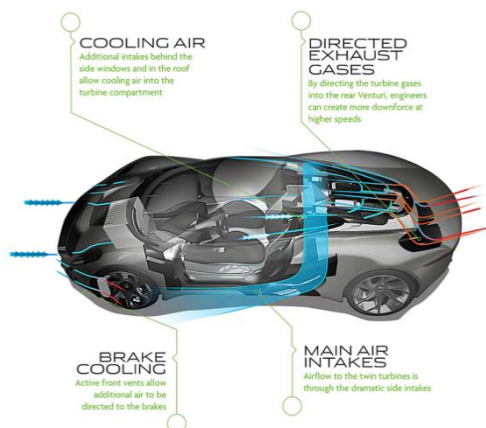
1. Se recomienda un temperatura en la entrada a la micro turbina, no superior a **288.15 °K** (59 °F), con una temperatura superior, la densidad del fluido tiende a ser menor lo cual reduce la potencia que entrega el sistema, al tiempo que el compresor demanda más potencia y castiga la eficiencia de todo el conjunto.
2. Para lograr el mayor beneficio energético, la temperatura del flujo a la entrada de la turbina de expansión (TET) debe ser lo más alta posible, esto se logra agregando mayor cantidad de combustible a la porción de aire que ingresa al sistema, sin llegar a saturar la mezcla. No obstante, y con el fin de no incurrir en altos costos de adquisición y fabricación, se recomienda que la temperatura para esta sección esté en un rango entre **1116.5 °K** a **1227.6 °K** (1550 °F a 1750 °F).

2.3. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Para alcanzar los valores descritos de cada una de las variables implícitas en el ciclo termodinámico, hay que tener en cuenta el dimensionamiento del conjunto así como la ubicación del sistema dentro del vehículo. En este punto entran en consideración parámetros adicionales tales como:

- ✓ La distribución simétrica del peso.
- ✓ El aislamiento acústico.
- ✓ El aislamiento térmico del conjunto generador.
- ✓ Ubicación de los subsistemas.

Ilustración 8. Flujo de aire a través del vehículo.



Fuente: <http://green.blorge.com/wp-content/uploads/2010/09/JaguarCX75airflowdiagram.jpg>

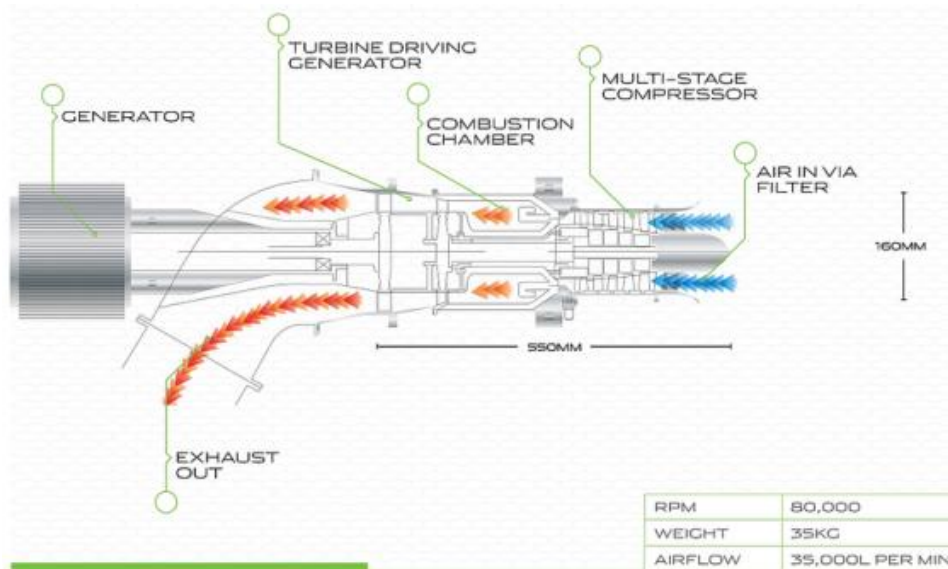
Con esto se pretende, en última instancia, crearle al lector la idea general del tamaño que podría tener el vehículo así como la categoría en la que estaría clasificado (familiar, deportivo, transporte, etc).

Considerando las altas temperaturas a las que opera la generadora, al igual que en la comodidad de los pasajeros, sería conveniente ubicar la turbina en la parte trasera del vehículo. Así se garantizaría que el calor transmitido hacia el ambiente no se direcciona hacia la cabina de los pasajeros a través del flujo que rodea al vehículo. Como se muestra en la ilustración 8 al tener el motor en la parte trasera se necesita diseñar ductos encargados de direccionar el flujo de aire hacia la turbina para alimentar el proceso de combustión además de garantizar que el sistema permanezca refrigerado.

Una vez definido esto se debe analizar el tamaño que comúnmente tienen las micro turbinas implementadas para generación eléctrica, considerando que su tamaño sea el adecuado según los parámetros de generación requeridos por el sistema que se está diseñando.

Para el caso particular del Jaguar C-X75, el conjunto generador está compuesto por dos micro turbinas, cada una de ellas de 160 mm de diámetro por 550 mm de largo. Utiliza un compresor axial de varias etapas y dos etapas de turbina, una encargada de suplir la demanda del compresor y la otra de entregar los 145 kW potencia demandados por el generador (Ver ilustración 9).

Ilustración 9. Micro turbina empleada en el Jaguar C-X75.



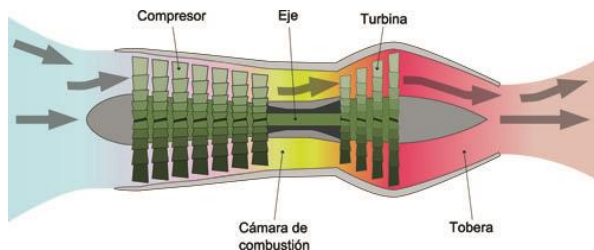
Fuente: <http://media.treehugger.com/assets/images/2011/10/jaguar-Cx75-photo-04.jpg>

Como se puede observar en la ilustración 9,

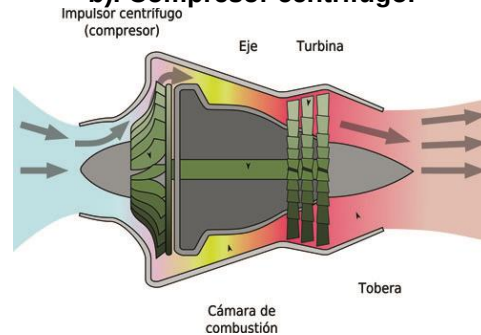
Cabe resaltar que al implementar un compresor de flujo axial, aumentaría longitudinalmente el tamaño de la micro turbina, en comparación con la implementación de un compresor centrífugo. Además, con el compresor centrífugo se facilita alcanzar una mayor relación de compresión utilizando menos componentes móviles, al tiempo que se disminuye el peso del sistema en general. De igual forma se garantiza casi en un 100% que el flujo al interior del compresor no se estanca, lo que crea una obstrucción aerodinámica producida por la capa limite generada con las paredes del sistema (Ver ilustración 11).

Ilustración 10. Modelos de compresores.

a). Compresor axial.



b). Compresor centrífugo.



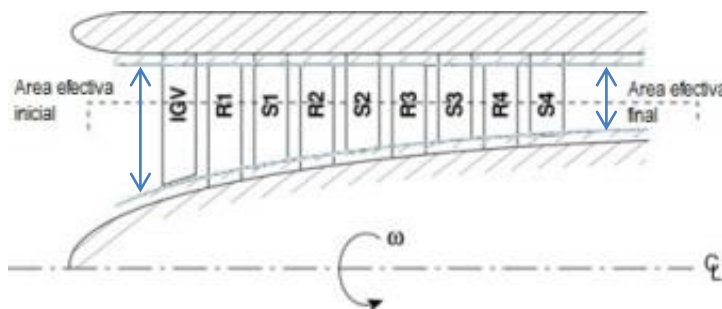
Fuente: <http://dim.usal.es/eps/mmt/?p=446>

Como se aprecia en la ilustración 10 a, a medida que aumentan las etapas de compresor el área de la sección tiende a reducirse, y a pesar que las pérdidas por la viscosidad del flujo (formación de capa límite) permanecen considerablemente constantes, se tiene que porcentualmente hablando, el área efectiva de circulación del flujo se va reduciendo a medida que se agregan más etapas de compresor.

Por otro lado, también deben considerarse ciertas características de la cámara de combustión las cuales terminan por definir en parte la geometría del conjunto generador.

Al considerar una turbina aero-derivada, ciertas de las características de diseño que se tienen para la cámara de combustión tienden a ser de menor importancia en este punto (ej: “bajo peso”), lo que en última instancia permite reevaluar ciertas de las prestaciones que el sistema entrega. Inicialmente, y según como lo establece Saravanamuttoo en su libro “*Gas Turbine Theory*”, se debe garantizar que el flujo al interior de la cámara de combustión oscile entre los 30 a 60 m/s, para que se pueda establecer un excelente frente de llama que establezca una operación estable, sin correr el riesgo de sobresaturar el sistema de oxidante llevando el sistema a presentar problemas en todos sus rangos de operación. La relación aire / combustible puede variar desde 60:1 a 120:1 para ciclos simples de turbinas de gas, logrando alcanzar una relación de 100:1 hasta 200:1 si se considera la implementación de un intercambiador de calor.

Ilustración 11. Reducción del área efectiva del flujo.

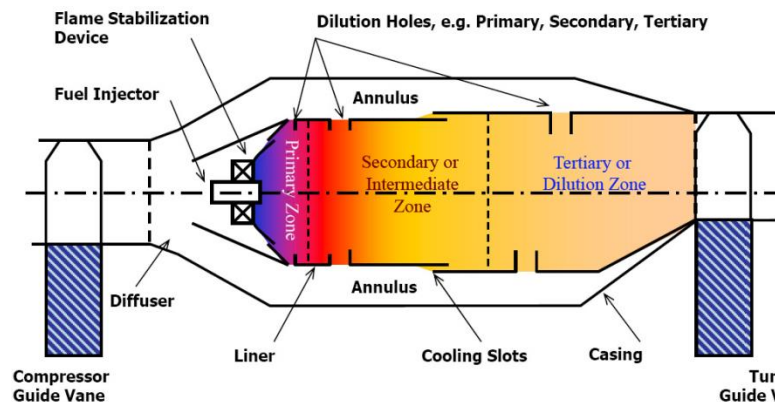


Fuente: <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node92.html>

Al no ser el peso un factor primordial dentro del diseño, en comparación con las variables de diseño en el campo aeronáutico, se puede pensar en una cámara de combustión más robusta, lo que aumentaría la vida útil del sistema. Según establece Capstone, los intervalos de mantenimiento de una micro turbina superan en un 4000% a los de un motor a pistón. Ya que en promedio mientras que el intervalo para una micro turbina es de 8000 horas, para un motor a pistón es de 200 horas.

Al trabajar con cámaras de combustión de un diámetro pequeño o una gran longitud, hay que tener especial cuidado para evitar promover caídas de presión, producto de la viscosidad y del área reducida a través de la cual circula el flujo.

Ilustración 12. Configuración interna de una cámara de combustión.



Fuente: <http://www.intechopen.com/books/progress-in-gas-turbine-performance/review-of-the-new-combustion-technologies-in-modern-gas-turbines>

Dichas caídas de presión, en última instancia, se traducen en un aumento del SFC, disminución de la potencia específica entregada y finalmente en una pérdida de eficiencia para todo el sistema generador.

Puntualmente en este documento no se describe un procedimiento para el diseño de la cámara de combustión, ya que éste va ligado directamente con la caracterización del combustible a implementar y el tipo de inyectores. Con estas dos variables, se establece el tiempo de residencia que tiene la gota de combustible al interior de la cámara de combustión, y la longitud que se debe garantizar para este elemento con el fin de realizar la totalidad de la quema (extracción total de la energía química presente en las cadenas internas de carbono). En este caso, se trabajará con una cámara de combustión anular, para la cual se asumirán dimensiones teóricas, partiendo de modelos preestablecidos y referenciados dentro del estado del arte. Sin dejar de lado la identificación de los componentes y zonas determinantes al interior de ésta.

La distribución de aire a lo largo de la cámara de combustión se considera de la siguiente forma:

- ✓ Zona primaria: Lugar donde se realiza el proceso de mezcla entre combustible y oxidante, se maneja entre un 15% – 20% del total del aire que ingresa al sistema para garantizar la temperatura y fácil ignición de la mezcla.

- ✓ Zona secundaria: En ésta se da el proceso de combustión, por lo tanto se destina un 30% del aire total que ingresa al sistema para completar la mezcla y asegurar una combustión eficiente. Entre esta zona y la primaria se encuentra el frente de llama.
- ✓ Zona de dilución: Utiliza el porcentaje de aire remanente para enfriar los gases producto del proceso de combustión.

Aparte de considerar todo el dimensionamiento geométrico que implica el sistema, es válido, a su vez, analizar el espacio en el cual se instalará el sistema de generación y sus componentes al interior del vehículo.

Se tomó como base el Chevrolet Volt, al cual se tiene acceso en la universidad (UPB). A este vehículo inicialmente, se le tomaron las dimensiones generales de la carrocería completa para posteriormente implementar relaciones matemáticas y determinar el espacio que se le asigna al motor reciproco encargado de la generación eléctrica.

Ilustración 13. Dimensiones Chevrolet Volt.



Las dimensiones que se muestran en la ilustración 13 se tomaron directamente del vehículo, y se corroboraron en la página oficial de Chevrolet. Así, y considerando la ubicación que tiene el motor generador al interior del volt, se establecieron relaciones geométricas para determinar las dimensiones teóricas que dicho espacio debe tener. Todo esto, ya que tomar físicamente las medidas era un proceso engorroso debido a ciertos componentes y elementos protectores como paneles, los cuales impedían la delimitación de la zona.

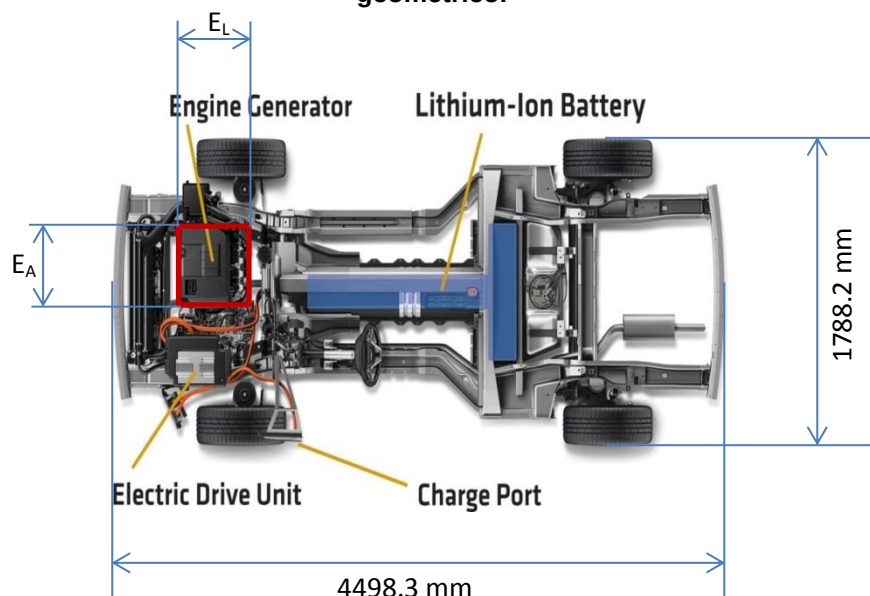
Partiendo del esquema mostrado en la ilustración 14 y al no tener acceso físico al conjunto generador, se opta por escalar las medidas de un esquema base. Al ampliar el esquema, y medir las distancias ya conocidas (ver ilustración 13) se

podía establecer una semejanza la cual nos ayudara a determinar las dimensiones teóricas del sistema de generación. Las dimensiones experimentales se obtuvieron entonces de un esquema ampliado a un 250%, para finalmente constituir las siguientes relaciones:

$$\frac{E_L}{26} = \frac{4498.3}{209}$$

$$\frac{E_A}{29} = \frac{1788.2}{105}$$

Ilustración 14. Vista superior del Volt, y dimensionamiento geométrico.



Fuente: http://www.gm-volt.com/e/volt_scheme.jpg

A través de las cuales se completa la siguiente tabla.

Tabla 5. Dimensionamiento del espacio para la generadora.

	Real [mm]	Carro a Escala (250%) [mm]	Motor Esquema (250%) [mm]	E _i [mm]
Largo	4498,3	209	26	559,597
Ancho	1788,2	105	29	493,883

En la tabla 5 se relacionan; las dimensiones reales del vehículo con las dimensiones del esquema ampliado, donde “E_i”, hace referencia a la dimensión en largo o ancho según la fila de referencia que se esté mirando.

El espacio que acá se describe se considera únicamente para ubicar a la generadora de gases, los demás subsistemas tales como el intercambiador de

calor, caja de accesorios, generador eléctrico, etc. se ubican alrededor de este, considerando que se cuenta con un área de 0.877 m² (88.559 cm x 99.006 cm).

2.4. PARÁMETROS ELÉCTRICOS

Basado en el capítulo 2 del texto de SOARES, Claire. “*Microturbines*”; “Design and Components of Microturbines”, se encontró que normalmente a la salida del generador se cuenta con 60 Hz y 220 V de corriente alterna (AC), los cuales, posteriormente deben rectificarse (considerando una pérdida de 5% de la potencia eléctrica) a 12 V y 56 A/hr, para alimentar todos los subsistemas del vehículo además de cargar el conjunto de baterías.

Inicialmente, la corriente de AC obtenida se utilizara para alimentar la demanda directa que tienen los motores eléctricos que propulsan el vehículo, claro está, considerando las especificaciones de operación que dichos motores tengan.

Por otro lado, y considerando la información expuesta en la publicación virtual del Grupo de Gestión Eficiente de Energía, KAI y el Grupo de Investigación en Energías, GIEN; “Eficiencia Energética en motores eléctricos”, emitida para Colciencias. Donde se exponen los principales conceptos y componentes de un motor eléctrico (rotor y estator). Se puede resaltar que un motor eléctrico funciona por la interacción entre los campos magnéticos generados por la corriente que circula a través de los devanados ubicados en el rotor y el estator (Para este último, la corriente puede ser mono o polifásica).

Según el régimen de operación del motor, se crea una diferencia de velocidades entre el capo magnético y el rotor, la cual se conoce como deslizamiento (relación definida por la ec. 2), y es la base para definir el concepto de frenado regenerativo. Lo cual considerando la topografía colombiana, viene siendo un sistema de regeneración energético adicional.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{Ec. 2}$$

Dónde: s _deslizamiento
 n₁ _ velocidad del campo magnético
 n₂ _ velocidad del rotor

Se puede establecer que “s” varía según el régimen de operación al cual se somete el sistema, y siempre existirá deslizamiento ($n_1 \neq n_2$)

✓ Como motor/generador: $0 < s \leq 1$.

Por consiguiente $0 \leq n_2 < n_1$. Lo que indica que la velocidad del rotor es mayor o igual que cero, pero a lo sumo puede ser igual a la velocidad del campo magnético.

✓ En frenado electromagnético: $s > 1$.

De modo que $n_2 < 0$. En otras palabras, la velocidad del rotor sea menor que cero, sistema desacelerando (el sistema no entrega energía mecánica sino que la absorbe).

Evaluando el concepto de frenado regenerativo, y considerando la topografía colombiana, se tiene una gran ventaja, lo que justifica la inclusión de dicho sistema dentro del diseño, aumentando la eficiencia del diseño global del vehículo. Con esto, se reduce el tiempo de operación de la micro turbina en operaciones urbanas, al tiempo que se evita sobrecargar el sistema de frenos mecánico. Lo que finalmente se traduce en menos emisiones contaminantes como subproducto de los procesos de combustión y frenado (el asbesto presente en las pastas de los frenos es un elemento altamente cancerígeno).

Adicional a este modelo de regeneración, es apropiado considerar una mayor explotación de los gases de escape. Según lo descrito en el capítulo 3 de la publicación digital de SOARES, Claire. “*Microturbines*”, se puede asegurar que el calor y energía presentes en los gases de escape, representan cerca del 70% de la energía del combustible inicialmente adicionado. Esto implica que los gases aún conservan un gran porcentaje de energía en sus diferentes formas, la cual puede ser aprovechada en el proceso de regeneración eléctrica del vehículo.

Ilustración 15. Componentes del sistema de freno regenerativo.



Fuente: <http://www.digitaltrends.com/cars/new-in-wheel-technology-could-mean-increased-fuel-efficiency-for-future-hybrids/#!EQPvF>

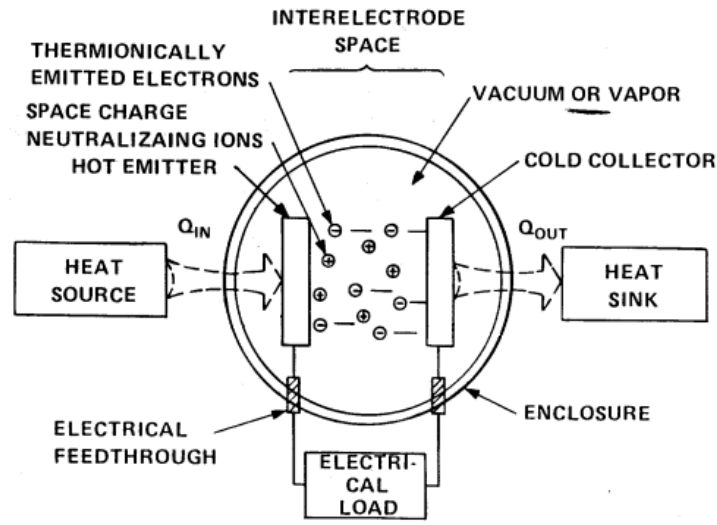
Para aprovechar la energía térmica, se debe considerar el estudio de sistemas de generación termo-eléctricos ^[1], los cuales se encargan de transformar la energía térmica que llega hasta ellos en energía eléctrica, utilizando como fundamento lo descrito teóricamente por los fenómenos Seebeck, Peltier y Thomson (Ver anexo 2).

Como ejemplo de este tipo de sistema se pueden encontrar:

- ✓ Generador termiónico: Está compuesto por dos placas metálicas, cada una de ellas expuesta a un diferencial de temperatura diferente, y separadas por el vacío o sustancia dieléctrica. Al hacer incidir una fuente de calor sobre una de ellas, mientras la otra permanece “fría”, se logran excitar los electrones los cuales tienden a fluir hacia la placa de menor temperatura. Lo que finalmente crea una diferencia de potencial entre ambas placas (Ver ilustración 16).
- ✓ Termocuplas: Una termocupla se compone de dos materiales con diferentes características térmicas, los cuales se encuentran en contacto directo en un extremo (punto expuesto a la fuente de calor) y separados en el otro (Ver ilustración 17).

[1] Un generador termo-eléctrico es un dispositivo que aprovecha el diferencial térmico entre dos elementos que tienen una considerable conductividad térmica, puede ser igual o no entre ellos, para generar electricidad o emitir señales de control basadas en pulsos de un diferencial de potencial eléctrico (voltaje).

Ilustración 16. Esquema de un generador termiónico.

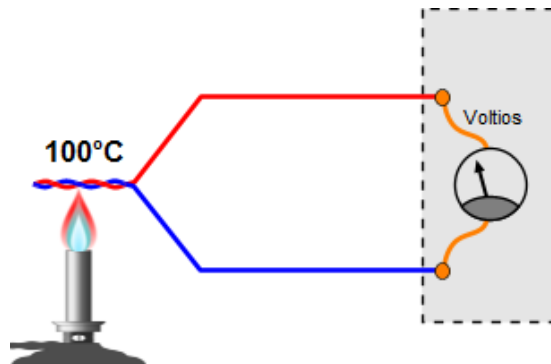


Fuente:

<http://www.propagation.gatech.edu/ECE6390/project/Fall2010/Projects/group8/power.html>

Su funcionamiento está descrito por el efecto Seebeck, el cual establece que al generarse una fem, producto de la dilatación que sufren ambos materiales, manteniendo su unión física (un material se ha de expandir más que el otro debido a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica), se crea una corriente eléctrica.

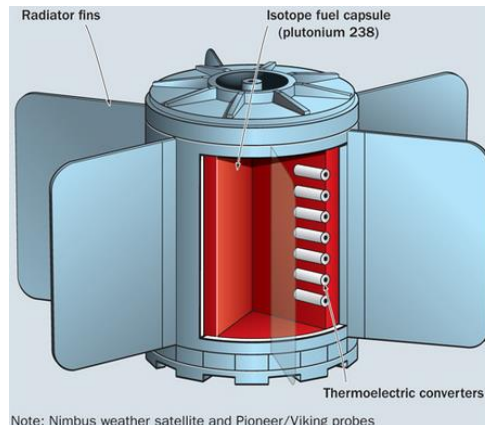
Ilustración 17. Esquema de una termocupla.



Fuente: http://pcbheaven.com/wikipages/How_Thermocouples_Work/

Dicho potencial eléctrico, depende directamente del diferencial de temperatura que se tiene entre las terminales libres y el punto donde se aplica la fuente de calor, así como de las características térmicas propias de cada uno de los materiales utilizados.

Ilustración 18. Diagrama de un RTG _ "*Radioisotope Thermoelectric Generator*".



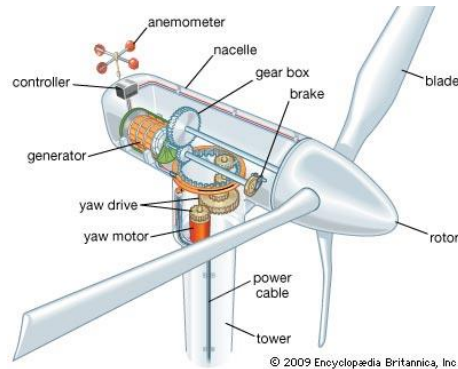
Fuente: <http://www.flightglobal.com/blogs/aircraft-pictures/2010/02/uk-could-use-plutonium-in-spac/>

Al presentar estos modelos de generación eléctrica, se pretende inculcar la idea de instalar a lo largo de la etapa final del ducto de escape del sistema de generación, una “malla térmica” compuesta por una cierta cantidad de diodos conectados en serie y paralelo, los cuales extraigan y transformen adicionalmente más energía térmica en energía eléctrica. El sistema que se propone implementar es similar al “RTG” (ver ilustración18), utilizado en los satélites interplanetarios. Para este caso en particular, las termocuplas obtienen el calor necesario para la generación eléctrica a través de la descomposición de un isótopo radioactivo.

Si lo que se quiere es aprovechar la energía cinética que lleva el fluido a la salida del conjunto generador, se debe recurrir a la implementación de un generador eólico o tercera etapa de turbina, el cual se ha de ubicar entre la salida del intercambiador y la malla térmica. De esta forma se logra, aprovechar en mayor medida la energía presente en los gases de escape, al tiempo que se reduce la presión y se baja la temperatura reduciendo los niveles de ruido del sistema en general.

Este generador, básicamente opera bajo el mismo concepto del frenado regenerativo, previamente expuesto. Donde lo que hace el motor eléctrico es aprovechar la energía cinética que se le induce al rotor para que en interacción con el campo magnético del estator cree una corriente eléctrica la cual pueda ser aprovechada (El concepto se puede enmarcar dentro del funcionamiento de un generador eólico. Ver Ilustración 19).

Ilustración 19. Composición de un generador eólico.



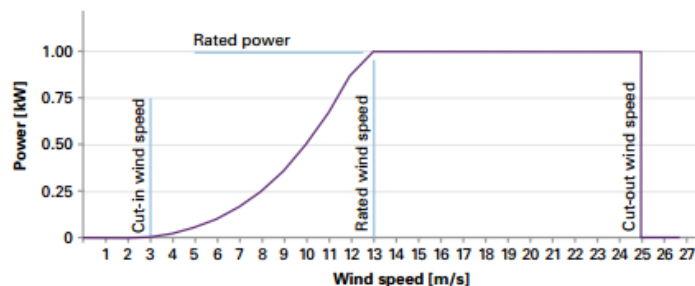
Fuente: <http://media.web.britannica.com/eb-media/48/121648-004-4776A087.jpg>

La inclusión de todos estos subsistemas de regeneración eléctrica en el diseño del vehículo de rango extendido, tienen como último fin aprovechar en lo posible todos los subproductos que se generan de la operación normal del vehículo, a través de los cuales se desperdicia gran cantidad de energía (en sus diferentes formas).

Con esto se busca diseñar un vehículo con menos energía desechada y por ende con un mayor porcentaje de eficiencia en cuanto al proceso global de generación y aprovechamiento de la energía.

Los generadores eólicos a pequeña escala, como son conocidos, normalmente son implementados en botes o unidades móviles, esto ya que al ser de menor diámetro se debe considerar una mayor velocidad del flujo a través de este para poder garantizar la potencia deseada (a mayor velocidad mayor energía cinética). Como se indica en la publicación digital de “Carbon Trust”, “*Small-scale wind energy*” la curva de potencia entregada por un generador de este tipo no es lineal, tiende a un comportamiento asintótico tras sobrepasar cierta velocidad del viento, como se ve en la ilustración 20.

Ilustración 20. Curva de potencia para un generador eólico



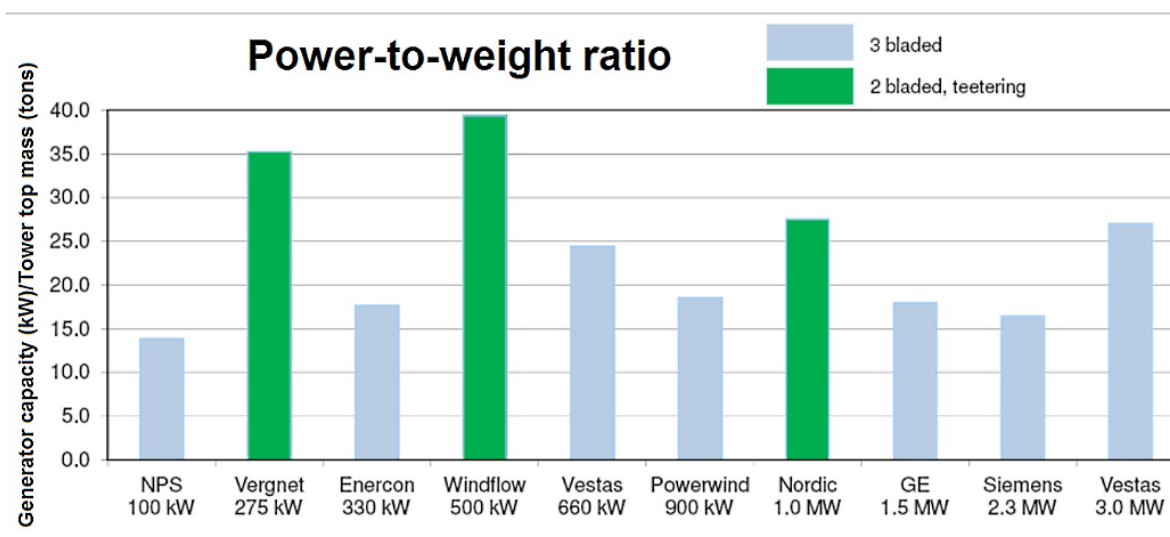
Fuente: https://www.carbontrust.com/media/77248/ctc738_small-scale_wind_energy.pdf

Por otro lado un buen punto a considerar es la relación peso potencia que este tipo de dispositivo puede entregar. Con esto se da pie a la importancia de

agregarle un poco más de peso al vehículo, siempre y cuando se garantice que la potencia entregada será considerablemente mayor. Para esto se tomó como fuente de referencia el artículo “*Teetering toward two-blade turbines*”, publicado por Sergiy Kobka en línea para “*Windpower*”. En este se recopila y analiza la información obtenida de una granja eólica ubicada en el noreste de Wellinton, Nueva Zelanda, donde las turbinas han logrado resistir ráfagas de hasta 50 m/s, mientras generan más de 250.000 MWh (ver ilustración 21).

A pesar de tener esta información de referencia, es bueno aclarar que las turbinas de viento instaladas en granjas eólicas llegan a tener palas de hasta 55 m. Comparado con lo que se pretende implementar en el vehículo, donde las palas serían de tan solo centímetros.

Ilustración 21. Relación peso potencia en generadores eólicos.



Fuente: <http://www.windpowerengineering.com/design/teetering-toward-two-blade-turbines/>

Por lo anteriormente dicho se debe conformar una base de datos la cual presente una tendencia en la relación peso potencia de los generadores eólicos.

Para esto, inicialmente se tabulan la relación potencia peso (“P/W”), y la potencia relacionados en la ilustración 21 para posteriormente poder calcular la variable peso de la siguiente forma:

$$\frac{P}{W} = \text{valor} \quad \text{Despejando } W \text{ de esta ecuación obtenemos:} \quad W = \frac{P}{\text{valor}}$$

Dónde valor es la cantidad numérica descrita en la primera columna de la tabla 6

Ej: P = 100 kW y valor = 14 kW/ton

$$\frac{P}{W} = 14 \qquad W = \frac{100}{14}$$

$$W = 7,1 \text{ ton}$$

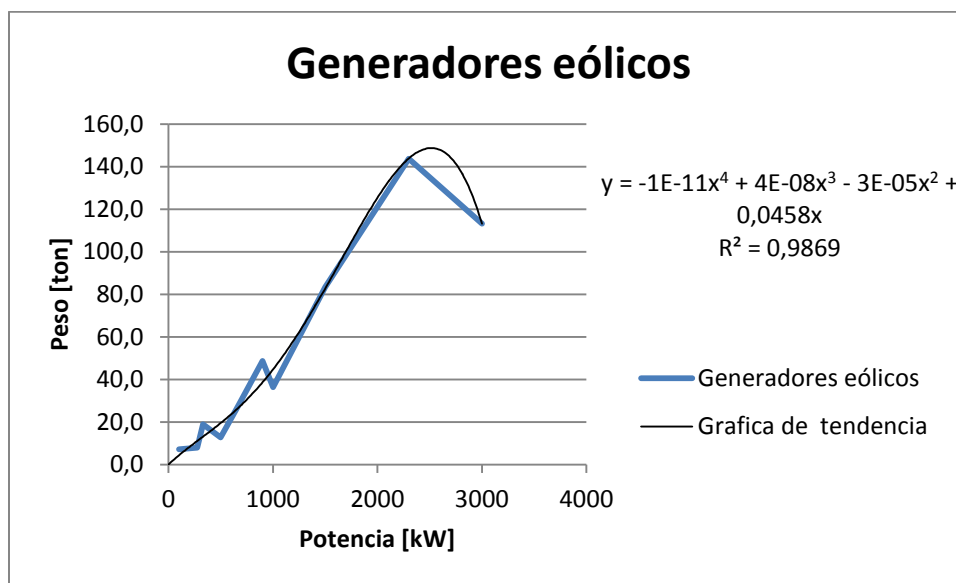
Todos los valores obtenidos se tabulan a continuación.

Tabla 6. Muestreo de datos que constituyen una tendencia en las características de los generadores eólicos.

Relación P/W [kW / ton]	Potencia [kW]	Peso [ton]
14	100	7,1
35	275	7,9
17,5	330	18,9
39,5	500	12,7
24,5	660	26,9
18,5	900	48,6
27,5	1000	36,4
18	1500	83,3
16	2300	143,8
26,5	3000	113,2

Adicionalmente, para poder conocer los valores de peso en rangos de generación más pequeños a los presentados. Fue necesario implementar Excel para graficar y posteriormente extrapolar y obtener una ecuación que describiera el comportamiento de estos valores.

Ilustración 22. Tendencia en las variables del generador eólico.



En el subcapítulo 2.1. Parámetros de potencia se estableció una demanda de potencia adicional debida a los subsistemas del vehículo. Con base en esa información y utilizando la ecuación descrita en la ilustración 22 se puede establecer a modo de ejemplo lo siguiente: Si se busca satisfacer el 70% de los 700 W de potencia adicional requerida (0,5 kW), se debe contar con la adición de unos 23 Kg extra al vehículo por el peso del generador eólico.

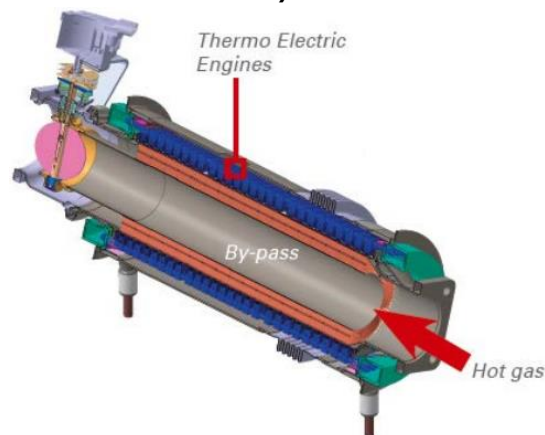
Pensando en garantizar los otros 0.3 kW restantes, se considera la implementación del generador termo eléctrico, dispuesto y configurado como se ve en las ilustración 23. a) y b) el cual aprovechara las altas temperaturas en el ducto de escape.

Ilustración 23. Generadores termo-eléctricos implementados en vehículos. a).Esquema de montaje del generador termo eléctrico.

a).



b).



Fuente: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace00e_fairbanks_2013_o.pdf

Según el estudio presentado por FAIRBANKS. John, “*Automotive Thermoelectric Generators*” para el departamento norteamericano de energía. La implementación de generadores termoeléctricos dentro de vehículos es la oportunidad para economizar combustible (> 5%), aumentando el porcentaje de eficiencia del sistema de generación. Las pruebas realizadas arrojaron resultados confluyentes (ver tabla 7), sin presentar evidencias de efectos de presión adversos o incremento considerable en el peso del vehículo.

Tabla 7. Consumo extra de combustible por la demanda eléctrica adicional.

Energía suplementaria para el motor (W)	Consumo de combustible [mpg]	Cambio con la línea base
Línea base, 0 W	39,69	-
“TEG” ^[1] , max. 330 W	40,85	+ 2,97
“TEG”, max. 480 W	41,28	+ 4.07

[1] _ “*Thermo-Electric Generator*”

Fuente: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace00e_fairbanks_2013_o.pdf

Con base en esta información, se puede establecer que del 70% de la energía que se desperdiciaba como calor se logra recuperar entre un 40% hasta 70%, lo que deja una cantidad de energía no aprovechada entre un rango del 21% a 42% para el ciclo de generación general.

Adicionalmente, este tipo de dispositivos tienen una alta confiabilidad, lo que se demuestra con el pronóstico de vida útil entre mantenimientos de entre 10 a 20 años.

3. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MICRO TURBINA

En este aparte se describen los procesos, se establecen los valores importantes, se calculan las variables requeridas y otros elementos que conforman el diseño conceptual de la microturbina, teniendo en cuenta los parámetros y teorías de diseño establecidas en el capítulo 2 de este documento.

Por motivos prácticos, y para garantizar una mejor comprensión para el lector, este capítulo se subdivide en tres partes: diseño termodinámico, diseño geométrico y diseño eléctrico, cada una de las cuales va encadenada para describir un paso a paso del proceso global del diseño conceptual.

3.1. DESARROLLO TERMODINÁMICO

Inicialmente, hay que tener claridad sobre la configuración básica del sistema, destacando cada uno de los componentes principales involucrados al interior del mismo.

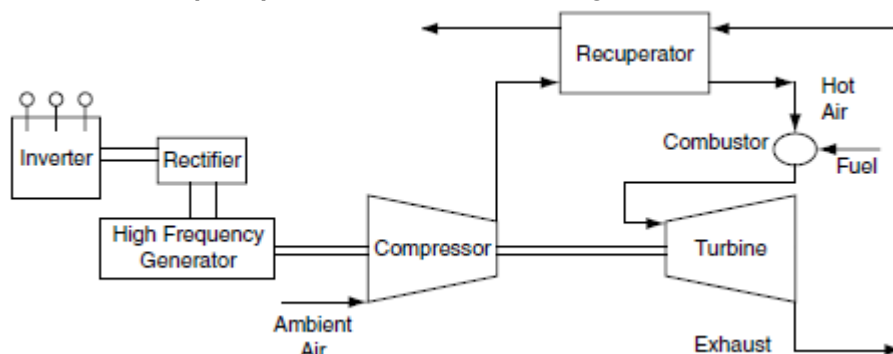
Sin embargo, a través del desarrollo matemático teórico, se encontraron inconsistencias las cuales obligaron a replantear la configuración del conjunto generador. Además se adicionaron componentes para mejorar condiciones desventajosas que son inherentes al sistema.

En un principio se consideró un sistema de generación simple (Ver Ilustración 24: a), el cual constaba tanto de una única etapa de turbina como de compresor. Para este modelo, la turbina es la encargada de suministrar el trabajo que demanda el compresor y la energía mecánica para alimentar el generador.

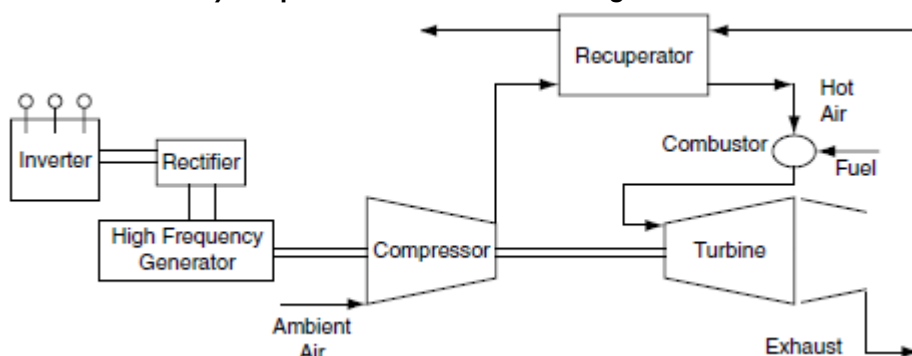
Al desarrollar este modelo, se encontró que, a pesar de garantizar el correcto funcionamiento del ciclo completo, entregando valores lógicos, a la hora de entrar a trabajar sobre el diseño puntual del compresor, los triángulos de velocidad en el ojo de entrada del impeler era inviable calcularlos, porque los valores de las variables siempre divergían lo que en última instancia desencadenaba un error de cálculo. De forma similar, las RPM requeridas para garantizar la estabilidad del sistema eran demasiado bajas, lo cual afectaba directamente en la cantidad de alabes que se deberían tener en el impeler.

Ilustración 24. Conjunto de generación general.

a). Esquema básico del ciclo de generación.



b). Esquema básico del ciclo de generación.



Fuente: a). Microturbines Claire Soare / Digital Publication / Chapter 2 _ Design and Components of Microturbines, pag. 11

Al detectar estos errores, y pensando en ir mitigando las altas emisiones de ruido que el sistema genera, se adicionó una tobera ^[1] (Ver Ilustración 24: b), justo después de salir de la turbina y antes de ingresar a la sección de gas del intercambiador de calor.

Una vez se desarrolló el modelo de cálculo para este nuevo sistema, se encontró que los valores básicos arrojados por el ciclo eran inconsistentes ya que se podía encontrar el caso en el que la temperatura a la salida del compresor era menor que la temperatura a la entrada. Relación que es totalmente ilógica al analizarla a la luz del modelo físico que se desarrolla.

Adicionalmente, el trabajo entregado por la turbina era exactamente igual al que requería el compresor, esto implica que el trabajo neto sea igual a cero, dejando al sistema con una deficiencia energética, ya que la turbina adicional a esto debe mover el generador eléctrico. Todo esto finalmente se evidenciaba en las

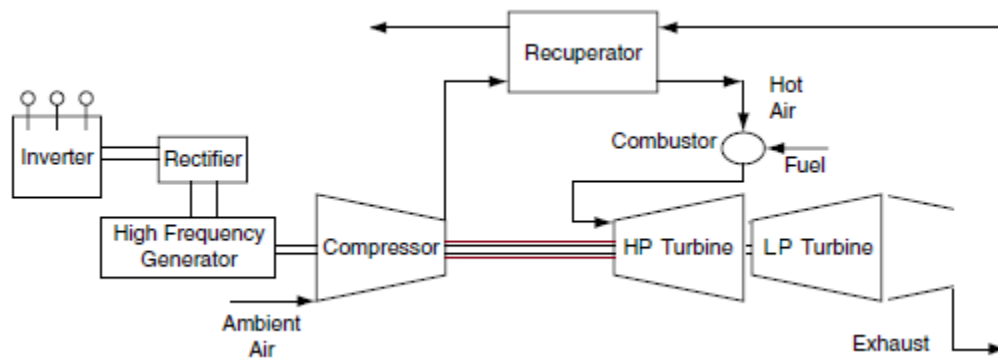
[1] Una tobera o "nozzle", es un elemento dinámico el cual basado en la mecánica de fluidos afecta ciertas variables del flujo (disminuye presión y aumenta velocidad). En este caso es implementada para reducción de ruido.

cantidades de flujo másico negativas que oscilaban por el orden de E+16.

Para poder suplir esta falta de energía se consideró adicionar una turbina de potencia la cual se destinaría solamente a alimentar el generador. Así se balancearía el sistema, ya que con la HPT se alimenta la demanda del compresor mientras que con la LPT al generador. Esto, aprovechando la alta temperatura del flujo que aún se tenía después de pasar la HPT (una alta temperatura implica un alto contenido energético dentro del fluido).

Al considerar lo anteriormente dicho se llegó al siguiente diseño, y a partir del cual se llevaría a cabo el desarrollo matemático:

Ilustración 25. Modelo general para el ciclo de generación.



Una vez definidos los parámetros térmicos y de potencia (Capítulo 2, subcapítulos: Potencia y Termodinámicos), se realizaron los cálculos iniciales de presión y temperatura para el ciclo de generación, al tiempo que se analizó y desarrolló el diseño del compresor.

Recopilando la información previamente expuesta, encontramos que los parámetros iniciales de diseño son:

Tabla 8. Datos generales de diseño.

$P_{\max, \text{req}}$ [kW]	315	η_t	0,9	γ_{aire}	1,4
P_a [bar]	1	$\eta_m \text{ y } \eta_b$	0,98	C_{pa} [kJ/kg°K]	1,005
T_a [°K]	297	η_j	0,95	γ_{gas}	1,333
PR	4	ΔP_b	2%	C_{pg} [kJ/kg°K]	1,148
TET [°K]	1220	ΔP_{ha}	3%	FCV [kJ/kg]	46300
η_c	0,92	ΔP_{hg} [bar]	0,03	eff	0.85

Todos los valores de eficiencias, así mismo como los valores de pérdidas de presión en la cámara de combustión e intercambiador y la efectividad, η , ΔP_b , ΔP_{ha} , ΔP_{hg} y eff respectivamente, se asignaron según los valores típicos que tienen estas variables (tomados con base en el libro de Saravanamuttoo, “*Gas Turbines Theory*”). En este caso, y al implementar un compresor centrífugo, se considera que la eficiencia es un poco mayor a la establecida para compresores axiales, con base en lo que se explicó en el capítulo anterior.

Por estandarización, en tablas se pueden encontrar los valores para las variables del fluido, tanto a la entrada como a la salida del conjunto de generación. En este caso se definieron el γ y C_p tanto para el aire como para el gas.

Los demás valores de las variables descritas en la tabla 6 se asignaron según como se mencionó anteriormente (Ver capítulo 2). Sin embargo el valor de la temperatura atmosférica a la entrada de la micro turbina se definió igual a 297 °K y no 288.15 °K (temperatura recomendada como máxima a la entrada del compresor), ya que es la temperatura promedio en el territorio colombiano (país de diseño del vehículo).

Por otro lado la PR, se igualó a 4 pensando en implementar materiales de bajo costo como el aluminio, lo que termina por traducirse en una ventaja al reducir los costos de fabricación del vehículo.

Finalmente, el FCV, se obtuvo de tablas, considerando que la micro turbina a de operar con GLP (Gas Licuado de Petróleo). Un combustible que es barato y de fácil acceso en el mercado colombiano.

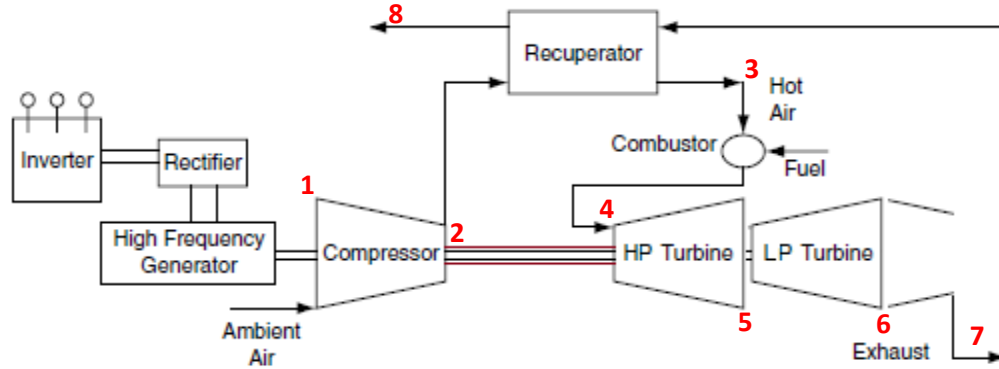
Con esto se establecen los puntos y variables de control a lo largo del conjunto generador.

Para cada uno de los puntos (1 al 8 en color rojo ver ilustración 26), se han de calcular las variables totales de temperatura y presión, para poder saber si el modelo físico se relaciona con el modelo teórico que está en desarrollo. Dichos valores se tabulan en una tabla para su fácil interpretación y evaluación.

El proceso de cálculo inicia calculando la presión en “2” (P_{02} , luego del compresor). Se tiene entonces que:

$$PR = \frac{P_{02}}{P_{01}} \quad \text{Ec. 3}$$

Ilustración 26. Puntos de control dentro del conjunto generador.



De la ec 3 se despeja P_{02} , y reemplazan las variables PR y P_{01} con los valores descritos en la tabla 8, considerando que al no tener una toma de aire^[1] y no estar trabajando a grandes alturas, las variables totales de temperatura y presión atmosféricas serán iguales a los valores que se han de tener en “1”. Finalmente se tiene que:

$$P_{02} = PR * P_{01} = 4 * 1$$

$$P_{02} = 4 \text{ bar}$$

Una vez calculada la presión en este punto, y utilizando la ecuación isentrópica del compresor se puede obtener la temperatura en este mismo punto

$$T_{02} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + T_{01} \quad T_{02} = \frac{297}{0.92} \left[\left(\frac{4}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right] + 297$$

$$T_{02} = 453.892 \text{ °K}$$

Saliendo del compresor, el flujo se direcciona hacia la sección de aire del intercambiador de calor, con lo que se busca aumentar la temperatura, reduciendo así el ΔT en la cámara de combustión y por consiguiente el consumo de combustible (a mayor ΔT en la cámara de combustión, mayor debe ser la adición de combustible al flujo, para lograr garantizar que se alcance la TET).

Para el punto “3” en el diagrama del modelo de generación (ver ilustración 26), se sabe que las pérdidas de presión en la sección de aire del intercambiador son iguales al 3% CDP (“Compressor Delivered Pressure”). Por lo tanto P_{03} sería:

[1] El “intake” o etapa de admisión, es un dispositivo dinámico que se utiliza en las turbinas aeronáuticas el cual se encarga de proteger el sistema además de aumentar la presión y reducir la velocidad del flujo.

$$P_{03} = P_{02}(1 - \Delta P_{ha}) = 4 * (1 - 0.03)$$

$$P_{03} = 3.88 \text{ bar}$$

Para este punto, aún no se tiene la información suficiente para calcular la temperatura a la salida del intercambiador (T_{03}). Para este caso se debe implementar el proceso de cálculo descrito en termodinámica y transferencia de calor para intercambiadores simples. Dicho proceso de cálculo, depende directamente del cambio en la energía interna del sistema y de la efectividad del intercambiador.

De forma similar a la implementada para calcular la presión en “3”, se puede calcular la presión en “4” (entrada a la HPT), conociendo las pérdidas de presión que se tienen al interior de la cámara de combustión ΔP_b (ver tabla 8).

$$P_{04} = P_{03}(1 - \Delta P_b) = 3.88 * (1 - 0.02)$$

$$P_{04} = 3.802 \text{ bar}$$

Ahora, se procede a analizar el comportamiento del flujo a través de las turbinas. En la posición “5”, las variables son las que se tienen a la salida de la HPT y antes de la LPT (turbina de potencia). Inicialmente para este punto no se conocen la presión ni la temperatura, por lo cual se hace imposible utilizar las ecuaciones isentrópicas, ya que estas dependen de condiciones “2” a “1” (dos variables previas y una actual o una previa y dos actuales). Por dicha razón, se busca primero calcular T_{05} con base en la relación de los trabajos.

En este punto, analizando la información previamente descrita, se puede decir entonces

$$W_c = W_T \quad \longrightarrow \quad \frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{\eta_m} = C_{p,g} \Delta T_{4-5}$$

$$T_{05} = T_{04} - \left(\frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{C_{p,g} \eta_m} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

Tras calcular ΔT_{2-1} (156.9 °K), y recordando que T_{04} es el valor definido como TET, se obtiene de la ec 4.

$$T_{05} = 1220 - \left(\frac{1.005 * 156.9}{1.148 * 0.98} \right)$$

$$T_{05} = 1079.848 \text{ °K}$$

Ya calculado este valor se recurre a la ecuación isentrópica de la turbina, con lo cual se calcula P_{05} .

$$T_{04} - T_{05} = T_{04} * \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_{05}}{P_{04}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad P_{05} = P_{04} \left[1 - \left(\frac{T_{04} - T_{05}}{T_{04} * \eta_t} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]$$

$$P_{05} = 3.802 \left[1 - \left(\frac{1220 - 1079.848}{1220 * 0.98} \right)^{\frac{1.333}{1.333-1}} \right]$$

$$P_{05} = 2.201 \text{ bar}$$

Al analizar la LPT, se tiene la misma situación vivida en la HPT. Sin embargo, para este nuevo caso, se debe considerar que el trabajo de la LPT es igual a la demanda que tiene el generador eléctrico, donde según el texto de SOARES, Claire “*Microturbines*”, el trabajo del generador se puede considerar igual al trabajo del compresor castigando la eficiencia mecánica con un 5% adicional, debido al proceso de conversión de la energía mecánica en energía eléctrica

$$T_{06} = T_{05} - \left(\frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{C_{p,g} \eta_m * 0.95} \right) \quad P_{06} = P_{05} \left[1 - \left(\frac{T_{05} - T_{06}}{T_{05} * \eta_t} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]$$

Lo cual da como resultado:

$$T_{06} = 932.321^\circ\text{K}$$

$$P_{06} = 1.139 \text{ bar}$$

Tras pasar por ambas etapas de turbina, el flujo ingresa en la tobera. Con esto se espera reducir los niveles de ruido que puede emitir el sistema. Claro está, que al implementar este dispositivo hay que considerar las variaciones que sufre el flujo al pasar a través de este.

Para esta nueva etapa en el proceso de cálculo, en primera instancia hay que entrar a analizar si la tobera esta choqueada ^[1] o no. Así, se logra definir el modelo de operación bajo el cual opera la tobera.

Inicialmente, se debe comparar la relación P_{06}/P_c (ver anexo 3 para la descripción de esta ecuación), contra P_{06}/P_a :

$$\frac{P_{06}}{P_c} = 1.919$$

$\wedge$

$$\frac{P_{06}}{P_a} = 1.138$$

[1] El término “choking”, es utilizado para definir las condiciones bajo las cuales opera una tobera. Cuando decimos que una tobera no está choqueada, quiere decir que se encuentra trabajando al máximo (se logró una total expansión del flujo a condiciones atmosféricas)

$$\longrightarrow \frac{P_{06}}{P_c} > \frac{P_{06}}{P_a}$$

Esta relación indica que la tobera no está choqueada, lo que implica que P_a es mayor que P_c . Sabiendo esto, se puede tener total certeza que la presión al salir del sistema generador será igual a la presión atmosférica ($P_{08} = 1 \text{ bar}$). Por otro lado, y considerando las pérdidas de presión que se tienen en la sección de gas del intercambiador, se determina la presión a la salida de la tobera P_{07} :

$$P_{07} = P_{08} + \Delta P_{hg} = 1 + 0.03$$

$$P_{07} = 1.03 \text{ bar}$$

Una vez calculado este valor de presión, e implementando la ecuación isentrópica que describe el funcionamiento de la tobera se calcula la temperatura a la salida de ésta:

$$T_{06} - T_{07} = T_{06} \eta_j \left[1 - \left(\frac{P_{07}}{P_{06}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \quad \text{Ec. 5}$$

Donde η_j es la eficiencia de propulsión (o eficiencia del jet) descrita en la tabla 8. Despejando T_{07} de la ec 6 se calcula el valor de la temperatura a la salida de la tobera.

$$T_{07} = T_{06} \left\{ 1 - \eta_j \left[1 - \left(\frac{P_{07}}{P_{06}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} = 932.321 \left\{ 1 - 0.95 \left[1 - \left(\frac{1.03}{1.139} \right)^{\frac{1.333-1}{1.333}} \right] \right\}$$

$$T_{07} = 910.384 \text{ °K}$$

Resta calcular la temperatura de entrada a la cámara de combustión y a la salida de la sección de gases del intercambiador, T_{03} y T_{08} respectivamente.

Para iniciar con esta última etapa de diseño del ciclo general, se parte considerando el valor de la efectividad que tiene el intercambiador, descrita en la ec. 7 y con base a los valores presentados en la tabla 8.

$$eff = \frac{T_{03} - T_{02}}{T_{07} - T_{08}} \quad \text{Ec. 6}$$

La efectividad del intercambiador se define entonces como la diferencia de temperatura que se logra en la sección de aire, sobre la diferencia de temperatura en la sección de gas. Sin embargo, se sabe que a lo sumo la temperatura a la

salida del sistema de generación T_{08} , será igual a la temperatura de entrada a la sección de aire del intercambiador T_{02} (considerando un intercambio sin pérdidas), con lo cual la ec. 7 puede redefinirse para encontrar el valor de T_{03} (ver ec. 8).

$$T_{03} = eff(T_{07} - T_{02}) + T_{02} \quad \text{Ec. 7}$$

$$T_{03} = 0.85(910.384 - 453.892) + 453.892$$

$$T_{03} = 841.910 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Al conocer las variables con mayor importancia a lo largo del ciclo, y considerando la potencia máxima requerida ($P_{\max, \text{req}}$ ver tabla 8), se calcula la potencia específica que entrega el ciclo, para posteriormente saber el flujo másico que se debe mover a través del conjunto generador, así mismo la cantidad de combustible requerido. Estos valores terminan por definir la concordancia entre las variables calculadas, y la cantidad de combustible que ha de consumir el sistema al entrar en funcionamiento.

Entonces se tiene que

$$W_{nc} = \frac{c_{p,a} \Delta T_{2-1}}{0.95 \eta_m} \longrightarrow W_{nc} = 169.362 \text{ kJ/Kg}$$

$$W_{nt} = C_{p,g} \Delta T_{4-6} \longrightarrow W_{nt} = 330.256 \text{ kJ/Kg}$$

$$W_n = W_{nt} - W_{nc} \longrightarrow W_n = 160.893 \text{ kJ/Kg}$$

Para obtener el flujo másico podemos definir la siguiente relación

$$P_{\max, \text{req}} = W_n \dot{m}_{gas} \quad \text{Ec. 8}$$

Con esta podemos definir al flujo másico de gas, como una relación entre la potencia máxima y el trabajo neto, despejando el flujo másico de gas de la ec 9

$$\dot{m}_{gas} = \frac{P_{\max, \text{req}}}{W_n} = \frac{315}{160.839}$$

$$\dot{m}_{gas} = 1.958 \text{ Kg/s}$$

Por otro lado, el flujo másico de combustible que se adiciona ($\dot{m}_{ff}$ descrito por la ec 10) así como el flujo másico de aire ($\dot{m}_a$, descrito al despejar la ec 11), se determinan a partir del valor anterior, y se utiliza el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\dot{m}_{ff} = \frac{\dot{m}_a C_{p,g} \Delta T_{cc}}{FCV \eta_b} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{ff}$$

Ec. 10

Donde FCV, $C_{p,g}$ y η_b se encuentran definidos en la tabla 8 Mientras que el ΔT_{cc} se calcula,

$$\Delta T_{cc} = T_{04} - T_{03} \Rightarrow \Delta T_{cc} = 377.913 \text{ } ^\circ K$$

Despejando $\dot{m}_{aire}$ de la ec 11 y reemplazándolo en la ec. 10 se encuentra el valor de $\dot{m}_{ff}$:

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gas} - \dot{m}_{ff} \longrightarrow \dot{m}_{ff} = \frac{(\dot{m}_{gas} - \dot{m}_{ff})C_{p,g}\Delta T_{cc}}{FCV\eta_b}$$

$$\dot{m}_{ff} = \frac{\dot{m}_{gas}C_{p,g}\Delta T_{cc}}{(FCV\eta_b + C_{p,g}\Delta T_{cc})}$$

Finalmente se obtiene:

$$\dot{m}_{ff} = 0.0185 \text{ Kg/s}$$

$$\dot{m}_{aire} = 1.9393 \text{ Kg/s}$$

Como se mencionó anteriormente, se debe recurrir al análisis del intercambiador para poder conocer T_{08} .

Puntualizando, dentro del diseño se trabaja con un intercambiador simple (ver ilustración 27). Para el análisis matemático de este modelo, se deben considerar las siguientes condiciones:

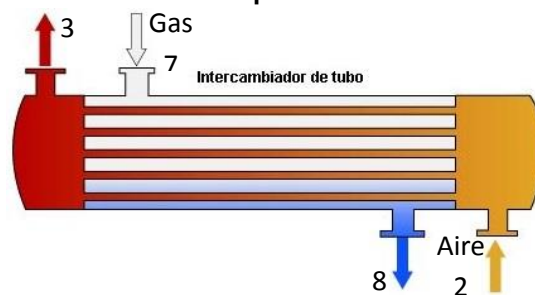
$$\Delta E_{VC} = 0$$

$$\Delta m_{VC} = 0$$

$$W = 0$$

$$\dot{m} = \text{cte}$$

Ilustración 27. Modelo esquemático del intercambiador.



Fuente: <http://www.fotosimágenes.org/imagenes/intercambiador-de-calor-5.jpg>

Partiendo de estas hipótesis, se puede asegurar que la energía del sistema es constante en el tiempo, lo que matemáticamente se define como:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sis}}{dt} = 0$$

Partiendo de la ecuación anterior y sabiendo que $\dot{E} = \dot{m}\Delta h$, se establece

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \longrightarrow \dot{m}_a(h_{02} - h_{03}) = \dot{m}_g(h_{08} - h_{07})$$

Adicionalmente la diferencia de entalpías Δh se puede redefinir en función de la diferencia de temperaturas ΔT .

$$h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_1)$$

$$\boxed{\dot{m}_a C_{pa}(T_{03} - T_{02}) = \dot{m}_g C_{pg}(T_{07} - T_{08})} \quad \text{Ec. 112}$$

De la ec 12 se despeja T_{08} y se obtiene

$$\boxed{T_{08} = 573.971 \text{ } ^\circ\text{K}}$$

Por último, y para facilitar la comprensión de los valores obtenidos, se presenta la tabla 9 la cual recopila todos los valores de presión y temperatura a lo largo del ciclo. De esta forma, se facilita la visualización y correcto entendimiento del fenómeno físico del diseño.

Tabla 9. Consolidado de las variables de presión y temperatura a lo largo del ciclo.

	a	1	2	3	4	5	6	7	8
P [bar]	1	1	4	3,88	3,802	2,188	1,122	1,03	1
T [°K]	297	297	453,892	842,087	1220	1078,404	929,355	910,592	573,971

3.2. DESARROLLO GEOMÉTRICO

Para iniciar el diseño geométrico del conjunto, se tomó del diseño global del ciclo de generación el diámetro del conjunto, calculado de la siguiente manera.

Al partir de los parámetros totales, se calculó una densidad estimada ^[1] del flujo al interior del conjunto generador, puntualmente en la etapa “6” (salida de la LPT), esto con el fin de determinar el diámetro ideal que debe tener la turbina de potencia encargada de alimentar el generador eléctrico.

$$\rho = \frac{P_{06}}{RT_{06}} \quad [2] \quad \rho = \frac{1.139 * 100}{0.287 * 932.321} \quad \boxed{\rho = 0.426 \text{ kg/m}^3}$$

Inicialmente la presión se multiplica por 100 como factor de conversión y poder llegar a un valor de densidad en kg/m^3 . Implementando un procedimiento similar al anterior (utilizando parámetros totales), se calculó un valor aproximado de velocidad al interior de la LPT.

$$c = \sqrt{\gamma_g RT_{06}} = \sqrt{1.333 * 287 * 932.321} \quad \boxed{c = 597.226 \text{ m/s}}$$

Utilizando ambas variables se calculó finalmente el área transversal que teóricamente debe tener la micro turbina, relacionando este valor con el diámetro y radio de la misma.

$$A = \frac{\dot{m}_g}{\rho c} = \frac{1.958}{0.426 * 597.226} = 0.008 \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} * 100 = \sqrt{\frac{0.008}{\pi}} * 100 = 4.958$$

Al calcular el radio, se multiplica por 100 buscando que el resultado que se ha de obtener este en cm, con esto se logra dimensional más fácilmente el tamaño del conjunto generador. Ya finalmente el diámetro “D”, simplemente se define como dos veces el radio. Toda esta información geométrica se encuentra condensada en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros iniciales de diseño geométrico.

A [m²]	0,008
r [cm]	4,952
D [cm]	9,903

A partir de estos valores, y retomando otras variables previamente calculadas en el sub capítulo 3.1. Desarrollo termodinámico, se inicia el diseño conceptual del compresor. Para esto hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones.

$$U = C_{w2} \quad C_a = C_{r2} \quad V_R = C_2$$

Dichas consideraciones, entran a ser de gran utilidad a la hora de definir las variables de importancia al interior del compresor. Como se puede ver en la ilustración 28 se logran identificar los dos componentes o secciones principales de un compresor centrífugo; impeler y difusor.

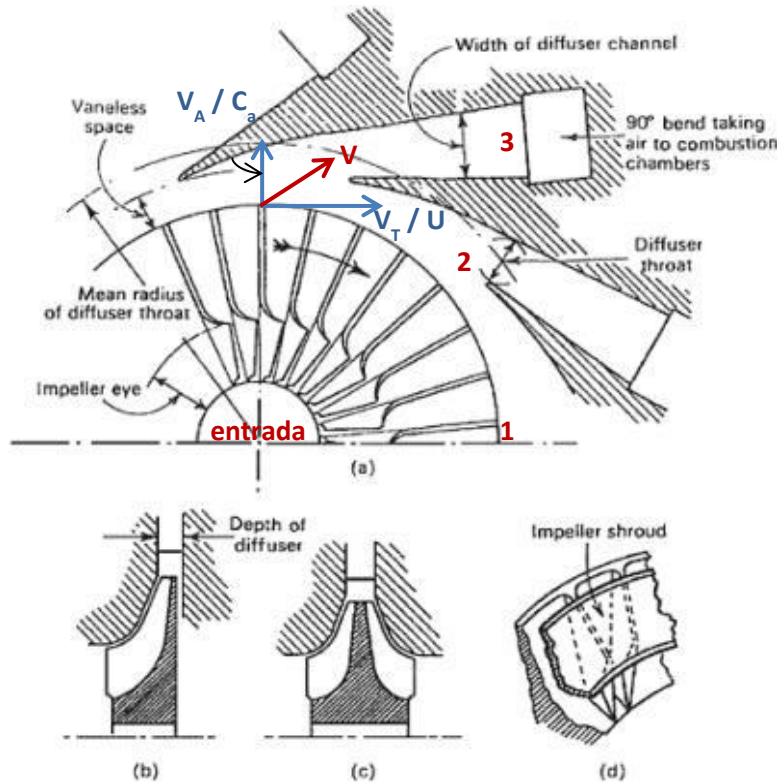
[1] Se dice que la densidad es un valor estimado ya que fue calculado a partir de parámetros totales, cuando en realidad debe ser calculada de parámetros estáticos.

[2] R es la constante de los gases. ($R = 0.287 \text{ kJ/kg}^\circ\text{K}$)

- Impeler: Cambia la dirección del flujo, al tiempo que crea una cabeza de presión y un aumento en la temperatura.
- Difusor: Aprovecha la velocidad de los gases entregados por el impeler, al tiempo que expande ligeramente el fluido.

Lo que se busca, es garantizar que el 100% del trabajo se realice en el impeler. Mientras que el aumento de presión se logra en un 50 – 50 (50% en el impeler y 50% en el difusor).

Ilustración 28. Componentes y puntos de control en un compresor centrífugo.



Fuente: Gas turbine Theory / H.H. Saravanamuttoo, G.F.C. Rogers & H. Cohen / Chapter 4: Centrifugal compressors, page 153.

De la ilustración 28 se pueden distinguir cuatro puntos de interés al interior del compresor; entrada. Entrada al impeler 1. Salida del impeler, 2. Entrada al difusor y 3. Salida del difusor. Además, se puede observar la definición que se le da a cada uno de los vectores de velocidad que se encuentran en el impeler. V_A o C_a es la velocidad radial, V_T o U velocidad tangencial y V es la resultante.

Adicionalmente, se definen los siguientes datos generales para el proceso de cálculo, algunos de los valores tales como el factor de potencia de entrada ^[1]

[1] El "power input factor" (factor de potencia de entrada), se relaciona con el "slip factor" (factor de deslizamiento) y la velocidad tangencial del flujo al interior del impeler, para determinar el trabajo realizado.

($1.035 \leq \psi \leq 1.045$), revoluciones por segundo (N) y velocidad radial (C_{a1}), se asignan según los valores típicos para estas variables y con base en el libro de Saravanamuttoo “*Gas Turbine Theory*”. Tanto para el diámetro en la punta como para el de la raíz, en el ojo del impeler, se asignaron valores porcentuales teóricos del diámetro total del impeler (60% y 30% del diámetro total del impeler respectivamente), asumiendo que a lo sumo el impeler, puede alcanzar el diámetro de la turbina de potencia. Valor calculado previamente en el análisis termodinámico del ciclo. Los valores de las demás variables ya se conocen o están previamente definidas:

Tabla 11. Datos generales para el diseño del compresor.

ψ	1,04
N [Rev/s]	1310
C_{a1} [m/s]	150
Diámetro total del impeller [m]	0,099
Diámetro del ojo en la punta “D _p ” [m]	0,0594
Diámetro del ojo en la raíz “D _r ” [m]	0,0297
T _{0,ent} [°K]	297
P _{0,ent} [bar]	1
η_c	0,92
$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	1,99393
PR	4

Para iniciar con este proceso se calcula la velocidad tangencial que tiene el flujo al interior del impeler (U).

$$U = \pi \phi_{im} N$$

Ec. 12

$U = 407.565 \text{ m/s}$

Inicialmente se puede definir tentativamente el material a implementar para la fabricación del impeler. Considerando características como el PR y U (Ver tabla 11 y resultado de la ec 13 respectivamente). Pensando en permanecer por la rama de los bajos costos de fabricación del conjunto. Con todo esto podemos asegurar que la fabricación del impeler puede hacerse en una aleación de aluminio, ya que es más económico que otros materiales, como el titanio, que también se usa en la fabricación de este componente. Según Saravanamuttoo, con el uso del aluminio se garantiza una relación de compresión de hasta 4:1 y una resistencia estructural del componente, sometido a cargas radiales (centrífugas), producto de una

velocidad tangencial de hasta 400 m/s. Valores que perfectamente se encuentran en el rango de los parámetros previamente descritos para este diseño.

Posteriormente, y asociando que las posiciones “ent” y “3” ,para el diseño del compresor, son respectivamente las posiciones “1” y “2” en el ciclo general. Se calculó el factor de deslizamiento (σ) ^[1], teniendo en cuenta que su valor debe oscilar alrededor de 0.9, con el fin de obtener, con base en ambas variables, el número de alabes (n) que se debe implementar para el impeler.

$$\sigma = \frac{C_p(T_{02} - T_{01})}{\psi U^2} = \frac{1005(453.892 - 297)}{1.04 * 407.565^2}$$

$\sigma = 0.913$

$$n = \frac{0.63\pi}{1 - \sigma} = \frac{0.63\pi}{1 - 0.913}$$

$n = 22$

Por otro lado, se definió el área de entrada que tiene el flujo al sistema de generación, con base en los diámetros de la punta y la raíz del ojo del impeler, descritos en la tabla 11, variable conocida como el área del ojo (A_{ojo}).

$$A_{ojo} = \frac{\pi(D_p^2 - D_r^2)}{4}$$

$A_{ojo} = 0.002085 \text{ m}^2$

Ahora, para poder calcular la componente radial que tiene la velocidad (C_{a1}), se debe implementar un proceso iterativo el cual parte de una aproximación de la densidad.

$$\rho = \frac{P_{0,ent}}{RT_{0,ent}}$$

$\rho = 1.173 \text{ kg/ m}^3$

Una vez calculada la densidad se calcula C_{a1} , valor con el cual se define la cabeza dinámica que se tiene para el flujo.

$$C_{a1}' = \sqrt{\gamma RT_{0,ent}}$$

$C_{a1}' = 345.448 \text{ m/s}$

$$cabeza \text{ dinamica} \rightarrow \frac{C_{a1}'^2}{2C_p}$$

$C_{a1}'^2/2C_p = 59.370$

La cabeza dinámica, es utilizada para poder calcular el valor estático de temperatura en la entrada del impeler, mientras la presión se obtiene de relaciones isentrópicas. Para finalmente calcular un valor acertado de densidad, así mismo un valor más exacto de C_{a1} .

[1] El “slip factor”, es el valor que describe un porcentaje de la cantidad de capa del flujo que se desliza o desliza entre los alabes. Esto como producto de la inercia axial que lleva el flujo y que hace que la velocidad sea menor.

$$T_{0,ent} = T_{ent} + \frac{C_{a1}^2}{2C_p}$$

$$\left(\frac{T_{0,ent}}{T_{ent}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{P_{0,ent}}{P_{ent}}$$

$$T_{ent} = 237.63 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$P_{ent} = 0.458$$

Para recalcular los valores de ρ y C_{a1} , se implementan las ecuaciones previamente expuestas, lo que nos entrega un valor

$$\rho = 0.672 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{a1} = 308.998 \text{ m/s}$$

Comparando el valor actual de C_{a1} , con el calculado anteriormente C_{a1}' con base en los parámetros totales, se define un porcentaje de error, el cual por cuestiones de diseño se establece que debe ser menor al 3% (error relativo descrito en la ec 14).

$$3\% > \frac{C_{a1} - C_{a1}'}{C_{a1}} * 100$$

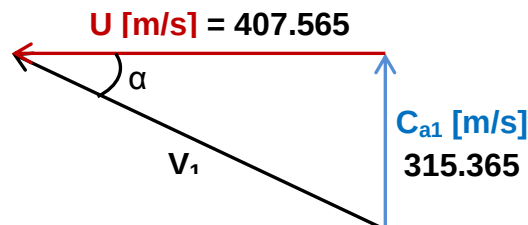
Ec. 13

Tabla 12. Valores obtenidos en el proceso iterativo para el cálculo de la velocidad radial.

C_{a1} [m/s]	$C_{a1}^2/2C_p$	T_{in} [°K]	P_{in} [bar]	ρ_1 [kg/m³]	C_{a1} [m/s]	% error
308,998	47,502	249,498	0,543	0,759	316,62	2,407%
316,62	49,875	247,125	0,526	0,741	315,111	-0,479%
315,111	49,401	247,6	0,529	0,745	315,413	0,096%
315,413	49,495	247,505	0,528	0,744	315,353	-0,019%
315,353	49,476	247,524	0,529	0,744	315,365	0,004%

Como se puede observar en la tabla 12 desde la segunda iteración se puede tomar el valor de C_{a1} . Sin embargo, buscando mitigar un poco más el error

Ilustración 29. Triángulo de velocidades a la entrada del impeler.



acumulado, inherente al proceso de cálculo, se decidió repetir el proceso cuatro veces más. Finalmente nos deja como resultado el triángulo de velocidades a la entrada del impeler presentado en la ilustración 29.

En este punto hay que considerar, que la velocidad resultante (V_1) varía, ya que esta depende directamente del diámetro en el cual se calcule. Por esto se debe definir su valor tanto para la punta como para la raíz en el ojo del impeler.

$$V_1 = \pi \phi N$$

V_1 punta

punta = 244.539 m/s

V_1 raíz

raíz = 122.27 m/s

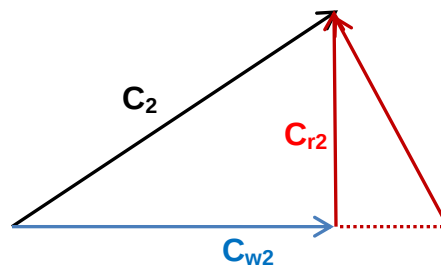
Finalmente, se establecen los ángulos de entrada que tiene el flujo, tanto en la raíz como en la punta del impeler.

$$\alpha_{\text{punta}} = 52.209^\circ$$

$$\alpha_{\text{raíz}} = 68.808$$

Partiendo de la hipótesis que afirma que la velocidad radial C_{r2} (vel. a la salida del impeler), es igual a la velocidad radial que se tiene en la entra del impeler ($C_{a1} = 315.365$ m/s), se entra a definir el triángulo de velocidades a la salida del impeler.

Ilustración 30. Triángulo de velocidades a la salida del impeler.



Cabe destacar que la sección roja en el triángulo de velocidades de la ilustración 30 se ve como una alteración o deformación con respecto al triángulo rectángulo definido a la entrada del impeler. Este fenómeno se da como resultado de la interacción entre el flujo y el impeler.

Para este punto se deben definir las otras dos componentes del triángulo, para finalmente calcular el ángulo de salida que lleva el flujo. Inicialmente, se considera que la velocidad tangencial a la cual sale el flujo del impeler es igual a la velocidad de ingreso que se tiene en el ojo. Teniendo en cuenta, la reducción que se sufre debido al fenómeno de deslizamiento que se tiene entre los alabes.

$$C_{w2} = \sigma U$$

$$C_{w2} = 371.994 \text{ m/s}$$

Además, como se mencionó anteriormente, y a pesar que el 100% del trabajo se realiza en el impeler, hay que tener en cuenta que el flujo pasa a través del difusor también, lo que termina por ocasionar perdidas como consecuencia de la viscosidad que tiene el flujo y la capa limite que se crea a raíz de esto. Por esta razón, y recordando que la variación de la presión si se realiza en un 50 – 50, se establece entonces la eficiencia del impeler.

$$\%_{perdidas} \Rightarrow 0.5(1 - \eta_c)$$

$$\%_{perdidas} = 0.04$$

Ya conocido el porcentaje de perdidas, se calcula la η_{im}

$$\eta_{im} = 1 - \%_{perdidas} \quad \eta_{im} = 0.96$$

Una vez calculada la eficiencia, se retoma la ecuación isentrópica que describe el comportamiento a través del compresor, cambiando en este caso la eficiencia del compresor por la eficiencia del impeler para poder conocer el ΔP que sufre el flujo en el impeler.

$$\frac{P_{02}}{P_{0,ent}} = \left[1 + \frac{\eta_{im}(T_{02} - T_{01})}{T_{01}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \frac{P_{02}}{P_{0,ent}} = 4.203 \text{ bar}$$

Ahora, sabemos que la cabeza dinámica se puede redefinir, dejando a la resultante en términos de sus dos componentes rectangulares.

$$\frac{C_2^2}{2C_p} \Rightarrow \frac{C_{w2}^2 + C_{r2}^2}{2C_p}$$

Para finalmente calcular un valor

$$\frac{C_2^2}{2C_p} = 118.326$$

Al conocer el valor de la cabeza dinámica que se tiene, se han de calcular los valores estáticos de presión y temperatura que se tienen, para posteriormente calcular el área y la profundidad del canal del difusor.

$$T_2 = T_{03} - \frac{C_2^2}{2C_p} \quad T_2 = 335.566 \text{ °K}$$

[1] Es válido destacar que, la relación entre la parte estática y dinámica de una variable a lo largo de un ducto permanece constante ($X_0 = \text{cte}$). Sin importar como ambas partes varíen o cual sea la geometría que tenga el ducto.

Implementando relaciones isentrópicas

$$\frac{P_2}{P_{02}} = \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \Rightarrow \frac{P_2}{P_{02}} = 0.347$$

$$\frac{P_2}{P_{0,ent}} = \frac{P_2}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{0,ent}} \Rightarrow P_2 = 1.46 \text{ bar}$$

Para finalmente

$$\rho = \frac{P_2}{RT_2} \Rightarrow \rho = 1.516 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = \rho A C_{r2} \Rightarrow A_{ch} = 0.004 \text{ m}^2$$

$$A = CDS \Rightarrow CD = 1.304 \text{ cm}$$

Donde, A_{ch} es el área del canal y CD es la profundidad del canal, por sus siglas en inglés (“*Channel Depth*”), y S es el perímetro que se tiene para el impeler ($S = \pi\Phi_{im}$).

Ahora, siguiendo un proceso iterativo similar al implementado para encontrar la velocidad de entrada del flujo al impeler, se calcularán la velocidad radial y tangencial a la salida del mismo, para poder constituir el triángulo de velocidades a la entrada del difusor (ilustración 31). Este proceso no se realizó anteriormente ya que solo se requería un valor estimado para el área, el cual permitiera encontrar la profundidad de los canales del difusor, pero lo que buscamos ahora es el área efectiva real que se tiene a la entrada del difusor.

Para iniciar con este proceso de cálculo, hay que considerar otras cuatro variables adicionales, cuyos valores se asignan según cantidades porcentuales del diámetro total del impeler o según valores estándar que estos toman (ver tabla 13).

Ilustración 31. Triángulo de velocidades a la entrada del difusor.

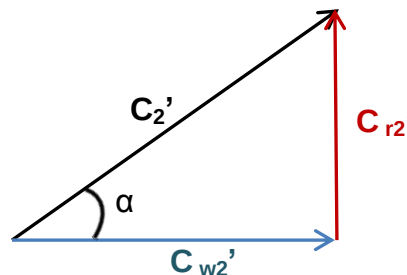


Tabla 13. Datos generales para el difusor.

Espacio sin alabes [m] ^[1]	0,01
Radio medio de la garganta del difusor [m] ^[2]	0,0655
Profundidad de los canales de difusión [m]	0,017
# de canales del difusor	12

Inicialmente, establecemos una relación entre las velocidades tangenciales y los radios a los cuales se encuentran. Tomando como variables conocidas; los radios y la velocidad C_{w2} previamente calculada.

$$\frac{C_{w2}'}{C_{w2}} = \frac{r_1}{RDT} \quad \boxed{C_{w2}' = 309.49 \text{ m/s}}$$

Donde, RDT es el radio medio de la garganta del difusor.

Al ver que la velocidad tangencial es menor a la que se consideró un principio, se puede suponer de igual forma que $C_{r2}' < C_{r2}$, y que tiene un valor aleatorio de 240 m/s, a partir del cual se comenzara a iterar para encontrar su valor verdadero.

Se tiene en un principio que el área del difusor se define como:

$$A_{diff} = 2\pi RDT DDP \quad \boxed{A_{diff} = 0.0064 \text{ m}^2}$$

Donde, DDP es la profundidad de la garganta de difusión.

Ahora, y retomando el proceso de cálculo para la iteración previamente expuesto se logra constituir la información que se presenta a continuación en la tabla 14.

Tabla 14. Proceso iterativo para el cálculo de C_{r2}' .

C_{r2} [m/s]	$C_2^2/2C_p$	T_2 [°K]	P_2/P_{02}	P_2 [bar]	ρ [kg/m ³]	C_{r2} [m/s]	% error
240	68,040	385,851	0,566	2,380	2,150	129,010	46,246%
129,010	47,664	406,228	0,678	2,850	2,445	113,436	12,072%
113,436	45,785	408,106	0,689	2,897	2,473	112,135	1,147%
112,135	45,639	408,252	0,690	2,900	2,475	112,034	0,089%
112,034	45,628	408,264	0,690	2,901	2,475	112,027	0,007%

[1] Se asume como el 20% del diámetro total del impeler.

[2] Se define como un 10% más grande que el radio total del impeler más el "vanless space".

Una vez terminado el proceso de iteración, encontramos que la velocidad radial a la entrada del difusor es

$$C_{r2} = 112.026 \text{ m/s}$$

De igual manera, para este caso se itera hasta lograr que el porcentaje de error sea menor al 3% (valor que se alcanzó a la segunda iteración, pero que más sin embargo se decide refinar un poco más).

Por último se calcula el ángulo de entrada que tiene el flujo al difusor, tomando como base la distribución mostrada en la ilustración 31.

$$\tan(\alpha) = \frac{C_{r2}'}{C_{w2}'}$$

$$\alpha = 21.71^\circ$$

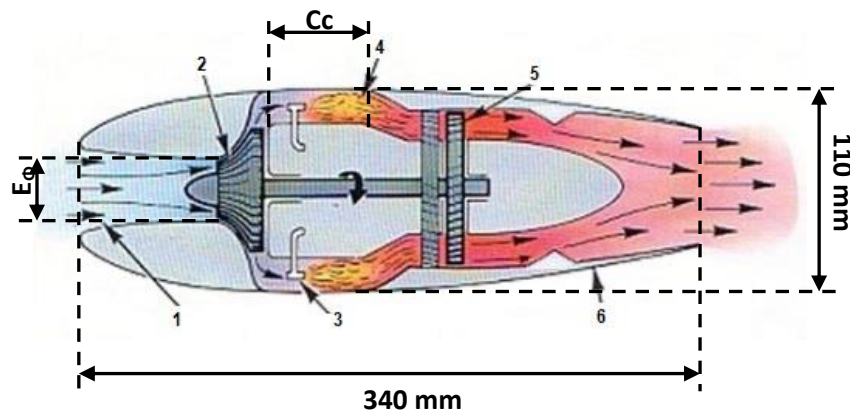
Finalmente, se define el área efectiva del difusor

$$A_{eff} = A_{diff} \sin(\alpha)$$

$$A_{eff} = 0.002586 \text{ m}^2$$

Tras terminar con el diseño del compresor, es importante consolidar las dimensiones globales del conjunto generador, tomando como fuente de referencia la información general obtenida a lo largo de todo el proceso de cálculo desarrollado, además de las variables previamente expuestas y analizadas en el capítulo 2.

Ilustración 32. Dimensiones generales de la generadora de gases.



Fuente: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/J/jet_engine.html

Las zonas y variables referenciadas en la ilustración anterior se definen en la siguiente tabla.

Tabla 15. Definición de variables.

Variable / Zona	[mm] / Nombre
1	Toma de aire
2	Compresor centrífugo
3	Inyectores – Generadores de vórtice ^[1]
4	Cámara de combustión
5	Etapas de turbina
6	Tobera
E_{ϕ}	59.48
Cc_L	85 / Largo de la cámara de combustión

Las dimensiones finales que se obtuvieron para la generadora de gases, son de menor magnitud a las calculadas para el espacio destinado a albergar este sistema. Lo cual deja un espacio disponible para la instalación de los demás subsistemas requeridos y referenciados a lo largo del proceso de cálculo. Además se deben utilizar los sistemas de aislamiento acústico para garantizar que el vehículo cumpla con los estándares establecidos de contaminación auditiva.

Tabla 16. Comparativo entre las variables geométricas.

	Espacio disponible	Dimensiones Turbina
	E_i [mm]	E_i [mm]
Largo	559,597	340
Ancho	493,883	110

3.3. DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Una vez se definieron las características del sistema de generación, hay que aclarar ciertos puntos concernientes al sistema de distribución y almacenamiento de la energía eléctrica, tomando como referencia los valores requeridos descritos en el capítulo anterior.

Tabla 17. Requerimientos eléctricos.

Sección de AC		Sección de DC	
Voltaje [V]	$P_{max, req(c/u)}$ [kW]	Voltaje [V]	Carga eléctrica [amp]
220	157.5	12	56

[1] Los generadores de vórtice, implementados al inicio de la cámara de combustión, crean ligeras perturbaciones, las cuales sacan al flujo de su estado laminar convirtiéndolo en turbulento, y ayudando a mezclar de una forma más eficiente el aire y el combustible antes de realizarse la combustión.

En la ilustración 33 puede observarse el diagrama básico de distribución energética para el almacenamiento y generación eléctrica. Para considerar el diagrama completo, debe tenerse en cuenta que se están implementando motores/generadores para impulsar el vehículo, con lo cual se duplica la última parte del esquema (a modo de espejo respecto al eje de la batería). La micro turbina, el generador termoeléctrico y la turbina centrífuga, son sistemas comunes.

Para dicho diagrama, es válido destacar que las flechas indican la dirección en que fluye la energía que se está implementando. El color que tienen indica si lo que entra o sale del componente; es energía mecánica (flechas color gris) o térmica y cinética (flecha color naranjado). Por otro lado, en las secciones del diagrama donde se manejan tres líneas de diferente color, se está indicando que la energía eléctrica que ahí se maneja es alterna (AC) proveniente o dirigida hacia un generador trifásico, mientras que en las secciones que solo se tienen dos líneas (roja y negra), se maneja corriente directa (DC).

Dentro del sistema eléctrico de generación deben considerarse principalmente los siguientes componentes, en las posiciones descritas, además de los diferentes medios de generación eléctrica que se tengan implementados para el vehículo.

Finalmente se considera que la corriente que circula a través de la sección de AC del circuito, se define con base a la información descrita en la tabla 17 y partiendo de la definición de potencia

$$P = VI \quad \text{Ec. 14}$$

De esta manera, se está definiendo la corriente que se tiene en cada uno de los lados del circuito (despejando la variable corriente “I” de la ec 15), ya que se toma como referencia la potencia requerida por cada uno de los motores/generadores implementados en las ruedas.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{157150}{220}$$

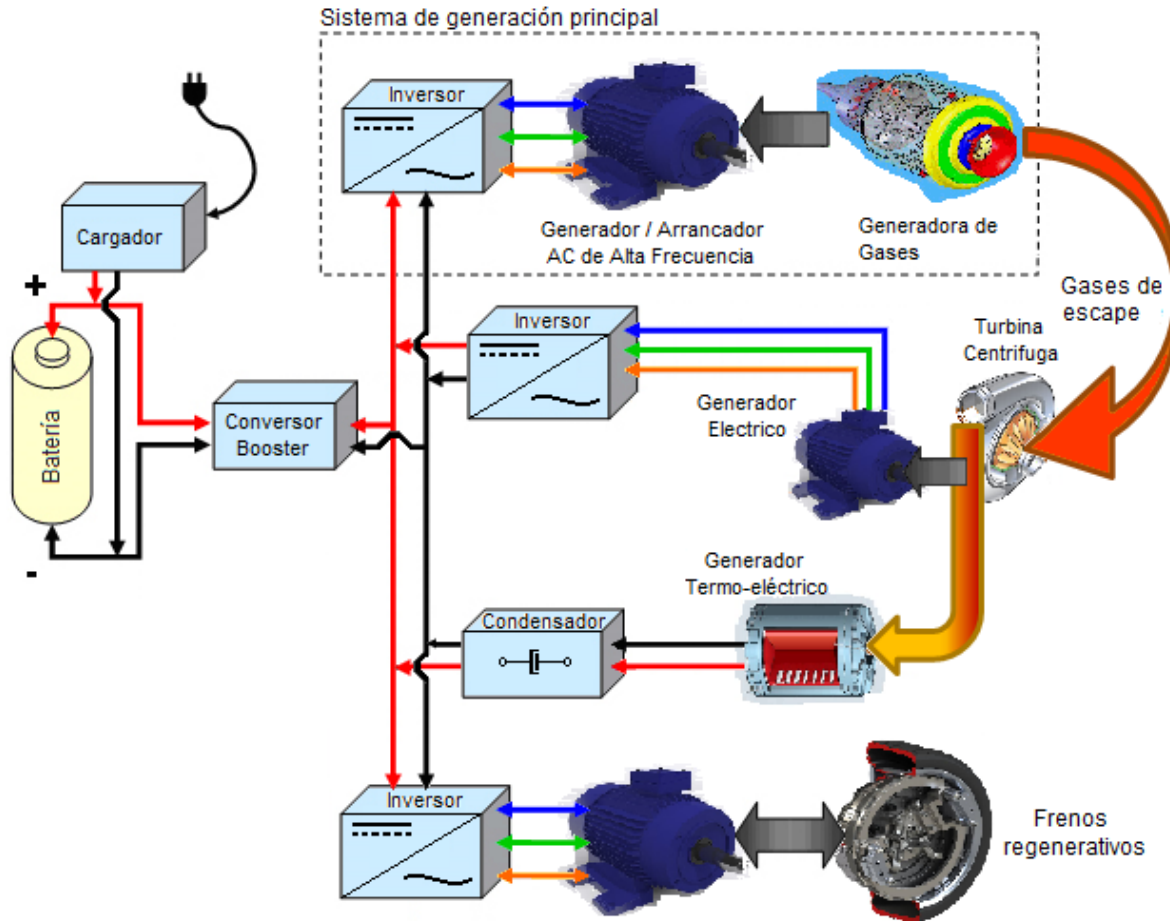
$I = 714.31 \text{ amp}$

De forma similar se puede establecer entonces que la potencia que se tiene en la sección de DC es.

$$P = VI = 12 * 56$$

$P = 672 \text{ [W]}$

Ilustración 33. Esquema eléctrico de generación y almacenamiento.



Finalmente y con base en el libro de Saravanamuttoo; “Gas Turbine Theory”, se define la relación de eficiencia general para el ciclo de generación. Mediante la ec 16, la cual toma como base el consumo específico de combustible y el poder calorífico que este tiene.

$$\eta = \frac{3600}{SFC * FCV} \quad \text{Ec. 156}$$

Donde el FCV es una variable propia de la caracterización del combustible, mientras que el SFC se calcula de la siguiente manera:

$$SFC = \frac{f_{act} * 3600}{W_n}$$

Para conocer el valor de la relación aire combustible actual “ f_{act} ” se utiliza la gráfica de ΔT_{cc} vs. Relación combustible / aire (Ver anexo 4). Para esto se debe conocer

ΔT_{cc} y la temperatura de entrada a la cámara de combustión. Con estas variables se obtiene el siguiente valor teórico.

$$f_{teo} = 0.0095$$

Ahora

$$\eta_b = \frac{f_{teo}}{f_{act}} \longrightarrow f_{act} = \frac{f_{teo}}{\eta_b} = \frac{0.0095}{0.98}$$

$$f_{act} = 0.00969$$

Adicionalmente el W_n se obtiene de la diferencia entre el trabajo neto de las etapas de turbina menos el trabajo neto consumido por el compresor y el generador.

$$W_{nt} = C_{pg} \Delta T_{4-6}$$

$$W_{nc} = \frac{C_p \Delta T_{2-1}}{\eta_m * 0.95}$$

$$W_{nt} = 1.148 * (1220 - 932.321)$$

$$W_{nc} = \frac{1.005 * (453.892 - 297)}{0.98 * 0.95}$$

$$W_{nt} = 330.256 \text{ [kJ/Kg]}$$

$$W_{nc} = 169.362 \text{ [kJ/Kg]}$$

$$W_n = 160.894 \text{ [kJ/Kg]}$$

Finalmente se puede obtener el valor para el SFC, y retomando la ec 16 la eficiencia del ciclo de generación.

$$SFC = \frac{0.0095 * 3600}{160.894}$$

$$SFC = 0.2169 \text{ [kJ/Kg]}$$

$$\eta = \frac{3600}{SFC * FCV} = \frac{3600}{0.2169 * 46300}$$

$$\eta = 35.848\%$$

Recordando la cantidad de potencia requerida por el sistema para operar en óptimas condiciones y haciendo referencia a la tabla toma del libro de Claire Soares, "Microturbines", presentada en la ilustración 3: b), pagina 18. Se puede establecer la comparación entre los rangos teóricamente establecidos y los resultados experimentales obtenidos.

Tabla 18. Relacion de variables teoricas y experimentales

	Rango típico	Eficiencia [%]
Micro turbinas (Teórico)	25 – 300 kW	28 - 33
Micro turbinas (Experimental)	315 kW	36 %

Los valores obtenidos tanto para la potencia como para la eficiencia del ciclo, muestran que se conserva la proporcionalidad, ambos son ligeramente mayores lo cual se debe a las idealizaciones asumidas a lo largo del proceso de cálculo. Sin embargo se puede asegurar que se encuentran definidos dentro de los rangos establecidos.

Con esto se ratifica la veracidad de los valores seleccionados a lo largo del proceso de cálculo, al tiempo que se le da una mayor credibilidad a los parámetros de presión y temperatura obtenidos a lo largo del ciclo.

Para el análisis del dimensionamiento del sistema generador, se debe retomar la información presentada en la tabla 5 (página 36) y ayudados con la información teórica se conforma una tabla de recopilación de información.

Tabla 19. Comparaciones dimensionales

	Espacio disponible en el vehículo	Valores teóricos y experimentales para el tamaño del conjunto generador
	[cm]	
Largo	56	55
Ancho	49.4	-
Diámetro	-	9.9

A pesar que la diferencia entre el largo disponible y el largo del sistema generador es muy poca, es suficiente para acoplar el sistema de generación dentro del vehículo. En cuanto a la relación entre el ancho disponible y el diámetro de la micro turbina, si se cuenta con espacio de sobra.

En general el volumen como el que se cuenta para instalar la micro turbina y los subsistemas asociados de control, alimentación de combustible y demás queda en función de la altura que se tenga (distancia entre el capot y la parte baja del chasis), pero a pesar de esto y partiendo de las dimensiones del área transversal se puede afirmar que se cuenta con espacio suficiente.

Tabla 20. Comparativo en areas de utilizacion

Área disponible [m ²]	Área requerida [m ²]
0.2764	0.0545

4. VIABILIDAD DEL PROYECTO

El estudio de viabilidad estará enfocado desde los diversos puntos de vista que comprenden el desarrollo del proyecto. Tomando como punto base un estudio de mercado preliminar, a través del cual se establezcan las características y oportunidades que tiene este desarrollo dentro de un mercado objetivo en la industria automotriz.

El objetivo principal con el estudio de mercado, es determinar la existencia de una demanda insatisfecha lo cual justifique la cabida del producto en un mercado objetivo, definiendo de esta forma las oportunidades y problemas que se han de tener.

Inicialmente, y a modo de recopilación de la información, se exponen las ventajas y desventajas encontradas a lo largo de todo el desarrollo.

Tabla 21. Ventajas y desventajas de las microturbinas como sistemas de generación eléctrica en vehículos eléctricos de rango extendido.

Ventajas	Desventajas
• Se reducen los porcentajes de emisiones contaminantes. • Se implementa un sistema con menos componentes móviles. • Requiere menos gastos de mantenimiento. • Es un sistema más confiable y consistente en el tiempo. • Entrega una eficiencia energética significativamente mayor. • Físicamente, es un sistema más compacto y liviano. • No requiere de sistemas adicionales de refrigeración. • Promueve el desarrollo del conocimiento, al rediseñar un producto cotidiano. • Incrementa la autonomía del vehículo. • Se prolonga el tiempo de vida útil de los pozos petroleros.	• Proceso de manufactura más complejo. • Costo inicial de adquisición más elevado. • Altas emisiones de ruido. • Mano de obra más calificada para realizar procesos de mantenimiento. • Su desarrollo está asociado a un mercado emergente. • Mitiga pero no desaparece la emisión de gases de efecto invernadero.

El estudio de mercado se establece con base a los siguientes parámetros:

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO.

Como se estableció a lo largo del desarrollo del proyecto, se trata de una mejora de producto, la cual parte de la utilización del concepto básico de vehículo automotor de propulsión eléctrica.

Lo que se pretende de fondo es implementar un sistema de generación eléctrica que viene dando mucho de qué hablar en otros sectores industriales por sus excelentes prestaciones técnicas y económicas (ej: generación eléctrica en zonas apartadas de fuentes de suministro), superando considerablemente a los sistemas que actualmente son implementados para cumplir esta labor.

Las micro turbinas en comparación a los motores recíprocos presentan:

Tabla 22. Características de las microturbinas como conjunto de generación eléctrica.

Características	
✓	Mayor eficiencia térmica.
✓	Optimizan la potencia mecánica suministrada.
✓	Constituyen un sistema térmico más estable.
✓	Menor rata de falla.
✓	Prolonga los tiempos de servicio (Vida útil).
✓	Optimiza el consumo de combustible.
✓	Genera un menor porcentaje de emisiones contaminantes.
✓	Operación urbana a bajo costo (Basado en una fuente eléctrica).
✓	Amplio rango de operación (Alta autonomía).

Las características expuestas se pueden considerar en gran medida como válidas, sin necesidad de tener gran conocimiento del tema. Si solo comparamos los medios de procedencia para ambos sistemas de generación, podemos ver las condiciones de operación normales bajo las cuales se diseñaron.

- El motor recíproco proviene de la industria de la locomoción, en sus orígenes se diseñó con el fin de impulsar vehículos terrestres, posteriormente y tras ciertas transformaciones, su implementación se diseminó a otros campos de la industria.
- Las turbinas inicialmente no tuvieron grandes repercusiones en el campo industrial. Cuando se adaptaron para el medio de la aviación fue cuando tomaron fuerza y realmente evolucionaron a los sistemas que actualmente se conocen y se continúan estudiando y rediseñando.

Es de conocimiento general que el campo aeronáutico, se rige por altos estándares de calidad y bajos porcentajes de error, ya que sus condiciones de

funcionamiento así lo obligan; dentro del sector industrial el fallo de un motor recíproco se traduce en pérdidas económicas para un cierto grupo de personas, por el contrario, la falla de una turbina ocasiona una catástrofe ligada a la pérdida de vidas humanas.

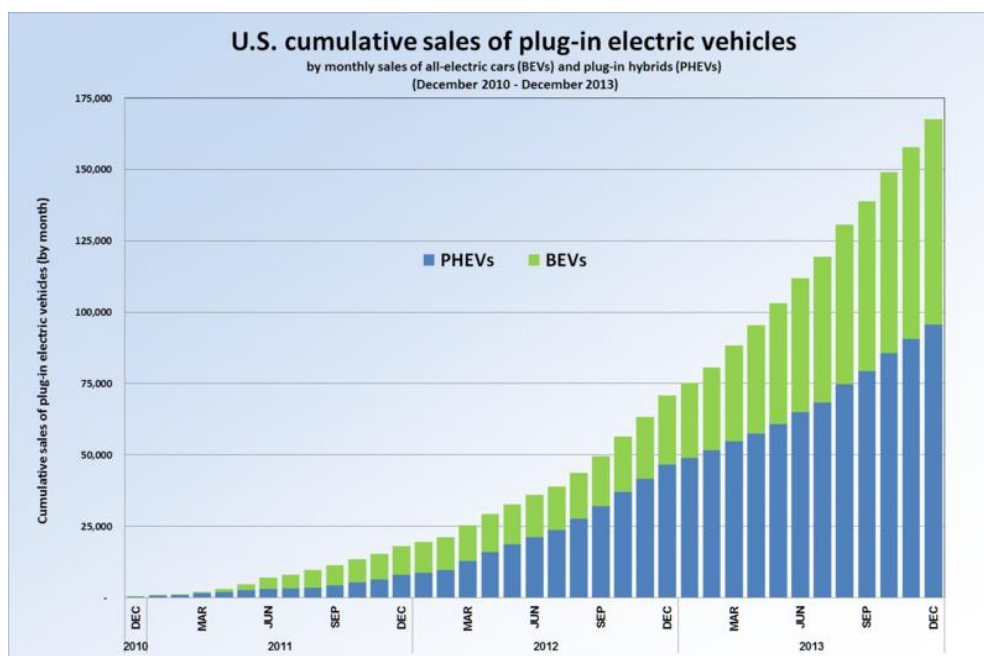
El modelo de implementación que se considera para este tipo de sistema se basa en modelos de fabricación y distribución ya establecidos en la industria automotriz. Lo que simplemente se debe replantear son los procesos de diseño, fabricación y ensamble para el nuevo conjunto generador. Estos ligeros cambios, facilitarían la puesta en marcha del proyecto, además de que evitan incurrir en costos adicionales por la adquisición de nuevos equipos o la restructuración de las plantas de trabajo.

4.2. MERCADO POTENCIAL; OFERTA Y DEMANDA.

Un punto neurálgico dentro del estudio, es determinar cómo se encuentra la oferta y la demanda, para establecer si el proyecto es viable y su cabida en un mercado potencial objetivo.

En la siguiente ilustración se esquematiza el crecimiento que ha tenido el mercado estadounidense en el sector de los vehículos de tracción eléctrica entre diciembre de 2010 y 2013. Se hace diferencia entre vehículos eléctricos conectables a la red eléctrica y vehículos eléctricos híbridos con batería (PHEV y BEV por sus siglas en

Ilustración 34. Tendencia en ventas de vehículos eléctricos en el mercado norte americano.

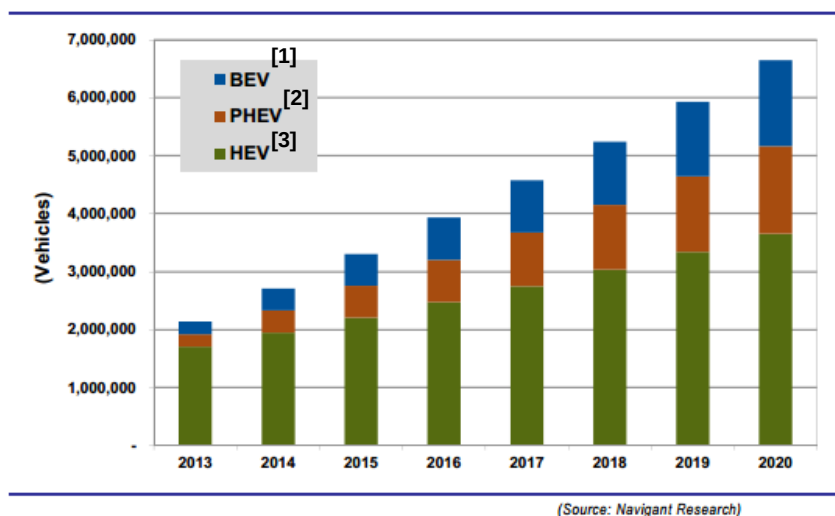


ingles respectivamente). El estudio establece la relación que se proyecta entre la oferta y la demanda para este sector económico.

Con base en el estudio previamente expuesto, y recurriendo a información puntual sobre el comportamiento de la oferta a nivel mundial, se puede establecer una proyección a 7 años, con la cual se relaciona la oferta y la demanda que se presume existirá en el mercado de los vehículos eléctricos para 2020.

La incursión de la humanidad en el campo de la locomoción eléctrica viene en crecimiento desde 1834, fecha en que Thomas Davenport desarrolla el primer motor eléctrico comercial capaz de impulsar objetos (trenes y carros a escala). Es en 1897, cuando los primeros vehículos eléctricos llegan a comercializarse en la ciudad de NY, un grupo de taxis diseñado y construido por “Electric Carriage and Wagon of Philadelphia”. En el sector privado “Baker Motor Vehicle Company” incursionó con un vehículo con 100 millas de rango y una velocidad tope de 22 mph. Para 1900, Ferdinand Porsche crea el primer vehículo híbrido, mientras que el 38% de los automóviles en US eran propulsados eléctricamente. Y, finalmente en 1989 comienza el boom en el mercado automotriz actual por parte de las grandes ensambladoras pre-existentes y de algunas compañías emergentes enfocadas en satisfacer la demanda creciente en este campo. Ambos casos de

Ilustración 35. Proyección de la oferta de vehículos propulsados eléctricamente para el mercado mundial.



Fuente: Electric Vehicle Market Forecasts / Global Forecasts for Light Duty Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles: 2013 – 2020 / Published 2013

-
- [1] “Battery Electric Vehicle” _ Utilizan la energía obtenida de la red eléctrica.
 - [2] “Plug-in Hybrid Electric Vehicle” _ Vehículos eléctricos que se pueden conectar a la red eléctrica, y que además son capaces de generar y almacenar su propia energía eléctrica.
 - [3] “Hybrid Electric Vehicle” _ Conjunto que incluye toda la gama de vehículos eléctricos capaces de generar su energía internamente (subsistema adicional a bordo del vehículo).

compañías, continúan vigentes y exponiendo nuevos desarrollos en el campo de la locomoción eléctrica.

- **Oferta.**

Actualmente los vehículos eléctricos constituyen un mercado emergente con una alta probabilidad de éxito, ya que su fuente principal de alimentación proviene de energías renovables.

En la ilustración 35 se puede ver el comportamiento que se espera para el crecimiento en la oferta de vehículos tipo PHEV, la cual pasará de unos cuantos miles a millones en los próximos 7 años, ligado directamente al crecimiento demográfico mundial e inversamente a la existencia de combustibles derivados del petróleo.

Por otra parte, también se puede asegurar que el comportamiento de la oferta estará muy influenciado por las leyes de protección ambiental y los grupos sociales que las lideran, con el fin de mitigar el creciente deterioro que vive nuestro planeta.

Entre las capacidades que se requieren industrialmente para llevar a cabo el proyecto, y como se mencionó anteriormente, se cuenta aproximadamente con un 80% de la infraestructura instalada y funcional, considerando que se cuenta con la capacidad para: 1. suministro de materia prima, 2. ensamble estructural, 3. acabados exteriores e interiores y 4. métodos de comercialización. Se puede decir que la única parte del proceso que requiere de modificaciones en cuanto al diseño, fabricación e implementación, de todos los procesos es la referente al sistema de respaldo (conjunto generador), ya que las dimensiones, requerimientos térmicos, acústicos, sistemas de distribución y control, etc, varían con relación a los motores recíprocos que se vienen utilizando.

- **Demanda.**

Para poder establecer la demanda, principalmente se tiene que definir qué clase de bien es el que se pretende incluir en el mercado. Por sus características y prestaciones estamos hablando de un bien suntuoso, ya que a pesar de ser altamente comercial, permanece clasificado dentro de la sección de pasivos en el diagrama de flujo de su propietario.

Tal como se expuso en el estudio de la oferta, si miramos la ilustración 35 podemos ver que la única forma para que crezca la oferta es por la creciente demanda que se tendrá impulsando el mercado. Se apoyará en la reducción de los yacimientos petroleros así mismo como en la propagación de los ideales conservacionistas.

Con respecto al sector automotriz en general, se puede establecer, con base en una mirada retrospectiva, que este siempre irá en aumento, sea por la implementación de nuevas leyes que limiten o promuevan la circulación de vehículos con ciertas características. Adicionalmente este está ligado al crecimiento demográfico a nivel mundial.

4.3. CANALES DE DISTRIBUCIÓN.

Los canales de distribución tanto para mercadeo como para el vehículo en sí, ya se encuentran definidos y totalmente probados. No requieren de algún cambio ya que tal cual y como han venido siendo implementados, logran completar satisfactoriamente el proceso de distribución, desde que el producto sale de las plantas de fabricación de manos de los productores hasta llegar al consumidor final, pasando por ciertos grupos de terceros conocidos como las comercializadoras.

Se agrega que es importante destacar durante el proceso de mercadeo, las características adicionales únicas que este vehículo tiene, comparándolas con el medio de procedencia original de dicha tecnología. Así se logra captar en mayor medida la atención de otros posibles consumidores potenciales y se amplía el mercado objetivo considerado inicialmente.

Se puede decir que el mercado automotriz mundial describe constantemente una tasa de crecimiento irregular, la cual se rige por las leyes establecidas por los diferentes gobiernos, criterios sociales, crecimiento demográfico y del poder adquisitivo de ciertos estratos socio económicos. Ahora, si puntualizamos en el mercado de los vehículos eléctricos, podemos encontrar que es un mercado con historia, actualmente algo diezmado por las comparaciones con los vehículos convencionales (vehículos de combustible fósil), teóricamente mal fundamentadas y más que todo basadas en paradigmas culturales.

El mercado de los vehículos eléctricos es de alto riesgo en el corto plazo, pero para el mediano y largo plazo se constituye en un negocio altamente rentable. Por lo tanto, y con el fin de obtener un producto competitivo, es prudente iniciar estudios detallados, tanto de diseño como de mercadeo y estadística, para definir cuáles serían los costos de fabricación y nichos de mercado para este vehículo, y de esta manera potenciar y enfocar los esfuerzos.

Al analizar desde el punto de vista de la implementación, se encuentra que, al estar trabajando bajo el concepto de mejora de producto, ya se tienen gran parte de los procesos preestablecidos y económicamente redituables, lo cual minimiza los tiempos de toma de decisiones y los riesgos económicos asociados. Además, los cambios en la infraestructura, adquisición de equipos, instructivos, herramientas, personal y capacitación no requieren de un alto desembolso por parte de quienes hagan la inversión y entregaría grandes ventajas y una alta valorización de la compañía.

4.4. VEHÍCULOS DE RANGO EXTENDIDO EN EL MERCADO ACTUAL.

Actualmente en el mercado automotriz podemos encontrar una creciente oferta de vehículos eléctricos, liderada, según colaboradores de “*Green Car Reports*”, por tres marcas y modelos concretamente: Chevrolet con el Volt, Nissan con el Leaf y Tesla con su modelo S. Sin embargo, se está evidenciando un ligero estancamiento en la tendencia del mercado para estas casas fabricantes debido a marcas emergentes con modelos alternativos como BMW, Renault, Ford, entre otras, las cuales además de implementar diseños estéticamente diferentes, logran captar la atención de posibles nuevos compradores ofreciendo características técnicas adicionales.

Dentro de los modelos y casas fabricantes que se mencionan en el párrafo anterior Zachary Shahan en su publicación “*Electric Cars 2014 – Prices, Efficiency, Range, Pics, More*” para “*EVObsession*” lista los más destacados.

El consolidado de vehículos expuestos en la tabla 23 representa una muestra real de lo que se tiene actualmente en el mercado automotriz de vehículos alternativos. Como se puede ver, no solo se negocia con vehículos 100% eléctricos, también se tiene cabida para los vehículos híbridos y de rango extendido. Finalmente solo difieren unos de otros en cuanto al precio, lujos y prestaciones técnicas que puedan entregar.

Tabla 23. Vehículos alternativos de venta en el mercado mundial.

Fabricante	Modelo	Costo [USD]	Rango [km]	Tipo
BMW	i3 // REx	\$41.350 //	137 //	100% EV // Rango extendido
	i8	\$45.200	500	Hibrido
Chevy	Volt	\$34.185	610	Hibrido
Ford	C-MaxEnergi	\$32.950	965	Rango extendido
	Focus Electric	\$35.200	291	Rango extendido
Opel	Ampera	\$50.548	500	Hibrido
Porsche	Panamera S-E	\$99.000	805	Hibrido
	Hybrid			
Renault	Twizy	\$9.555	100	100% EV
	Zoe	\$27.584	180	100% EV
Tesla	Modelo S	\$71.070	427	100% EV

Fuente: Electric Cars 2014 – Prices, Efficiency, Range, Pics, More. Dominio: <http://evobsession.com/electric-cars-2014-list/>

Adicional a lo anteriormente expuesto, y al discriminar los vehículos eléctricos de rango extendido cuyo sistema de respaldo es una micro turbina, encontramos que a pesar de no ser un concepto altamente comercial se encuentra vigente e implementado como se expone a continuación:

En primera instancia, los costos de fabricación de una micro turbina son elevados, sin embargo a través de un estudio realizado por Capston Turbines se encontró que; el costo de fabricación unitario de una micro turbina oscila los US\$ 33.326, tras implementar un proceso de fabricación en serie el costo por unidad se vería reducido a US\$ 1.666.

La tendencia en el costo inicial de los modelos de innovación tecnológicos tiende a ser alta, pero una vez se va acrecentando la aceptación dentro de un mercado objetivo, los costos tienden a ir bajando al refinar los procesos de producción.

Lastimosamente, dentro del mercado actual de vehículos alternativos, aquellos que cuentan con una micro turbina como sistema de generación de respaldo se exponen como vehículos conceptos. Los cuales entran a formar parte de un grupo de pioneros a través de los cuales se exponen todos los puntos de vista adicionales que se tienen a favor al cambiar el sistema de respaldo. Claros y destacables exponentes del tema son:

- Jaguar C-X75
- Walmart Camión concepto
- Capstone CMT380 Blackbird
- Whisper

Puntualmente el único modelo comercial de vehículo eléctrico, respaldado por una microturbina encontrado a la fecha (26/08/2014), es un camión fabricado por la

compañía Wrightspeed, con sede principal en California. Este vehículo cuenta con las características que se exponen en la tabla 24.

Tabla 24. Especificaciones; camión de rango extendido respaldado por una micro turbina

Máxima potencia continua	125 – 250 HP
Potencia máxima de regeneración	400 HP (Frenado por debajo de 42 mph)
Velocidad máxima	72 mph
Capacidad de la batería	25kWh – 39kWh
Generador	Microturbina de 30 – 65 kW
Opciones de combustible	Líquido: Diesel, Jet A // Gaseoso: Propano, Gas natural
Emisión de ruido	65dbA a 10m, a toda potencia

Fuente: <http://wrightspeed.com/products/the-route/>

Lo indicios muestran que a pesar de ser una tecnología emergente, tiene una gran proyección, y al igual que se vivió en su momento el cambio de motores recíprocos a turbinas en el sector aeronáutico, en la industria automotriz los motores recíprocos como sistemas de generación tienden a ser reemplazados por turbinas, siempre y cuando se encuentren correctamente fundamentadas sus ventajas al tiempo que se dé solución para sus desventajas.

Por último es válido destacar que en el mercado mundial de sistemas de generación, se cuenta con micro turbinas las cuales ya han sido probadas y actualmente se pueden adquirir.

Por parte de capston turbines, se cuenta con una amplia gama de sistemas, los cuales pueden operar con combustibles tanto gaseosos (Ej: Gas natural, propano) como líquidos (Ej: Diesel, Jet A, Kerosene), y entregan una potencia que va desde los 28kW hasta los 1000kW. Desafortunadamente, estos conjuntos generadores ocupan más espacio del que realmente se dispone dentro del vehículo (las dimensiones en ancho x largo x alto oscilan en un rango de 0.76 x 1.5 x 1.9 hasta 2.4 x 9.1 x 2.9 metros), debido a la distribución de los subsistemas. Por esta razón se dificulta la implementación de una de estas turbinas dentro del vehículo que se está diseñando (Información de referencia adquirida del catálogo de productos de Capston turbines, publicación virtual. Dominio: http://www.capstoneturbine.com/_docs/Product%20Catalog_ENGLISH_LR.pdf).

Adicional a Capston turbines, Blandon Jet también comercializa micro turbinas para sistemas de generación. Para adquirir las características y referencias de las turbinas que manejan, se debe entrar en contacto directo con servicio al cliente.

CONCLUSIONES

Cualitativa y cuantitativamente, se pudo observar a lo largo del desarrollo del documento, que conceptualmente es factible llevar acabo la implementación del proyecto. Con esto se abre la puerta para iniciar con el diseño detallado de lo que acá se expone, para finalmente poder llegar al desarrollo de un prototipo dado que este el objetivo final deseado.

Con base en el estado del arte presentado a lo largo del capítulo 1 de este documento. Podemos establecer que:

1. A pesar que la implementación de una generadora de gases como sistemas de respaldo eléctrico, no es una idea de vanguardia, si lo es al momento de utilizar esta característica dentro del funcionamiento de un vehículo eléctrico. La implementación de este diseño, es algo en lo que la industria automotriz apenas viene trabajando y exponiendo los primeros prototipos.
2. Adicionalmente, se vio que el sistema de respaldo no solo puede estar compuesto por un componente principal el cual se encargue de sobrellevar el 100% de la demanda eléctrica del conjunto completo. Para ayudar a mejorar la eficiencia del conjunto y evitar desperdiciar energía en exceso, podemos pensar en implementar subsistemas los cuales reduzcan carga de trabajo al conjunto de generación principal.

Como se definió en el marco teórico, el modelo matemático que describe el funcionamiento del conjunto es indiferente al tamaño que tenga la generadora de gases. Gracias a esto, se logró establecer con base en los documentos de referencia la concordancia entre las variables, parámetros y constantes de eficiencia que mejor se acoplaban al modelo que se analizó. Adicionalmente, cabe destacar que dichos valores pueden llegar a ser modificados para el desarrollo de futuros estudios, en los cuales se requieran diferentes parámetros de presión y temperatura.

Termodinámicamente hablando, en el cuadro resumen presentado en la tabla 9, se pueden apreciar, analizar y comparar técnicamente los valores de presión y temperatura que se tienen a lo largo del ciclo de generación. Estos oscilan entre valores físicamente manejables por los materiales que el mercado actual nos puede ofrecer para la manufactura de los determinados componentes. Por otro lado, de igual manera se puede apreciar que matemáticamente la correlación entre los datos y las alteraciones que sufre el flujo al pasar a través de cada uno

de los componentes. Las variaciones de presión y temperatura son acordes a lo que establece la teoría (Ej. Una vez pasa el flujo a través de la turbina, la presión y temperatura deben disminuir).

Con base a los requerimientos termodinámicos y los resultados obtenidos, se calculó el tamaño físico que el conjunto generado a de ocupar al interior del vehículo. Los valores que acá se obtuvieron se enmarcan perfectamente dentro de la realidad. Así como se presentó en la tabla 19, la micro turbina puede ser perfectamente ubicada dentro del espacio que actualmente se tiene destinado para los motores recíprocos de respaldo, e incluso yendo un poco más allá y pensando en la conversión de vehículos convencionales a vehículos eléctricos, se puede garantizar que una micro turbina puede operar como sistema de respaldo sin tener que alterar en gran medida el espacio que originalmente se tiene de diseño.

Dentro del análisis de viabilidad se observa que, desde el análisis cualitativo y cuantitativo de la información obtenida y procesada, al implementar tecnologías mixtas que permitan la interacción entre los sistemas de locomoción existentes y las nuevas tecnologías emergentes, se logran conjugar las ventajas y mitigar en gran medida las desventajas que cada uno de estas tecnologías tienen. Donde finalmente no solo se tiene como beneficiario al consumidor y al ambiente en general sino que de igual forma se conservan las características principales del modelo de mercado del sector automotriz.

Desde el estudio de viabilidad se trató de establecer si existe cabida en el mercado para un producto con las características, técnicas y conceptuales expuestas. El análisis se enfocó en mostrar y establecer las bases y teorías requeridas para llevar a cabo este tipo de desarrollo. Al momento de investigar sobre esta modalidad en carros de rango extendido, se vio que a pesar de ser un sistema el cual apenas está saliendo al mercado, ya se cuenta con modelos comerciales.

Adicionalmente hay que considerar que la viabilidad del proyecto está ligada a varios factores ajenos a las entidades promotoras del proyecto (leyes gubernamentales, crecimiento poblacional, etc), factores cuyo comportamiento, en última instancia, terminan por facilitar o complicar la distribución y sostenibilidad del producto.

Al tomar como punto de partida el rediseño o la mejora de un producto, es ideal establecer inicialmente los factores que se tienen a favor, ya probados y 100% funcionales. Dichas características constituyen en gran medida los parámetros de

diseño, con base en los cuales se deben acoplar los futuros desarrollos. Según se puede ver en diversos estudios de mercado, una de las principales causas para lograr consolidar un producto dentro de un mercado es la infraestructura con la cual se cuenta en el momento, tanto para el desarrollo técnico como su operación por parte del consumidor.

Al hablar de la infraestructura con la que se cuenta, al momento de operar el vehículo, se expone un punto a favor, ya que tanto para el reabastecimiento eléctrico como de combustible existen modelos de distribución actualmente operativos. Los cambios o modificaciones que se deban hacer se puede decir que son mínimos, serían para optimizar los proceso o garantizar criterios de seguridad.

El incursionar en un mercado emergente implica para una compañía asumir los riesgos que pueden conducir al éxito o al fracaso por la introducción de un producto. Sin embargo, es importante sopesar si las posibles ganancias que se han de obtener son proporcionales o mayores al riesgo que se toma, antes de tomar una decisión de inversión.

RECOMENDACIONES

En este trabajo de grado, se establece el punto de partida para un posterior diseño preliminar del sistema de generación por micro turbinas, requerido para un vehículo eléctrico de rango extendido. Por lo tanto puede considerarse como material de referencia para las personas interesadas en el tema que pretendan continuar investigando sobre este tipo de desarrollo.

Si bien se trató, no se mencionó puntualmente el tema de los aislamientos acústicos que se deben considerar al momento de instalar el conjunto generador. Esto da pie para presentar la idea a personas interesadas en el campo de la acústica o protección ambiental para investigar sobre sistemas de reducción de ruido e insonorización.

Como el proyecto abarca diferentes ramas del conocimiento, deja la puerta abierta para otras realizaciones que pueden definirse a partir de los conceptos previamente expuestos a lo largo del desarrollo. Algunas de las áreas de interés podrían ser:

- ✓ Termodinámica – Diseño de intercambiadores de calor.
- ✓ Transformación y aprovechamiento energético _ Energía calórica en energía eléctrica.
- ✓ Generación, almacenamiento y distribución eléctrica.
- ✓ Comprobación computacional (CFD) entre los valores teóricos obtenidos y los experimentales generados por el software.
- ✓ Estudio de viabilidad detallado, tomando como referencia encuestas directamente realizadas al público general y posibles consumidores.

BIBLIOGRAFÍA

Publicaciones digitales

SOARES, Claire. Microturbines

Sistema de bibliotecas Universidad Pontificia Bolivariana. Manual de Proyectos de Grado de la Escuela de ingenierías de la UPB

Universidad Autónoma de Juárez. Lineamientos para la elaboración de proyectos de investigación.

UAN. Formato anteproyecto

ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas NTC 1486, 5613 y 4490.

FUNDASOL. Guía de Formulación de Proyectos.

HURST, Dave. Electric Vehicle Market Forecasts / Global Forecasts for Light Duty Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles: 2013 – 2020. Publicado 2Semestre 2013

ULF, Sandberg. “Noise emissions of road vehicles”. Publicado en Julio de 2001.

FAA. “Noise levels for U.S. certificated and foreign aircraft”. Publicado el 05/25/2012.

KAI, Grupo de gestión eficiente de energía y GIEN, grupo de investigación en energías. Colciencias. Eficiencia energética en motores eléctricos.

Cibergrafía

Colaboradores de Wikipedia. “Alternative fuel vehicle” [en línea]. Wikipedia, enciclopedia libre [citado el 14/01/2014 a las 10:34 am]. Dominio:
http://en.wikipedia.org/wiki/Alternative_fuel_vehicle.

Colaboradores de Wikipedia. Energía renovable [en línea]. Wikipedia, enciclopedia libre [citado el 14/01/2014 a las 11:38 am]. Dominio: http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable.

VIA Motors. “Inside the Extended-Range Electric Truck” [en línea]. “Electric vehicle manufacturer” [citado el 18/01/2014 a las 12:20 pm]. Dominio: <http://www.viamotors.com/powertrain/>.

Universidad Nacional de Colombia. Estadística descriptiva [en línea]. Probabilidad y Estadística [citado el 30/01/2014 a las 4:14 pm]. Dominio:
http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/html/un1/cont_126_26.html.

Christine & Scott Gable. “How Electric Motors and Generators Work” [en línea]. About.com [citado el 07/03/2014 a las 10:23 am]. Dominio:
<http://alternativefuels.about.com/od/hybridvehicles/a/motorgenerator.htm>.

Christine & Scott Gable. “How Does Regenerative Braking Work” [en línea]. About.com [citado el 07/03/2014 a las 10:38 am]. Dominio:
<http://alternativefuels.about.com/od/hybridvehicles/a/regenbraking.htm>. Colaboradores de BIOMASS Energy Centre. “Typical calorific values of fuel” [en línea]. biomassenergycentre.org.uk [citado el 07/03/2014 a las 5:16 pm]. Dominio:
http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75,20041&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Colaboradores de Colombia Travel. Tabla de clima por ciudades [en línea]. Colombia.com [citado el 07/04/2014 a las 9:58 pm]. Dominio:
https://www.colombia.com/travel/es/guia_viajero/tabla_clima.asp.

Colaboradores de “how stuff Works”. “Thermocouple” [en línea]. science.howstuffworks.com [citado el 18/04/2014 a las 5:14 pm]. Dominio: <http://science.howstuffworks.com/thermocouple-info.htm>.

Editores de la enciclopedia británica. “Seebeck effect” [en línea]. global.britannica.com [citado el 18/04/2014 a las 5:19 pm]. Dominio: <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/532358/Seebeck-effect>.

Colaboradores de “Thermometrics”. “Thermocouple Type K” [en línea]. thermometricscorp.com [citado el 18/04/2014 a las 6:15 pm]. Dominio: <http://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>.

Colaboradores de “Energy”. “How do wind turbines work” [en línea]. energy.gov [citado el 18/04/2014 a las 6:37 pm]. Dominio: <http://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>.

Colaboradores de la misión interestelar Voyager. “Radioisotope Thermoelectric Generators” [en línea]. Voyager.jpl.nasa.gov [citado el 19/04/2014 a las 4:02 pm]. Dominio: http://voyager.jpl.nasa.gov/spacecraft/instruments_rtg.html.

Colaboradores de Edison Tech Center. “Electric Cars and History” [en línea]. edisontechcenter.org [citado el 26/04/2014 a las 4:13 pm]. Dominio: <http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html#timeline>.

Colaboradores de RACC, Tribunales de la Movilidad. Vehículo eléctrico, los límites de una alternativa [en línea]. tribunales.racc.es [citado el 13/08/2014 a las 10:27 pm]. Dominio: http://tribunales.racc.es/es/vehiculo_electrico

Colaboradores de “How stuff works”, “Thermoelectricity” [en línea]. science.howstuffworks.com [citado el 21/08/2014 a las 20:22]. Dominio: <http://science.howstuffworks.com/thermoelectricity-info.htm>

Colaboradores de “All About Circuits”, “Battery ratings” [en línea]. allaboutcircuits.com [citado el 24/08/2014 a las 20:20] Dominio: http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_11/3.html

Colaboradores de “Green Car Reports”, “Who Wins Electric-Car Brand Battle? BMW Have The Buzz Now” [en línea]. greencarreports.com [citado el 25/08/2014 a las 21:53]. Dominio: http://www.greencarreports.com/news/1094036_who-wins-electric-car-brand-battle-bmw-tesla-have-the-buzz-now

ALLEN, James “James Allen on EV: The Whisper turbine-charged electric car” [en línea]. thechargingpoint.com (citado el 27/08/2014 a las 00:07] Dominio: <http://www.thechargingpoint.com/opinions/James-Allen-on-EV-The-Whisper-turbine-charged-electric-car.html>

FRANCIS, Stabler “Automotive Thermoelectric Generator Design Issues” [en línea]. “DOE Thermoelectric Applications Workshop” (citado el 30/08/2014 a las 16:23). Dominio: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/stabler_0.pdf

Bibliografía

SARAVANAMUTTO, HIH / ROGERS, GFC / COHEN. Gas turbine Theory
CENGEL / BOLES. Termodinámica

Otros

Canal de youtube: Capstone Turbine.

Dominio: <http://www.youtube.com/channel/UCOAhv5yykmuwy-TTJ6gL8iw>. Consultada 15/11/2013 a las 6:37 pm.

Canal de youtube: “GreenMotorUK’s channel”

Dominio: <http://www.youtube.com/watch?v=80E1fOp95rA>. Consultada 17/11/2013 a las 8:58 pm.

ANEXO 1

ARTICULO PUBLICABLE

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICRO TURBINA PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA, IMPLEMENTADA EN CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO

Jorge Ivan Garcia Sepulveda, Daniel Alejandro Franco Uribe

*MEng. Ingeniería Aeronáutica / MSc. Thermal Power (Gas Turbine Technology)
(Universidad Pontificia Bolivariana, jorge.garcia@upb.edu.co, Medellín), Estudiante
de Ingeniería Aeronáutica (Universidad Pontificia Bolivariana,
danielalejandro.franco@alfa.upb.edu.co, Medellín)*

Abstract: Along this article you will find information about the extended-range cars, what are they design for, important aspects of their operation, alternative generation methods and more tips about it. Besides, there is a comparison between the extended-range cars, hybrid cars and conventional cars. Taking into account the devices that each type of car use to propels itself and how is generated the energy for it (micro turbine vs reciprocal engine).

Keywords: Combustibles alternativos, combustibles fósiles, damper, diseño conceptual, eco, energía renovable, frenado regenerativo, micro turbina, vehículo eléctrico de rango extendido.

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto surge luego de estudiar y exponer las ventajas y desventajas que existen en el campo automotriz entre los vehículos sin y con emisiones (vehículos alternativos y de combustible fósil). Según estudios realizados por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) en el 2011, la aceptación de los vehículos 100% eléctricos y su desarrollo se ha visto ligeramente estancado gracias al poco apoyo que ofrecen los entes gubernamentales de los diferentes países. Ya que a pesar que los clientes conoces en gran medida las características de un vehículo eléctrico, no optan por su compra al ver la carencia de una infraestructura definida para el reabastecimiento fuera de casa de los mismos. Ante

esta situación surgen dos clases de vehículos los cuales dan cabida a las tecnologías emergentes mientras que aprovechan la infraestructura de reabastecimiento preexistente. De esta forma se logra mitigar en cierta medida el impacto medioambiental al tiempo que se promocionan las tecnologías emergentes en el sector automotriz. Ambas clases de vehículos se conocen como:

- Híbridos
- De rango extendido

El enfoque central del proyecto se dio al alrededor del concepto de vehículo de rango extendido, sin dejar de exponer los conceptos básicos que enmarcan un vehículo híbrido. Al tener un vehículo de rango extendido se puede hablar, de dos sistemas principales que lo conforman: el sistema de propulsión y el sistema de reserva (o respaldo),

cada uno de ellos destinado a cumplir labores específicas.

Dentro del proyecto se establecieron una serie de objetivos, los cuales determinan el paso a paso y la demarcación global de este.

- Objetivo general.
 1. Diseñar conceptualmente una microturbina para generación eléctrica, implementada en carros eléctricos de rango extendido.
- Objetivos específicos.
 1. Determinar el estado del arte que existe en el campo de las microturbinas, y su implementación en el sector automotriz.
 2. Definir los parámetros y valores relevantes para el diseño conceptual de la microturbina.
 3. Realizar los cálculos termodinámicos de la micro turbina.
 4. Desarrollar el dimensionamiento de la micro turbina.
 5. Presentar las ventajas y desventajas de implementación, presentando una aproximación a la viabilidad del proyecto.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En el sector automotriz se vive una dualidad entre avanzar a nuevas tecnologías de locomoción o ahondar y mejorar los sistemas que se utilizan actualmente, ambos lineamientos respaldados por los intereses personales de las compañías directamente beneficiadas o afectadas.

Se propone desarrollar un punto intermedio entre ambos puntos de vista, de forma que se aprovechen las ventajas de ambas opciones y se consoliden en un solo producto. Es bajo esta concepción que surge la idea de un vehículo de rango extendido, el cual utilice motores eléctricos para desplazarse y un subsistema de respaldo, en este caso una micro turbina, alimentada por combustibles fósiles. De esta forma, se reduce la cantidad de emisiones contaminantes emitida como subproducto del proceso de combustión mientras se desmitifica el bajo rendimiento de los motores eléctricos.

Entre los principales beneficios de este tipo de desarrollo pueden destacarse.

- Prolonga la vida útil de los yacimientos fósiles.
- Eleva el grado de participación de las tecnologías emergentes.
- Satisface dos grandes poderes contradictorios del sector automotriz.
- Implementando una micro turbina se garantiza:
 - ✓ Mayor eficiencia.
 - ✓ Menos emisiones contaminantes
 - ✓ Mayor potencia
 - ✓ Menos consumo de combustible
 - ✓ Alta confiabilidad
- Promueve un punto de equilibrio entre dos grandes poderes en el sector automotriz.

Los vehículos de combustible fósil, utilizan compuestos destilados del petróleo los cuales son combinados con aire para posteriormente ser quemados logrando convertir la energía química presente en la mezcla en energía mecánica.

Ilustración 1. Vehículo de combustible fósil.



Fuente: Dominio digital
<http://www.diariomotor.com/imagenes/2011/08/posts/mazda-skyactiv-g-1.jpg>

Por otro lado, los vehículos de combustible alternativo describen un amplio grupo, conformado por todos aquellos “combustibles” que tienen ciertas características puntuales en cuanto a sus condiciones de funcionamiento, y con menor cantidad de emisiones contaminantes. En este grupo pueden encontrarse vehículos de diferentes clases:

- Solares
- Eléctricos
- Híbridos
- Biomasa
- Rango extendido
- De celdas de hidrogeno
- De agua
- De aire comprimido

DISEÑO CONCEPTUAL

Es en este punto donde se da forma y cuerpo a la idea, se conoce el cómo, el por qué y el para que se desarrollará. Al mismo tiempo se sustentan de manera aproximada los conocimientos y teorías que enmarcan el fenómeno.

Cabe destacar, que con el diseño conceptual, se muestran e ilustran tentativamente como deben estar constituidos los sistemas principales dentro del desarrollo de la idea. Así bien como los valores puntuales de algunas variables con una alta relevancia (Potencia requerida del sistema, distribución geométrica, características de generación eléctrica, etc.).

El diseño conceptual enmarca la idea, por lo tanto no se hace indispensable el desarrollo de planos complejos y puntuales sobre los sistemas y componentes.

MICRO TURBINAS

Es un sistema de transformación energética, el cual mezclar aire y combustible, y tras someter la mezcla a una fuente de ignición, transforma la energía química de la mezcla en energía mecánica, la cual posteriormente puede ser utilizada de diversas formas. Al hablar de una micro turbina, simplemente se está agregando un calificativo en razón de las dimensiones y capacidad de entregar potencia (Todos los conceptos fundamentales de funcionamiento son los mismos, sin importar que la turbina sea de mayor o menor tamaño y que genere más o menos potencia).

Ilustración 2. Turbinas: a). Microturbina b). Turbina B-777



Fuentes: Dominios digitales

a). <http://www.rctech.net/forum/electric-road/649209-turbine-powered-f1-redbull-x1.html>

b). http://1.bp.blogspot.com/-krB5zGCSvnI/ThUsCT4fCWI/AAAAAAAAAHs/goAEoNTwJY4/s1600/EU_TURBINA_777.jpg

En la actualidad una micro turbina puede implementarse para generar empuje, básicamente con aplicaciones recreativas. Pero el fuerte para estos sistemas se encuentra en el campo de la generación. Por esto, las micro turbinas se

clasifican en una categoría conocida como “Calor y Potencia Combinada” o CHP (De su funcionamiento se logra recuperar energía en forma de calor y potencia).

La principal ventaja que se tiene con este tipo de sistemas, en comparación a los motores recíprocos que actualmente se utilizan en generación, radica en que con un menor tamaño en el conjunto generador, se puede suplir y hasta garantizar una mayor producción energética de la que se tiene actualmente con las plantas convencionales generadoras de energía.

Ilustración 3. Mercado objetivo para diferentes sistemas de generación.

	Residential	Commercial	Industrial	Grid-Connected	Renewable / Off-Grid Distributed	Typical Unit Size Range (installation size can be larger)	1999 Installed Capital Cost (\$/kW)	Efficiency (%)	Commercial Availability
Microturbines ¹	1	1	1	2		25–300 kW	750–900	28–33	1999
Reciprocating Engines	1	1	1	1	1	5 kW–20 MW	400–600 ²	28–37	NOW
High-Temperature Fuel Cells		1	1	1	2	100 kW–1 MW	A ³	45–55	2005
Low-Temperature Fuel Cells	1	1	2	1	1	2–250 kW	2,000–3,000	30–40	NOW ⁵
Small Gas Turbines			1	1	2	500 kW–20 MW	650	25–40 ⁴	NOW

1. Recuperated microturbine

2. Large, gas-fired reciprocating engine

3. Not available

4. Forty percent efficiency achieved with advanced turbine cycle

5. PAFC only; PEM available in 2000

1 Primary Target Market

2 Secondary Target Market

Fuente: LITTLE. Arthur D. 1999. “Distributed energy: understanding the economics. Arthur D. Little, Inc. Cambridge, MA”.

CARROS ELÉCTRICOS DE RANGO EXTENDIDO

Los carros de rango extendido, al igual que los híbridos, constan de dos sistemas fundamentales para su funcionamiento. La única diferencia existente entre ambos modelos radica en que los vehículos de rango extendido solo ocupan uno de esos dos sistemas para su propulsión, mientras que el otro se encarga de funcionar como respaldo para suplir las necesidades energéticas que presente el sistema principal. Los vehículos híbridos pueden ser propulsados por uno u otro sistema.

Los vehículos de rango extendido están conformados por un motor eléctrico y un motor recíproco encargados de la propulsión y de la generación eléctrica respectivamente.

Al hablar de un carro eléctrico de rango extendido, lo primero que se debe tener en cuenta es que la propulsión del vehículo se hace únicamente mediante motores eléctricos los cuales adquieren la energía de las baterías. Ahora bien, el papel que desarrolla el segundo sistema (en este caso la micro turbina), es de respaldo, lo cual implica que

únicamente funcionaría al momento en que se tengan bajos niveles de carga en las baterías.

La implementación de turbinas en el sector automotriz, no es un tema de vanguardia, ya trae algo de historia. Previamente, se llevó a cabo la manufactura de vehículos exclusivos propulsados por “turbinas” (1963 - Chrysler / Turbina, 1980 - Chrysler Defense / M1 Abrams, 2000 - MTT / Y2K Superbike). Ideas que no tuvieron acogida por los tiempos de reacción, las condiciones de contaminación auditiva, el rápido deterioro en los componentes por las condiciones ambientales en las que se utilizaban, entre otras razones.

Tabla 1 - Continuación: Comparación cualitativa entre sistemas de generación recíprocos y micro turbinas.

Carac.	Motor recíproco				Micro turbina			
	NO _x	HC	CO	PM	NO _x	HC	CO	PM
Emisiones conta.	3.9	0.1	0.9	0.04	0.75	0.3	0.4	0.01
Emisiones de ruido	Gracias al bajo diferencial de presión y temperatura entre los gases de escape y el ambiente no producen mucho ruido.				Contrario al caso anterior las emisiones de ruido son el talón de Aquiles de las microturbinas.			
Espacio requerido	Requiere gran espacio debido a los subsistemas adicionales que requiere para su funcionamiento.				Solo consta de dos subsistemas; conjunto rotor y carcasa. No requiere mucho espacio.			
Peso	Sistema robusto que adiciona gran peso al vehículo restando capacidad de carga.				Más liviano debido a los mismos materiales implementados.			
Peso	Sistema robusto que adiciona gran peso al vehículo restando capacidad de carga.				Más liviano debido a los mismos materiales implementados.			
Costo de adquisición	Más bajo, gracias a ser una tecnología estudiada y probada.				Costo mayor, ya que es una tecnología emergente			
Costo de manto	A raíz del mayor número de componentes adicionales, requiere más insumo y mano de obra, traducido en un mayor costo.				Gracias a sus amplios periodos de mantenimiento y poca demanda de insumos presenta bajos costos.			
Costos de operación	Requiere de reabastecimiento de líquidos refrigerantes y lubricantes entre periodos de mantenimiento lo que aumenta los costos.				No requiere más que reabastecer combustible, y su monitoreo se hace en tiempo real a través de sistemas de computación.			

3. PARÁMETROS DE DISEÑO

Para definir los parámetros teóricos, al iniciar el proceso de diseño de la micro turbina, se buscó información para crear una base de datos con las demandas energéticas, la potencia entregada por el sistema de generación y otros datos relevantes existentes en los sistemas actualmente en funcionamiento.

En el siguiente cuadro se resaltan las siguientes características según el modelo.

Tabla 2. Vehículos de rango extendido comerciales y concepto.

Vehículo	Características del motor				
	Sistema de respaldo	Motor	Combust.	Motor eléct.	Rango
C-X75	2 micro turbinas [2]	70 [kW] c/u	Alternativo [4]	4x145 kW	900 km
Volt	Motor-generador	1398 cc	Gasolina	1x111 kW 1x55 kW	610 km
Ampera	Motor-generador	1398 cc	Gasolina	1x110 kW 1x54 kW	500 km
Atlantic	Motor-generador [1][2]	2000 cc	[3]	--	--
Karma	Motor-generador [1][5]	2000 cc	Gasolina	2x120 kW	370 km
Converj	Motor-generador [2]	1398 cc	Gasolina	--	--
Perdigon	Micro turbina [2]	0 cc	--	--	--
Cambiano	Micro turbina [2][5]	0 cc	ACPM	4x149 kW	800 km
Evora 414E	Motor-generador [2]	1200 cc	Flex-fuel [4]	2x152 kW	483 km
E-REV [6]	Motor-generador	4300 cc	Gas	1x150 kW	644 km

[1] _ Motor turbo-cargado.

[2] _ Vehículo concepto.

[3] _ Implementa N₂O como combustible.

[4] _ La operación del sistema está aprobada para diversos combustibles.

[5] _ No es totalmente un vehículo de rango extendido.

[6] _ Presentan un marco base adaptable para múltiples plataformas (“Truck, SUV or VAN”).

POTENCIA

Considerando la potencia necesaria y el número de motores implementados para cada uno de los diferentes sistemas instalados en los vehículos expuestos en la tabla 2, puede obtenerse un valor promedio que defina un punto de partida teórico para realizar el diseño conceptual de la micro turbina.

$$P_{total, sis} = P_{M,E} * \#motores$$

Tabla 3. Datos de potencia eléctrica máxima requerida.

Potencia del motor eléctrico [kW]	No. Motores	Potencia total del sistema [kW]
150	1	150
164	1	164
166	1	166
120	2	240
152	2	304
145	4	580
149	4	596

Una vez calculada la $P_{total, sis}$ se calcula el valor promedio para obtener $P_{Max, req}$.

$$P_{Max, req} = \sum_{i=1}^m \frac{m_i}{m}$$

Donde m es el número de muestras que se tiene (7) y m_i el valor particular de cada una (Ej: 150kW).

$$P_{Max, req} = 314.3 \text{ kW}$$

Dicho valor, es aproximado al rango expuesto en la ilustración 3 e igualmente justificado por los criterios presentados en el capítulo 2 del texto de SOARES, Claire. “Microturbines”, donde se define un rango de generación para micro turbinas ente 30 – 400 kW.

Adicionalmente, es prudente considerar la demanda eléctrica generada por todos los subsistemas implementados al interior del vehículo. Hay que considerar que la potencia máxima que pueden demandar, no debe superar la potencia máxima que la batería del carro es capaz de entregar. Según colaboradores de “All About Circuits”, en su publicación virtual “Battery ratings”, se establece que en promedio la corriente que entrega una batería (en vehículos convencionales) es de 70 amp y 12 voltios. Con estos valores se define la potencia eléctrica adicional requerida.

$$P = VI = 12 * 70 \quad P = 840 \text{ W}$$

Por otro lado, baso en el libro de SOARES, Claire. “Microturbines”, se pudo establecer qué; a la salida del generador se cuenta con 12 voltios y 56 amp de DC, equivalente a una potencia de salida de 672W. Promediando este valor con la potencia entregada por las baterías de un vehículo convencional, logramos establecer una buena aproximación de la demanda pasiva que a lo sumo pueden tener los subsistemas del vehículo ($P = 756\text{W}$) y que por consiguiente debe ser igualmente satisfecha por el conjunto generador.

Finalmente al adicionar estos 756 W a los 314.3 kW iniciales tenemos (Cifra redondeada por motivos practicos).

$$P_{Max, req} = 315 \text{ kW}$$

Mecánicamente es correcto utilizar dos motores ubicados en las llantas traseras, constituyendo un sistema “pusher” y garantizando un control de tracción independiente. Con esto, dividimos la potencia demandada por los motores a:

$$P_{Max, req} = 157.5 \text{ kW}$$

TERMODINÁMICOS

Los principales lineamientos vienen dados por los parámetros de potencia requeridos. Una vez establecidos los requerimientos de potencia, ya se saben implícitamente cuáles son las temperaturas con las cuales operarán cada uno de los componentes del sistema.

Se recomienda que la temperatura en la entrada a la micro turbina, no supere los 288.15 °K , mientras que la TET se encuentre entre 1116.5 °K a 1227.6 °K.

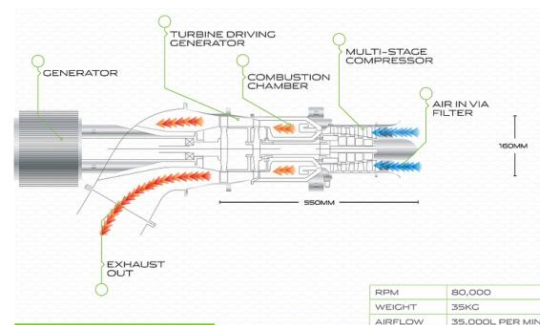
GEOMÉTRICOS

En este punto entran en consideración parámetros adicionales tales como:

- La distribución simétrica del peso.
- El aislamiento acústico.
- El aislamiento térmico del conjunto generador.
- La ubicación de los subsistemas empleados.

Como referencia se toma la micro turbina diseñada para el Jaguar C-X75.

Ilustración 4. Dimensionamiento; micro turbina Jaguar C-X75.



Fuente: Dominio digital
<http://media.treehugger.com/assets/images/2011/10/jaguar-Cx75-photo-04.jpg>

El sistema generador previamente mostrado tiene 160 mm de diámetro por 550 mm de largo. Utiliza un compresor axial de varias etapas y dos etapas de turbina que suplen una demanda de 145 kW.

Puntualmente en este documento no se describe un procedimiento para el diseño de la cámara de combustión, ya que éste va ligado directamente con la caracterización del combustible a implementar y

el tipo de inyectores. Con estas dos variables, se establece el tiempo de residencia que tiene la gota de combustible al interior de la cámara de combustión, y la longitud que se debe garantizar para este elemento con el fin de realizar la totalidad de la quema. Este estudio no se consideró a detalle ya que se sale de los alcances del proyecto.

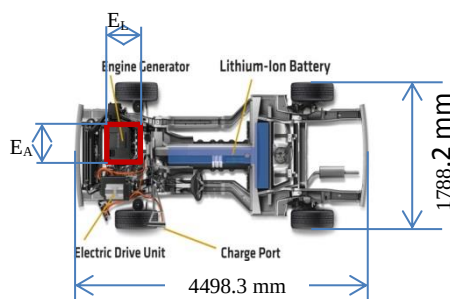
Aparte de considerar todo el dimensionamiento geométrico que implica el sistema, es válido, a su vez, analizar el espacio en el cual se instalará el sistema de generación y sus componentes al interior del vehículo.

Ilustración 5. Dimensiones Chevrolet Volt



Con esto, y estableciendo una proporcionalidad a una escala 1:250 se definen las siguientes relaciones:

Ilustración 6. Vista superior del Volt, y dimensionamiento geométrico.



Fuente: Dominio digital http://www.gm-volt.com/e/volt_scheme.jpg

$$\frac{E_L}{29} = \frac{4498.3}{242} \quad \frac{E_A}{33} = \frac{1788.2}{119}$$

Tabla 4. Dimensionamiento del espacio para la generadora.

	Real [mm]	Carro Esquema (250%) [mm]	Motor Esquema (250%) [mm]	E _i [mm]
Largo	4498,3	209	26	559,597
Ancho	1788,2	105	29	493,883

ELÉCTRICOS

Basado en el capítulo 2 del texto de SOARES, Claire. “Microturbines”; “Design and Components of Microturbines”, se encontró que a la salida del generador se cuenta con 60 Hz y 220 V de corriente alterna (AC), los cuales, posteriormente deben rectificarse (considerando una pérdida de 5% de la potencia eléctrica) a 12 V y 56 A/hr, para alimentar todos los subsistemas del vehículo además de cargar el conjunto de baterías.

La AC inicialmente obtenida, se utiliza para alimentar la demanda directa que tienen los motores eléctricos que propulsan el vehículo, claro está, considerando las especificaciones de operación que dichos motores tengan. Los motores eléctricos de AC a pesar de ser más caros, entregan una mayor eficiencia que los alimentados por corriente directa, lo que garantiza un mejor rendimiento en la propulsión (afirmación con base en la publicación virtual del Grupo de Gestión Eficiente de Energía, KAI y el Grupo de Investigación en Energías, GIEN; “Eficiencia Energética en motores eléctricos), además que pueden utilizarse como fuentes de regeneración eléctrica (frenado regenerativo).

El concepto de frenado regenerativo se centra en el régimen de operación del motor, al crearse una diferencia de velocidades entre el capo magnético y el rotor, conocida como deslizamiento.

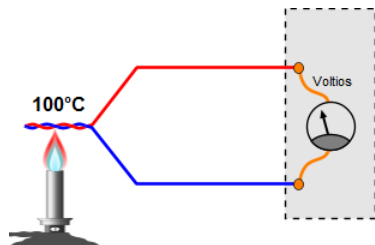
Adicional a esto, cabe considerar una mayor explotación de los gases de escape. Según lo descrito en el capítulo 3 de la publicación digital de SOARES, Claire. “Microturbines”, se puede asegurar que el calor y energía desechados en los gases de escape, representan cerca del 70% de la energía del combustible adicionado. Esto implica que los gases aún conservan un gran porcentaje de energía en sus diferentes formas, la cual puede ser aprovechada en el proceso de regeneración eléctrica del vehículo.

Por otro lado, se pretende es implementar un sistema de generación termo eléctrico capaz de satisfacer 300 W de la potencia total requerida. El cual opere bajo los mismos principios de un RTG (“Radioisotope Thermoelectric Generator”), implementado en satélites y unidades espaciales. El sistema básicamente se compone de un conjunto de termocuplas, las cuales son capaces de transformar un diferencial térmico entre dos materiales en un voltaje.

Su funcionamiento esta descrito por el efecto Seebeck, el cual establece que al generarse una

fuerza electromotriz (“emf”), producto de la dilatación diferencial entre ambos materiales, manteniendo su unión física, se crea una corriente eléctrica.

Ilustración 7. Esquema de una termocupla.



Fuente: Dominio digital

http://pcbheaven.com/wikipages/How_Thermocouples_Work/

Por otro lado, para aprovechar la energía cinética que lleva el fluido a la salida del conjunto generador, se implementará un generador eólico o tercera etapa de turbina centrífuga, ubicada entre el intercambiador y la malla termo-eléctrica. Con base en el artículo “Teetering toward two-blade turbines”, publicado por Sergiy Kobka en línea para “Windpower”, se estableció una base de datos a través de la cual se podría definir una aproximación a la relación peso – potencia para este sistema de regeneración.

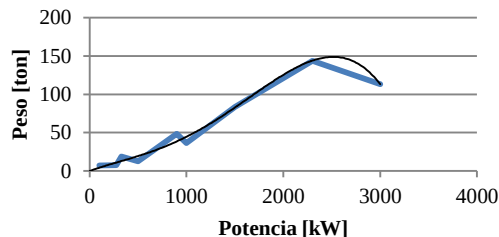
Tabla 5. Datos generales de diseño.

Relación P/W [kW / ton]	Potencia [kW]	Peso [ton]
14	100	7,1
35	275	7,9
17,5	330	18,9
39,5	500	12,7
24,5	660	26,9
18,5	900	48,6
27,5	1000	36,4
18	1500	83,3
16	2300	143,8
26,5	3000	113,2

Analizando los datos y extrapolando la información para encontrar la relación peso potencia de valores de potencia más pequeños se encontró la relación que se expone en la ilustración 8.

Con base en esa información y utilizando la ecuación que describe su comportamiento se establece lo siguiente: Si se busca satisfacer el 70% de los 700 W de potencia adicional requerida (500 W), se debe contar con 23 Kg extra al vehículo por el peso del generador eólico.

Ilustración 8. Relación P/W en generadores eólicos.



— Generadores eólicos — Grafica de tendencia

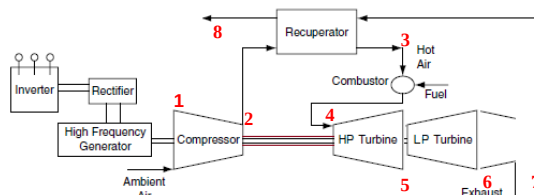
Con todo esto se logra reducir desde el 70% de energía no utilizada hasta entre un 42% y 21%. Al tiempo que se reduce la presión y se baja la temperatura reduciendo los niveles de ruido.

4. DISEÑO CONCEPTUAL DE LA MICRO TURBINA

DESARROLLO TERMODINÁMICO

Inicialmente, hay que tener claridad sobre la configuración básica del sistema, destacando cada uno de los componentes principales involucrados al interior del mismo.

Ilustración 9. Puntos de control dentro del conjunto generador.



El modelo de generación se conforma: dos etapas de turbina, las cuales suplen el trabajo demandado por el compresor y el trabajo entregado al generador eléctrico. Además, se de una tobera, la cual reducir las emisiones de ruido que el sistema puede generar.

Tabla 6. Datos generales de diseño.

$P_{max,req}$ [kW]	315	η_t	0,9	γ_{aire}	1,4
P_a [bar]	1	η_m / η_b	0,98	C_{pa} [kJ/kg°K]	1,005
T_a [°K]	297	η_j	0,95	γ_{gas}	1,333
PR	4	ΔP_b	2%	C_{pg} [kJ/kg°K]	1,148
TET [°K]	1220	ΔP_{ha}	3%	FCV [kJ/kg]	46300
η_c	0,92	ΔP_{hg} [bar]	0,03	eff	0.85

Todos los valores de eficiencias, así mismo como los valores de pérdidas de presión en la cámara de combustión e intercambiador y la efectividad, η , ΔP_b , ΔP_{ha} , ΔP_{hg} y eff respectivamente, fueron asignados según los valores típicos que estas variables tienen (tomados con base en el libro de Saravanamuttoo, “Gas Turbines Theory”).

Por otro lado, el valor de la temperatura atmosférica a la entrada de la micro turbina se definió igual a 297 °K y no 288.15 °K (temperatura recomendada como máxima a la entrada del compresor), ya que es la temperatura promedio en el territorio colombiano (país de diseño del vehículo). La relación de compresión (PR), se iguala a 4 pensando en implementar materiales de bajo costo como el aluminio, lo que termina por traducirse en una ventaja al reducir los costos de fabricación del vehículo. Finalmente, el valor calorífico del combustible (FCV), se obtiene de tablas, considerando que la micro turbina a de operar con GLP (Gas Licuado de Petróleo). Un combustible que es barato y de fácil acceso dentro del mercado colombiano.

El proceso de cálculo inicia calculando la presión en 2.

$$PR = \frac{P_{02}}{P_{01}}$$

Una vez calculada la presión en este punto, y utilizando la ecuación isentrópica del compresor se obtiene el valor de la temperatura en este punto.

$$T_{02} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + T_{01}$$

Saliendo del compresor, el flujo se direcciona hacia la sección de aire del intercambiador de calor, con lo que se busca aumentar la temperatura, reduciendo así el ΔT en la cámara de combustión y por consiguiente el consumo de combustible.

Para este punto (“3”), se sabe que las pérdidas de presión son del 3% CDP (“Compressor Delivered Pressure”). Por lo tanto la presión en 3 sería:

$$P_{03} = P_{02}(1 - \Delta P_{ha})$$

De igual forma, y considerando las pérdidas de presión se calcula la presión que se tiene, antes de entrar a las etapas de turbina (“4”). En este punto es prudente recordar que el trabajo entregado por la turbina de alta, es el que demanda el compresor,

mientras que la turbina libre es la que supe el movimiento al generador eléctrico.

$$W_{2-1} = W_{4-5}$$

Donde, el W_{2-1} es el trabajo del compresor y W_{4-5} el trabajo de HPT.

$$\frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{\eta_m} = C_{p,g} \Delta T_{4-5}$$

$$T_{05} = T_{04} - \left(\frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{C_{p,g} \eta_m} \right)$$

Al obtener T_{05} , se utiliza la ecuación isentrópica que describe el comportamiento de la turbina para encontrar el valor de la presión a la salida de la HPT.

$$T_{04} - T_{05} = \eta_t T_{04} \left[1 - \left(\frac{P_{05}}{P_{04}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

De forma similar son obtenidos los valores de presión y temperatura a la salida de LPT. Esto considerando que la eficiencia mecánica debe ser castigada adicionalmente con un 5% producto del proceso de transformación de la energía mecánica en eléctrica.

A pesar que la tobera no fue concebida con el fin de alterar las condiciones del flujo, hay que considerar la caída de presión y de temperatura que ahí se tiene para poder continuar definiendo estos parámetros a lo largo del sistema.

Para esta nueva etapa en el proceso de cálculo, en primera instancia hay que entrar a analizar si la tobera esta choqueada. Con esto se logra definir el modelo de operación bajo el cual se está operando.

$$\frac{P_{06}}{P_c} = 1.919 \quad \wedge \quad \frac{P_{06}}{P_a} = 1.123$$

$$\frac{P_{06}}{P_c} > \frac{P_{06}}{P_a}$$

Esta relación indica que la tobera no está choqueada, lo que implica que P_a es mayor que P_c . Sabiendo esto, se puede tener total certeza que la presión al salir del sistema generador será igual a la presión atmosférica, y al considerando las pérdidas de presión que se tienen en la sección de gas del intercambiador, se determina la presión después de salir de la tobera (“ P_{07} ”).

$$P_{08} = P_{07} - \Delta P_{hg}$$

Mientras que la temperatura se obtiene utilizando relaciones isentrópicas.

$$T_{06} - T_{07} = T_{06} \eta_j \left[1 - \left(\frac{P_{07}}{P_{06}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Retomando la definición de efectividad para el intercambiador se calcula la temperatura a la salida de este en la sección de aire.

$$T_{03} = eff(T_{07} - T_{08}) + T_{02}$$

Finalmente, para obtener la temperatura a la salida del sistema de generación, hay que definir primero los flujos másicos.

$$W_{nc} = \frac{C_{p,a} \Delta T_{2-1}}{0.95 \eta_m}$$

$$W_{nt} = C_{p,g} \Delta T_{4-6}$$

$$W_n = W_{nt} - W_{nc}$$

Sabiendo con antemano la potencia requerida, el flujo másico de gas estaría definido por:

$$P_{max,req} = W_n \dot{m}_{gas}$$

Además

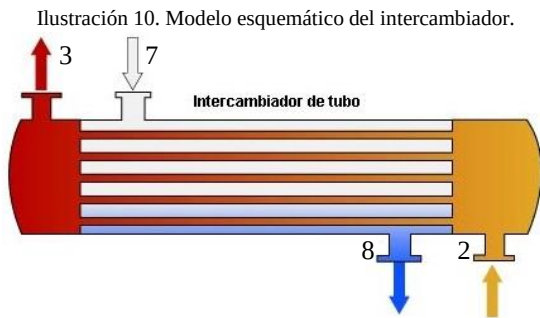
$$\dot{m}_{ff} = \frac{\dot{m}_a C_{p,g} \Delta T_{cc}}{FCV \eta_b} \quad \dot{m}_a = \dot{m}_g - \dot{m}_{ff}$$

Para construir el modelo de cálculo para el intercambiador, hay que considerar:

$$\Delta EVC = 0 \quad \Delta mVC = 0$$

$$W = 0 \quad \dot{m}_{dot} = cte$$

Para el siguiente volumen de control.



Fuente: Dominio digital

<http://www.fotosimágenes.org/imagenes/intercambiador-de-calor-5.jpg>

Ahora.

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \rightarrow \dot{m}_a(h_{02} - h_{03}) = \dot{m}_g(h_{08} - h_{07})$$

$$h_3 - h_2 = C_p(T_3 - T_1)$$

$$\dot{m}_a C_{pa}(T_{03} - T_{02}) = \dot{m}_g C_{pg}(T_{07} - T_{08})$$

Por último, y para facilitar la comprensión de los valores obtenidos por parte del lector, la siguiente tabla recopila todos los valores de presión y temperatura a lo largo del ciclo. De esta forma, se facilita en igual manera visualizar el correcto funcionamiento físico del diseño.

Tabla 7. Consolidado de las variables de presión y temperatura a lo largo del ciclo.

	a	1	2	3	4
P [bar]	1	1	4	3,88	3,802
T [°K]	297	297	453,892	842,087	1220
	5	6	7	8	
P [bar]	2,188	1,122	1,03	1	
T [°K]	1078,404	929,355	910,592	573,971	

DESARROLLO GEOMÉTRICO

Al partir de los parámetros totales, se calculó una densidad estimada del flujo al interior del conjunto generador, puntualmente en la etapa 6 (salida de la LPT). Esto con el fin de determinar el diámetro ideal y la velocidad del flujo, que se tiene en la turbina de potencia encargada de alimentar el generador eléctrico.

$$\rho = \frac{P_{06}}{RT_{06}}; R \text{ _ constante universal de los gases}$$

$$c = \sqrt{\gamma_g RT_{06}}$$

Con estos valores se definen los primeros parámetros geométricos.

Tabla 8. Parámetros iniciales de diseño geométrico.

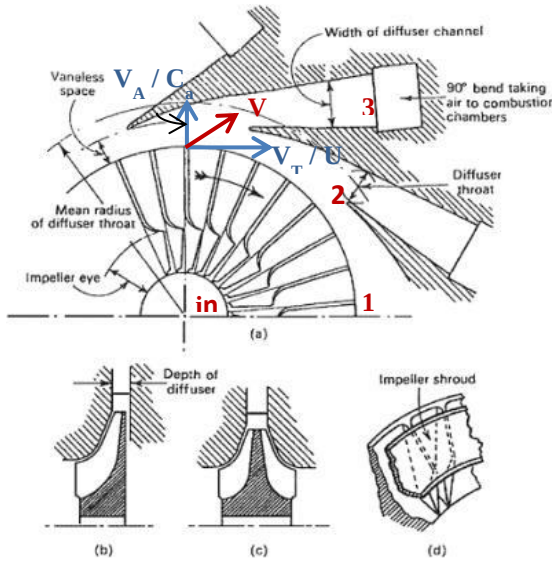
A [m²]	0,008
r [cm]	4,952
D [cm]	9,903

En este punto, se ha de considerar el diseño del compresor centrífugo, el cual está conformado principalmente por el impeler (aumenta la temperatura y cambia la dirección del flujo, realiza 100% del trabajo) y el difusor (realiza el 50% del aumento de presión).

Para este proceso de cálculo hay que considerar:

$$U = C_{w2} \quad C_a = C_{r2} \quad V_R = C_2$$

Ilustración 11. Componentes de un compresor centrífugo.



Fuente: Gas turbine Theory / HIH Saravanamuttoo, GFC Rogers & H Cohen / Chapter 4: Centrifugal compressors, page 153.

De la ilustración anterior se pueden distinguir tres etapas al interior del compresor; 1. Salida del impeler, 2. Entrada al difusor y 3. Salida del difusor. Además, se puede observar la definición que se le da a cada uno de los vectores de velocidad que se encuentran en el impeler. V_A o C_a es la velocidad radial, V_T o U velocidad tangencial y V es la resultante.

Se definen los siguientes datos para el proceso de cálculo, algunos de los cuales como el “power input factor” ($1.035 \leq \psi \leq 1.045$), revoluciones por segundo (N) y velocidad radial (C_{a1}), son asignados según los valores típicos para estas variables. Tanto para el diámetro en la punta como para el de la raíz, en el ojo del impeler, se asignaron valores porcentuales del diámetro total del impeler (60% y 30% del diámetro total del impeler respectivamente).

Tabla 9. Datos generales para el diseño del compresor.

ψ	1,04
N [Rev/s]	1310
C_{a1} [m/s]	150
Diámetro total del impeller [m]	0,099
Diámetro del ojo en la punta “Dp” [m]	0,0594

Diámetro del ojo en la raíz “Dr” [m]	0,0297
$T_{0,ent}$ [°K]	297
$P_{0,ent}$ [bar]	1
η_c	0,92
$\dot{m}_{aire}$ [kg/s]	1,9939
PR	4

Para iniciar con este proceso, se calcula la velocidad tangencial que tiene el flujo al interior del impeler (U).

$$U = \pi \phi_{im} N$$

$$U = 407.565 \text{ m/s}$$

Asociando el valor que tiene la velocidad tangencial con el PR, se ratifica la elección de una aleación de aluminio para la fabricación del impeler. Con las características que tiene este material, se garantiza que la integridad del componente se mantenga, ya que logra soportar relaciones de compresión 4:1 y velocidades tangenciales que rondan los 400 m/s.

Las posiciones “ent” y 3, para el diseño del compresor, son respectivamente las posiciones 1 y 2 en el ciclo general. Considerando esto se calculó el “slip factor” (σ), teniendo en cuenta que su valor debe estar alrededor de 0.9. Con el fin de obtener, el número de alabes (n) que se debe implementar para el impeler.

$$\sigma = \frac{C_p(T_{02} - T_{01})}{\psi U^2}$$

$$\sigma = 0.913$$

$$n = \frac{0.63\pi}{1 - \sigma}$$

$$n = 22$$

Por otro lado, se definió el área de entrada que tiene el flujo (A_{eye}), con base en los diámetros de la “raíz” y “punta” descritos en la [tabla 10](#).

$$A_{eye} = 0.002085 \text{ m}^2$$

Ahora, para poder calcular la componente radial de la velocidad (C_{a1}), se debe implementar un proceso iterativo el cual parte de una aproximación de la densidad.

$$\rho = \frac{P_{0,ent}}{RT_{0,ent}}$$

$$\rho = 1.173 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{a1}' = \sqrt{\gamma RT_{0,ent}}$$

$$C_{a1}' = 345.448 \text{ m/s}$$

$$\text{cabeza dinamica} \rightarrow \frac{C_{a1}'^2}{2C_p} \quad C_{a1}'^2/2C_p = 59.370$$

La cabeza dinámica, es utilizada para calcular el valor estático de temperatura en la entrada del impeler, mientras la presión se obtiene de relaciones isentrópicas. Finalmente se calcula un valor acertado de densidad, así mismo un valor más exacto de C_{a1} .

$$T_{0,ent} = T_{ent} + \frac{C_{a1}^2}{2C_p} \quad T_{ent} = 237.63 \text{ °K}$$

$$\left(\frac{T_{0,ent}}{T_{ent}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{P_{0,ent}}{P_{ent}} \quad P_{ent} = 0.458 \text{ bar}$$

Retomando las ecuaciones para el cálculo de la densidad.

$$\rho = 0.672 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{a1} = 308.998 \text{ m/s}$$

El proceso iterativo se repite hasta garantizar que el porcentaje de error de C_{a1} sea menor al 3%.

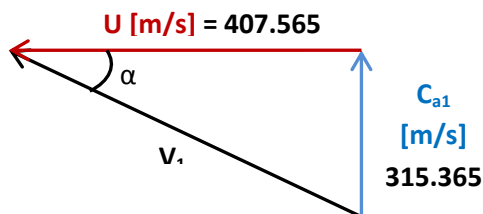
$$3\% > \frac{C_{a1} - C_{a1}'}{C_{a1}} * 100$$

Tabla 10. Valores obtenidos en el proceso iterativo para el cálculo de la velocidad radial.

C_{a1} [m/s]	$C_{a1}^2/2C_p$	T_{ent} [°K]	P_{ent} [bar]	ρ_1 [kg/m ³]	C_{a1} [m/s]	% error
309	47,50	249,5	0,54	0,76	316,62	2,41
316,62	49,88	247,13	0,53	0,74	315,11	-0,48
315,11	49,40	247,6	0,53	0,75	315,41	0,1
315,41	49,5	247,51	0,53	0,74	315,35	-0,02
315,35	49,48	247,52	0,53	0,74	315,37	0,004

Lo que finalmente nos deja como resultado el siguiente triángulo de velocidad a la entrada del impeler.

Ilustración 12. Triángulo de velocidades a la entrada del impeler.



En este punto hay que considerar, que la velocidad resultante (V_1) varia, ya que esta depende directamente del diámetro en el cual se calcule. Por esto, se debe definir su valor tanto para el “tip” como para el “root” en el ojo del impeler.

$$V_1 = \pi \phi N$$

$$\text{punta} = 244.539 \text{ m/s}$$

$$\text{raíz} = 122.27 \text{ m/s}$$

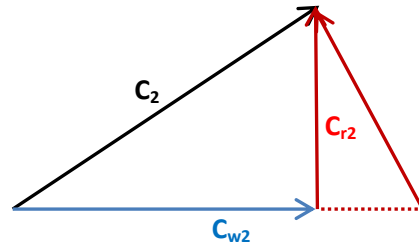
Para finalmente establecer los ángulos de entrada que tiene el flujo.

$$\alpha_{tip} = 52.209^\circ$$

$$\alpha_{root} = 68.808^\circ$$

Partiendo de la asunción que la velocidad radial C_{r2} (vel. a la salida del impeler), es igual a la velocidad radial que se tiene en la entra del impeler ($C_{a1} = 315.365 \text{ m/s}$), se entra a definir el triángulo de velocidades a la salida del impeler.

Ilustración13. Triángulo de velocidades a la salida del impeler.



Para este punto se deben definir las otras dos componentes del triángulo, para finalmente poder calcular el ángulo de salida que lleva el flujo.

$$C_{w2} = \sigma U$$

$$C_{w2} = 371.994 \text{ m/s}$$

Además, como se mencionó anteriormente, y a pesar que el 100% del trabajo se realiza en el impeler, hay que tener en cuenta que el flujo pasa a través del difusor también, lo que termina por ocasionar perdidas debido a la viscosidad que tiene el flujo y la capa limite que se crea a raíz de esto.

$$\%_{perdidas} \Rightarrow 0.5(1 - \eta_c)$$

$$\%_{perdidas} = 0.04$$

Ya conocido el porcentaje de perdidas, se calcula la η_{im} .

$$\eta_{im} = 1 - \%_{perdidas}$$

$$\eta_{im} = 0.96$$

Una vez calculada la eficiencia, se retoma la ecuación isentrópica que describe el comportamiento a través del compresor, cambiando

en este caso la eficiencia del compresor por la eficiencia del impeler para poder conocer el ΔP que sufre el flujo en el impeler.

$$\frac{P_{02}}{P_{0,in}} = \left[1 + \frac{\eta_{im}(T_{02} - T_{01})}{T_{01}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{P_{02}}{P_{0,in}} = 4.203 \text{ bar}$$

Ahora, la cabeza dinámica se puede redefinir como.

$$\frac{C_2^2}{2C_p} \Rightarrow \frac{C_{w2}^2 + C_{r2}^2}{2C_p}$$

$$\frac{C_2^2}{2C_p} = 118.326$$

Con base en el valor de la cabeza dinámica obtenido se calculan los valores estáticos de presión y temperatura para poder definir la densidad.

$$T_2 = T_{03} - \frac{C_2^2}{2C_p} \quad T_2 = 335.566 \text{ °K}$$

$$\frac{P_2}{P_{02}} = \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \frac{P_2}{P_{02}} = 0.348$$

$$\frac{P_2}{P_{0,ent}} = \frac{P_2}{P_{02}} \frac{P_{02}}{P_{0,ent}} \quad P_2 = 1.46 \text{ bar}$$

$$\rho = \frac{P_2}{RT_2} \quad \rho = 1.516 \text{ kg/m}^3$$

Para finalmente definir el área y la profundidad de los canales del difusor.

$$m = \rho A C_{r2} \quad A_{ch} = 0.004 \text{ m}^2$$

$$A = CDS \quad PC = 1.304 \text{ cm}$$

Donde S es el perímetro que tiene el impeler ($S = \pi \Phi_{im}$).

Siguiendo un proceso iterativo similar al implementado para encontrar la velocidad de entrada del flujo al impeler, se calcularán la velocidad radial y tangencial a la salida del mismo. Para iniciar, hay que considerar otras cuatro variables adicionales, cuyos valores son asignados según cantidades porcentuales del diámetro total del impeler o según valores estándar que estos toman.

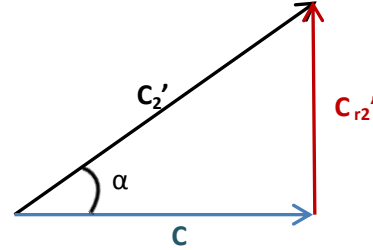
Tabla 11. Datos generales para el difusor.

Espacio sin alabes [m]	0,01
Radio medio de la garganta del difusor (RDT) [m]	0,0655

Profundidad de los canales de difusión [m]	0,017
# de canales del difusor	12

En este caso el espacio sin alabes se asume como el 20% del diámetro total del impeler. Mientras que el RDT es un 10% más grande que el radio total del impeler más el espacio sin alabes.

Ilustración 14. Triángulo de velocidades a la entrada del difusor.



Inicialmente, establecemos una relación entre las velocidades tangenciales y los radios a los cuales se encuentran.

$$\frac{C_{w2}'}{C_{w2}} = \frac{r_1}{RDT} \quad C_{w2}' = 309.49 \text{ m/s}$$

Al ver que la velocidad tangencial es menor a la que se consideró un principio, se puede suponer de igual forma que $Cr2' < Cr2$, y que tiene un valor aleatorio de 240 m/s, a partir del cual se comenzará a iterar para encontrar su valor verdadero.

Se tiene en un principio que el área del difusor se define como (DDP – “Depth of diffuser throat”).

$$A = 2\pi RDT DDP \quad A_{diff} = 0.0064 \text{ m}^2$$

Tabla 12. Proceso iterativo para el cálculo de $Cr2'$.

C_{r2} [m/s]	$C_2^2/2C_p$	T_2 [°K]	P_2/P_{02}
240	68,040	385,851	0,566
129,010	47,664	406,228	0,678
113,436	45,785	408,106	0,689
112,135	45,639	408,252	0,690
112,034	45,628	408,264	0,690

P_2 [bar]	ρ [kg/m³]	C_{r2} [m/s]	% error
2,380	2,150	129,010	46,246%
2,850	2,445	113,436	12,072%
2,897	2,473	112,135	1,147%
2,900	2,475	112,034	0,089%
2,901	2,475	112,027	0,007%

$$C_{r2} = 112.026 \text{ m/s}$$

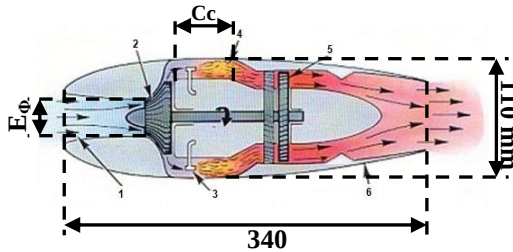
Por último se calcula el ángulo de entrada que tiene el flujo en el difusor, tomando como base la distribución mostrada en la ilustración 11. Así mismo, el área efectiva de este.

$$\tan(\alpha) = \frac{C_{r2'}}{C_{w2'}} \quad \alpha = 21.71^\circ$$

$$A_{eff} = A_{diff} \sin(\alpha) \quad A_{eff} = 0.002586 \text{ m}^2$$

Tras terminar con el diseño del compresor, es importante consolidar las dimensiones globales del conjunto generador, esto tomando como fuente de referencia la información general obtenida a lo largo de todo el proceso de cálculo desarrollado, además de las variables previamente expuestas.

Ilustración 15. Dimensiones generales de la generadora de gases.



Fuente: Dominio digital

http://www.daviddarling.info/encyclopedia/J/jet_engine.html

Tabla 13. Definición de variables.

Variable / Zona	[mm] / Nombre
1	Toma de aire
2	Compresor centrífugo
3	Inyectores – Generadores de vórtice
4	Cámara de combustión
5	Etapas de turbina
6	Tobera
E_ϕ	59.48
CC_L	85 / Largo de la cámara de combustión

Cabe destacar que las dimensiones finales que se obtuvieron para la generadora de gases, son de menor magnitud a las calculadas para el espacio destinado a albergar este sistema.

Tabla 14. Comparativo entre las variables geométricas.

	Espacio disponible	Dimensiones Turbina
	E_i [mm]	E_i [mm]
Largo	559,597	340
Ancho	493,883	110

DISTRIBUCION ELÉCTRICA

Una vez se definieron las características del sistema de generación, hay que aclarar ciertos puntos concernientes al sistema de distribución y almacenamiento de la energía eléctrica.

Tabla 15. Requerimientos eléctricos.

Sección de AC		Sección de DC	
Voltaje [V]	$P_{max, req(c/u)}$ [kW]	Voltaje [V]	Carga eléctrica [amp]
220	157.15	12	56

En la siguiente ilustración, se puede observar el diagrama básico de distribución energética que se tiene para el almacenamiento y generación eléctrica. Para considerar el diagrama completo, se debe tener en cuenta que se están implementando dos micro turbinas y dos motores/generadores para impulsar el vehículo, con lo cual se duplica casi en su totalidad el esquema anterior (a modo de espejo respecto al eje de la batería). Los únicos subsistemas que se tienen en común son el generador termoeléctrico y eólico.

Finalmente se ha de considerar la potencia que se tiene en la sección de DC y la corriente que circula en la sección de AC.

$$I = 714.31 \text{ amp}$$

$$P = 672 \text{ [W]}$$

Con base en el libro de Saravanamuttoo; “Gas Turbine Theory”, se define la relación de eficiencia general para el ciclo de generación, la cual toma como base el consumo específico de combustible (SFC) y el poder calorífico (FCV) que este tiene.

$$\eta = \frac{3600}{SFC * FCV}$$

Donde FCV es una propiedad del combustible la cual se obtiene de tablas de caracterización. Mientras que el SFC se calcula con base en la relación aire combustible.

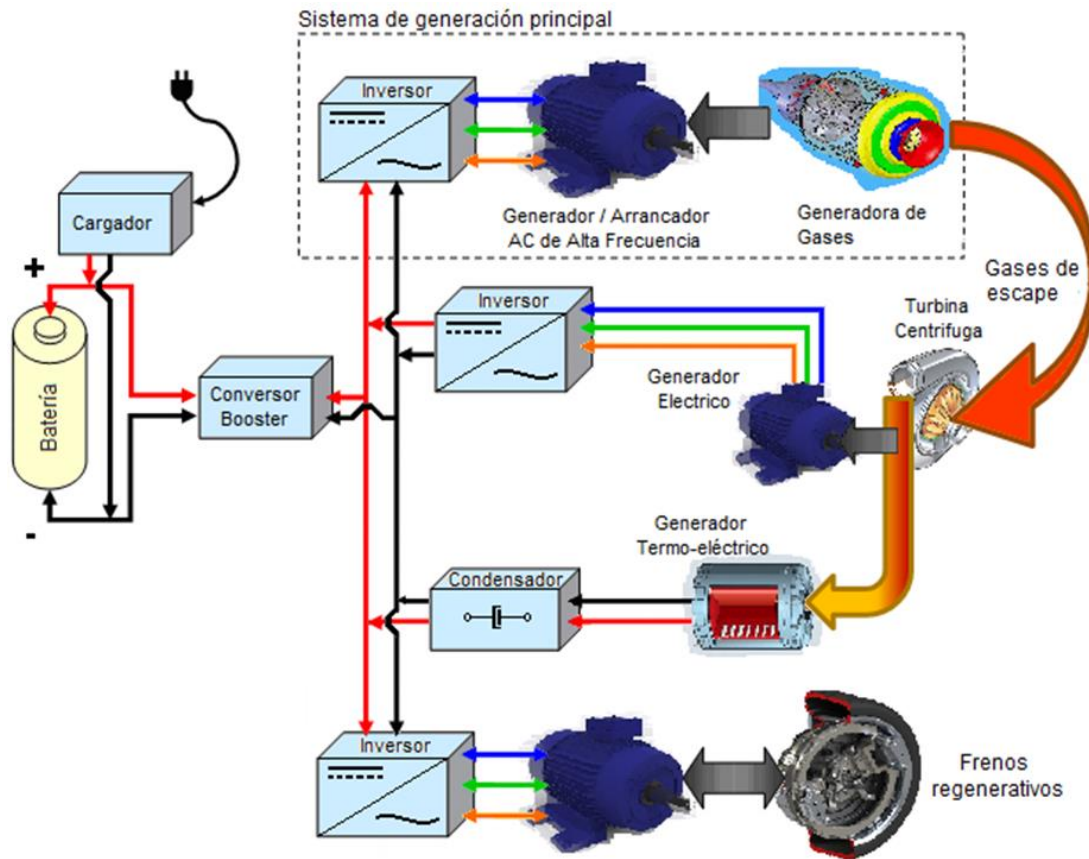
$$SFC = \frac{f_{act} * 3600}{W_n}$$

Para conocer “ f_{act} ” (relación aire / combustible) se utiliza la gráfica de ΔT_{cc} vs. Relación combustible / aire. Para esto se debe conocer ΔT_{cc} y la temperatura de entrada a la cámara de combustión. Con estas variables se obtiene un f_{act} teórico igual a 0.0095.

$$\eta_b = \frac{f_{teo}}{f_{act}} \quad f_{act} = \frac{f_{teo}}{\eta_b} = \frac{0.0095}{0.98}$$

$$\text{fact} = 0.00969$$

Ilustración 16. Esquema eléctrico de generación y almacenamiento.



Adicionalmente el W_n se obtiene de la diferencia entre el trabajo neto de las etapas de turbina menos el trabajo neto consumido por el compresor y el generador.

$$W_{nt} = C_{pg} \Delta T_{4-6} \quad W_{nc} = \frac{C_p \Delta T_{2-1}}{\eta_m * 0.95}$$

$$W_{nt} = 1.148 * (1220 - 932.321)$$

$$W_{nc} = \frac{1.005 * (453.892 - 297)}{0.98 * 0.95}$$

$$W_{nt} = 330.256 \text{ [kJ/Kg]} \quad W_{nc} = 169.362 \text{ [kJ/Kg]}$$

$$W_n = 160.894 \text{ [kJ/Kg]}$$

Finalmente

$$\text{SFC} = 0.2169 \text{ [kJ/Kg]}$$

$$\eta = 35.848\%$$

CONCLUSIONES

Para iniciar con las conclusiones vale la pena exponer las ventajas y desventajas que se tienen.

Ventajas

- Se reducen los porcentajes de emisiones contaminantes.
- Se implementa un sistema con menos componentes móviles.
- Requiere menos gastos de mantenimiento.
- Es un sistema más confiable y consistente en el tiempo.
- Entrega una eficiencia energética significativamente mayor.
- Físicamente, es un sistema más compacto y liviano.

- No requiere de sistemas adicionales de refrigeración.
- Promueve el desarrollo del conocimiento, al rediseñar un producto cotidiano.
- Incrementa la autonomía del vehículo.
- Se prolonga el tiempo de vida útil de los pozos petroleros.

Desventajas

- Proceso de manufactura más complejo.
- Costo de adquisición más elevado.
- Altas emisiones de ruido.
- Mano de obra más calificada para realizar procesos de mantenimiento.
- Su desarrollo está asociado a un mercado emergente.
- Mitiga pero no desaparece la emisión de gases de efecto invernadero.

A raíz de esto se puede establecer el estudio de mercado a través del cual se defina la viabilidad del proyecto. Dicho estudio debe estar sustentando en tres etapas:

1. Características del producto.
2. Mercado potencial; oferta y demanda.
3. Canales de distribución.

De una forma progresiva, y tras implementar tecnologías mixtas que permitan la interacción entre los sistemas de locomoción existentes y las nuevas tecnologías emergentes, se puede lograr derrumbar el monopolio comercial que tienen las compañías petroleras dentro del sector automotriz.

Al tomar como punto de partida el rediseño o la mejora de un producto, es ideal establecer inicialmente los factores que se tienen a favor, ya probados y 100% funcionales. Dichas características han de constituir en gran medida los parámetros de diseño, con base en los cuales se deben acoplar los futuros desarrollos.

Técnicamente se puede observar que los valores de presión y temperatura que se tienen a lo largo del ciclo de generación oscilan alrededor de valores lógicos para un componente de estas características, además de estar dentro de un rango aceptable por

los componentes normalmente utilizados en la fabricación de este sistema.

	Rango típico	Eficiencia [%]
Micro turbinas (Teórico)	25 – 300 kW	28 - 33
Micro turbinas (Experimental)	315 kW	36 %

Los valores obtenidos tanto para la potencia como para la eficiencia del ciclo, muestran que se conserva la proporcionalidad, ambos son ligeramente mayores lo cual se debe a las idealizaciones asumidas a lo largo del proceso de cálculo. Sin embargo se puede asegurar que se encuentran definidos dentro de los rangos establecidos.

REFERENCIAS

Publicaciones digitales

SOARES, Claire. Microturbinas

Sistema de bibliotecas Universidad Pontificia Bolivariana.
Manual de Proyectos de Grado de la Escuela de ingenierías de la UPB

Universidad Autónoma de Juárez. Lineamientos para la elaboración de proyectos de investigación.

UAN. Formato anteproyecto

ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas NTC 1486, 5613 y 4490.

FUNDASOL. Guía de Formulación de Proyectos.

HURST, Dave. Electric Vehicle Market Forecasts / Global Forecasts for Light Duty Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles: 2013 – 2020. Published 2Q 2013

Cibergrafía

Colaboradores de Wikipedia. “Alternative fuel vehicle” [en línea]. Wikipedia, enciclopedia libre [citado el 14/01/2014 a las 10:34 am]. Dominio:

http://en.wikipedia.org/wiki/Alternative_fuel_vehicle.

Colaboradores de Wikipedia. Energía renovable [en línea]. Wikipedia, enciclopedia libre [citado el 14/01/2014 a las 11:38 am]. Dominio:

http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable.

VIA Motors. “Inside the Extended-Range Electric Truck” [en línea]. “Electric vehicle manufacturer” [citado el 18/01/2014 a las 12:20 pm]. Dominio:

<http://www.viamotors.com/powertrain/>.

Universidad Nacional de Colombia. Estadística descriptiva [en línea]. Probabilidad y Estadística [citado el 30/01/2014 a las 4:14 pm]. Dominio: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/html/un1/cont_126_26.html.

Christine & Scott Gable. "How Electric Motors and Generators Work" [en línea]. About.com [citado el 07/03/2014 a las 10:23 am]. Dominio: <http://alternativefuels.about.com/od/hybridvehicles/a/motorgenerator.htm>.

Christine & Scott Gable. "How Does Regenerative Braking Work" [en línea]. About.com [citado el 07/03/2014 a las 10:38 am]. Dominio: <http://alternativefuels.about.com/od/hybridvehicles/a/regenbraking.htm>. Colaboradores de BIOMASS Energy Centre. "Typical calorific values of fuel" [en línea]. biomassenergycentre.org.uk [citado el 07/03/2014 a las 5:16 pm]. Dominio: http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page?_pageid=75,20041&_dad=portal&_schema=PORTAL.

Colaboradores de Colombia Travel. Tabla de clima por ciudades [en línea]. Colombia.com [citado el 07/04/2014 a las 9:58 pm]. Dominio: https://www.colombia.com/travel/es/guia_viajero/tabla_clima.asp.

Colaboradores de "how stuff Works". "Thermocouple" [en línea]. science.howstuffworks.com [citado el 18/04/2014 a las 5:14 pm]. Dominio: <http://science.howstuffworks.com/thermocouple-info.htm>.

Editores de la enciclopedia británica. "Seebeck effect" [en línea]. global.britannica.com [citado el 18/04/2014 a las 5:19 pm]. Dominio:

<http://global.britannica.com/EBchecked/topic/532358/Seebeck-effect>.

Colaboradores de "Thermometrics". "Thermocouple Type K" [en línea]. thermometricscorp.com [citado el 18/04/2014 a las 6:15 pm]. Dominio: <http://www.thermometricscorp.com/thertypk.html>.

Colaboradores de "Energy". "How do wind turbines work" [en línea]. energy.gov [citado el 18/04/2014 a las 6:37 pm]. Dominio: <http://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>.

Colaboradores de la misión interestelar Voyager. "Radioisotope Thermoelectric Generators" [en línea]. [Voyager.jpl.nasa.gov](http://voyager.jpl.nasa.gov) [citado el 19/04/2014 a las 4:02 pm]. Dominio: http://voyager.jpl.nasa.gov/spacecraft/instruments_rtg.html.

Colaboradores de Edison Tech Center. "Electric Cars and History" [en línea]. edisontechcenter.org [citado el 26/04/2014 a las 4:13 pm]. Dominio: <http://www.edisontechcenter.org/ElectricCars.html#timeline>.

Bibliografía

SARAVANAMUTTO, HIH / ROGERS, GFC / COHEN. Gas turbine Theory

CENGEL / BOLES. Termodinámica

Otros

Canal de youtube: Capstone Turbine.

Dominio: <http://www.youtube.com/channel/UCOAhv5yykmuwy-TTJ6gL8iw>. Consultada 15/11/2013 a las 6:37 pm.

Canal de youtube: "GreenMotorUK's channel"

Dominio: <http://www.youtube.com/watch?v=80E1fOp95rA>. Consultada 17/11/2013 a las 8:58 pm.

ANEXO 2

EFFECTOS TERMO – ELECTRICOS

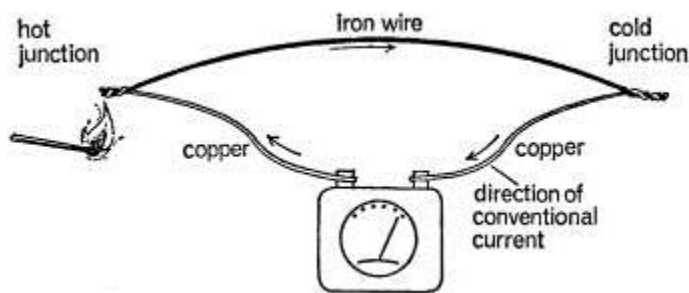
A continuación se expone la idea principal sobre los tres efectos que describen el fenómeno de la generación termo – eléctrica, mencionados previamente en el desarrollo del artículo. Con base en ellos es que se formulan modelos teóricos de reutilización y aprovechamiento de la energía térmica emitida como subproducto del proceso de combustión:

- Efecto Seebeck.

Descubierto por el físico Alemán Thomas J. Seebeck a finales de 1820. Este describe la producción de energía eléctrica a partir de una fuente de calor.

Este fenómeno se da al unir dos materiales conductores o semiconductores con diferentes coeficientes térmicos, y exponerlos a una fuente de calor. La diferencia en el coeficiente térmico crea una diferencia de temperatura entre ambos conductores al tiempo que promueve una polarización entre los extremos calientes y fríos, ya que los electrones de valencia en la parte caliente tienden a fluir hacia la parte fría como resultado de la energía térmica absorbida. Todo esto en última instancia, genera una diferencia de potencial entre los dos extremos de ambos conductores (Ver ilustración 1).

Ilustración 1. Explicación grafica de la creación de corriente por efecto Seebeck.



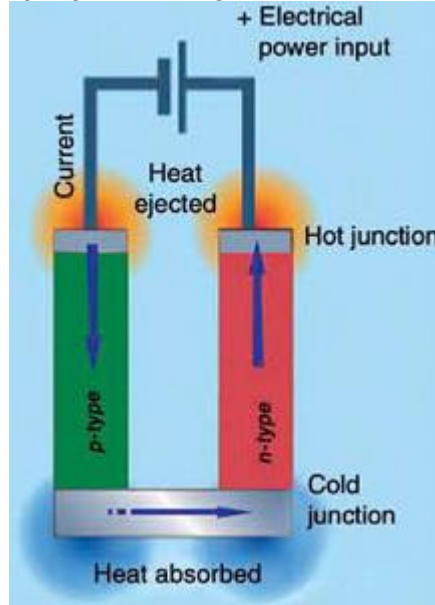
Fuente: <http://www.bookbootusers.co.uk/thermo2.htm>

- Efecto Peltier.
Descubierto años después del efecto Seebeck por el físico Francés Jean C. A. Peltier en 1830.

Se puede considerarse como el modelo inverso al expuesto por Thomas J. Seebeck. En este caso se dice que se puede crear un diferencial de calor entre los extremos de dos materiales conductores, el cual es proporcional a la corriente que se haga circular entre ellos.

La fuente térmica (Ver ilustración 2) se crea al excitar los electrones presentes en los materiales, los cuales tienden a fluir de un conductor a otro como resultado de la energía extra que se le esta adicionando al sistema. Para finalmente terminan por disipar el exceso de energía almacenada en forma de calor.

Ilustración 2. Ejemplificación grafica del efecto Peltier.



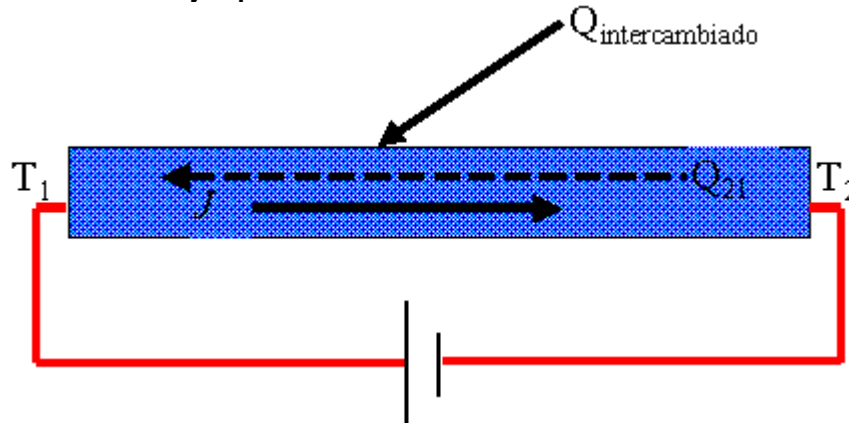
Fuente: <http://staging.embedded.com/design/real-world-applications/4007088/Using-new-thin-film-techniques-to-manage-thermal-and-energy-problems-in-embedded-designs>

- Efecto Thomson.

Descubierto en 1851 por William Thomson. Toma como modelo base lo expuesto en la teoría del efecto Peltier, con la única variación que en este caso las juntas calientes y frías no existen, ya que este fenómeno se da sobre un mismo conductor homogéneo.

En este caso al momento de circular la corriente el sistema presenta una diferencia térmica, la cual continua acentuándose según la configuración o dirección que se le dé al flujo de la corriente, se libera calor cuando la corriente fluye del extremo más caliente hacia el más frío y absorbe si la corriente circula en sentido contrario.

Ilustración 3. Ejemplificación básica del fenómeno Thomson.



Fuente: [http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE\(c\).htm#t](http://www.unavarra.es/ets02/Introduccion%20a%20TE(c).htm#t)

ANEXO 3

ECUACIONES IMPLEMENTADAS A TRAVES DEL PROCESO DE CÁLCULO

A continuación se enuncian todas las ecuaciones utilizadas a lo largo del proceso de cálculo y análisis desarrollado para el proyecto, en el respectivo orden a como fueron implementadas.

CALCULO GENERAL DEL CICLO

Etapas de compresor

$$T_{02} - T_{01} = \frac{T_{01}}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

Etapas de turbina

$$T_{04} - T_{05} = T_{04} \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_{05}}{P_{04}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Trabajo neto del sistema (potencia)

$$W_n = w_{nt} - w_{nc}$$

$$w_{nc} = \frac{C_p \Delta T}{\eta_m}$$

$$w_{nt} = C_p \Delta T$$

Eficiencia

$$\eta = \frac{C_p(T_4 - T_6) - C_p(T_2 - T_1)}{C_p(T_4 - T_3)}$$

$$\eta_b = \frac{f_{teo}}{f_{act}}$$

Efectividad del intercambiador

$$eff = \frac{T_{03} - T_{02}}{T_{07} - T_{02}}$$

$$\eta = \frac{3600}{SFC FCV}$$

$$SFC = \frac{f_{act} * 3600}{W_n}$$

Densidad (aprox)

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

Velocidad

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

Área

$$A = \frac{\dot{m}_{gas}}{\rho c}$$

Trabajo del sistema

$$\frac{W_c}{\eta_m} = W_t$$

$$\frac{\dot{m}_{air} C_{p,a} \Delta T_{1-2}}{\eta_m} = \dot{m}_{gas} C_{p,g} \Delta T_{4-5}$$

Flujo másico de combustible

$$\dot{m}_{ff} = \frac{\dot{m}_a C_{p,g} \Delta T_{cc}}{FCV \eta_b}$$

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_{ff}$$

Relaciones para toberas

$$\frac{P_{06}}{P_c} \cong 1,914$$

$$T_{06} - T_{07} = T_{06} \eta_j \left[1 - \left(\frac{P_{07}}{P_{06}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]$$

Intercambiador de calor

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt} = 0$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{m}_a(h_1 - h_2) = \dot{m}_g(h_4 - h_3)$$

$$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$$

$$\dot{m}_a C_{pa}(T_2 - T_1) = \dot{m}_g C_{pg}(T_3 - T_4)$$

DISEÑO DEL COMPRESOR

“Slip factor”

$$\sigma = 1 - \frac{0,63\pi}{n} u$$

Trabajo realizado

$$w_{done} = \sigma U^2$$

Parámetros totales

$$T_1 = T_{01} - \frac{C_{a1}^2}{2C_p}$$

“Power input factor”

$$w_{done} = \psi \sigma U^2$$

$$T_{03} - T_{01} = \frac{\psi \sigma U^2}{C_p}$$

$$\frac{P_{03}}{P_{01}} = \left[1 + \frac{n_c \psi \sigma U^2}{C_p T_{01}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Relaciones isentrópicas

$$\left(\frac{T_{01}}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \frac{P_{01}}{P_1}$$

Ecuaciones para el impeller

$$C_{w2} = \sigma U$$

$$\eta_{im} = 1 - 0,5(1 - \eta_c)$$

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[1 + \frac{\eta_{im} \Delta T}{T_{01}} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{P_2}{P_{01}} = \frac{P_2}{P_{02}} * \frac{P_{02}}{P_{01}}$$

$$C_{a1} = \frac{\dot{m}}{\rho A_{eye}}$$

$$A_{eye} = \frac{\pi(Et^2 - Er^2)}{4}$$

Variables para el difusor

$$C_{w2'} = C_{w1'} \left(\frac{r_1'}{r_2'} \right)$$

$$T_2' = T_{02} - \frac{C_2'^2}{2C_p}$$

$$A_{eff} = A \sin \alpha$$

Profundidad del canal

$$A = CDS$$

ANEXO 4

GRAFICA DE RELACION ENTRE EL INCREMENTO DE TEMPERATURA EN LA CAMARA DE COMBUSTION VS LA RELACION COMBUSTIBLE AIRE

A continuación se ilustra la gráfica con base en la cual se obtuvo el valor teórico de la relación combustible aire para el cálculo del SFC en la sección de conclusiones (Fuente: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a801212.pdf>).

