



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA  
OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS**

**David Emilio Sagastume Alvarado**

Asesorado por el Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, septiembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA  
OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**DAVID EMILIO SAGASTUME ALVARADO**

ASESORADO POR EL ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIO	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez (a.i.)

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
SECRETARIO	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez (a.i.)

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA  
OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 28 de marzo de 2016.

  
**David Emilio Sagastume Alvarado**

Guatemala 18 de Julio de 2016

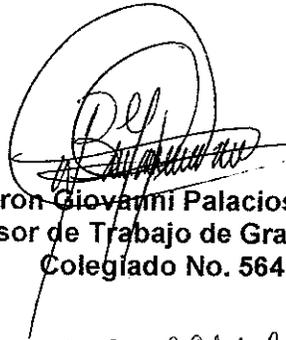
Ing. Roberto Guzmán Ortíz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Roberto Guzmán

Por este medio informo que ha finalizado la etapa de asesoría del trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS** realizado por el estudiante **David Emilio Sagastume Alvarado**, carné No. **2011-22874** considerando que cumple con el contenido y objetivos propuestos en el protocolo aprobado por la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Atentamente

*Id y Enseñad a Todos*



**Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres**  
**Asesor de Trabajo de Graduación**  
**Colegiado No. 5641**

*Ing. Byron G. Palacios C.*  
Colegiado No. 5641



# USAC

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.197.2016

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS** desarrollado por el estudiante **David Emilio Sagastume Alvarado, carné 2011-22874** recomienda su aprobación.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Coordinador Área Térmica  
Escuela de Ingeniería Mecánica



MA Ing. Julio César Campos Paiz  
Ingeniero Mecánico  
Colegiado No. 2701

Guatemala, julio 2016

Ref.E.I.M.262.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Térmica del trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS** del estudiante **David Emilio Sagastume Alvarado**, carné No. **201122874** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, septiembre de 2016  
/aej

Universidad de San Carlos  
de Guatemala

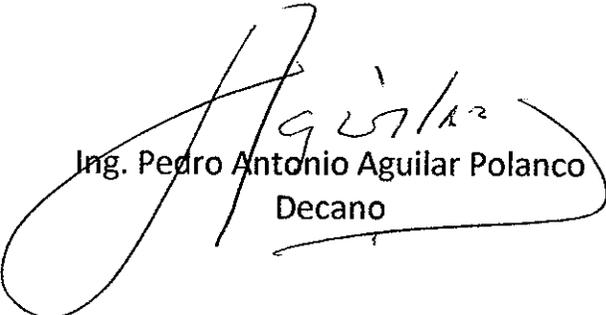


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 421.2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA RIUS**, presentado por el estudiante universitario: **David Emilio Sagastume Alvarado**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, septiembre de 2016

/gdech



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **COMPARACIÓN TERMODINÁMICA ENTRE LOS CICLOS DE POTENCIA OTTO, EN UN TOYOTA YARIS, Y ATKINSON, EN UN TOYOTA PRIUS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 28 de marzo de 2016.

**David Emilio Sagastume Alvarado**

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser mi guía, fuerza e inspiración para seguir adelante a pesar de las circunstancias.
- Mis padres** Hernán Sagastume y Manola de Sagastume, por haberme dado la vida, primeramente, y apoyado durante todo mi trayecto estudiantil y ser ejemplo de vida.
- Mis hermanas** Diana y Alejandra Sagastume, por abrir la brecha y demostrarme que ser profesional no es una utopía.
- Mis abuelas** Delia Sagastume y Álida de Velarde (q. e. p. d.), por darme un ejemplo de lucha, valentía, unidad y amor ante cualquier situación de la vida
- Mis amigos** Emilio Franco, Alan Juárez, Rony Hernández, Esvin Oxlaj, Karina López, Jussela Aquino, María Fernanda Urzúa, Giancarlo Pérez, Rafael Álvarez, Joselyn Payés, Ana Lucía Bolaños y Karla Sagastume, por acompañarme durante esta travesía y haberme dado aliento cuando lo necesité.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por haberme abierto sus puertas y alimentarme de conocimientos por todos estos años y permitirme convertirme en un profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por haber sellado mi vida con una nueva mentalidad y una forma de pensar distinta, alentándome a hacer algo por mi país.
<b>Mis catedráticos</b>	Que han llenado mi vida de conocimientos y formado en varios aspectos de mi vida quien soy hoy, a su manera, dejando una huella llamada el saber.
<b>Mi asesor de tesis</b>	Por haber aceptado este reto y apoyado en las distintas incógnitas y obstáculos que se fueron presentando en el camino.
<b>Gentrac</b>	Por haberme dado la oportunidad de realizar mis prácticas finales y de la mano de Andrés Monzón, quien me brindó su apoyo desde un principio.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Vehículos híbridos .....	1
1.2. Evolución de los automóviles híbridos en la historia .....	2
1.3. Utilización de la tecnología híbrida en la actualidad .....	7
1.4. Contaminación ambiental .....	10
1.4.1. Emisiones .....	10
1.4.1.1. Emisiones evaporativas.....	11
1.4.1.2. Emisiones por tubo de escape.....	12
1.4.2. Legislación de la contaminación del aire .....	14
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Ciclo Otto.....	17
2.1.1. Deducción de ecuaciones.....	19
2.1.1.1. Intercambio de calor .....	19
2.1.1.2. Trabajo realizado .....	20
2.1.1.3. Rendimiento.....	22
2.1.2. Relación de compresión (RC).....	22
2.1.3. Presión media efectiva (PME) .....	23

2.2.	Ciclo Atkinson .....	25
2.2.1.	Deducción de ecuaciones .....	29
2.2.2.	Ecuación de eficiencia.....	30
2.2.3.	Efectos del aumento de la relación de compresión.....	30
2.3.	Automóviles híbridos .....	32
2.3.1.	Tipos de motores híbridos .....	32
2.3.1.1.	Sistema híbrido en paralelo.....	33
2.3.1.2.	Sistema híbrido en serie.....	34
2.3.2.	Automóvil híbrido Toyota y sus componentes principales .....	35
2.3.2.1.	Motor de combustión Atkinson .....	37
2.3.2.2.	Motor eléctrico.....	38
2.3.2.3.	Generador eléctrico.....	39
2.3.2.4.	Transmisión.....	40
2.3.2.5.	Batería recargable.....	42
2.3.2.6.	Método de eliminación de los gases NOx .....	43
2.4.	Medidores de temperatura infrarrojos .....	45
2.4.1.	Funcionamiento.....	45
2.4.2.	Aplicaciones .....	47
3.	COMPARACIÓN TÉRMICA DE CICLOS ATKINSON Y OTTO .....	49
3.1.	Toyota Yaris (ciclo Otto).....	49
3.1.1.	Datos necesarios.....	49
3.1.2.	Cálculos.....	52
3.1.2.1.	Punto de compresión .....	53
3.1.2.2.	Punto de ignición.....	54
3.1.2.3.	Punto de escape .....	55

	3.1.2.4.	Punto de trabajo .....	56
	3.1.2.5.	Resumen de puntos de ciclo Otto .....	58
	3.1.2.6.	Calor de salida .....	58
	3.1.2.7.	Calor de entrada .....	59
	3.1.2.8.	Trabajo neto.....	59
	3.1.2.9.	Eficiencia térmica.....	59
	3.1.2.10.	Presión media efectiva .....	60
	3.1.2.11.	Resumen de ciclo Otto .....	61
3.2.		Toyota Prius (ciclo Atkinson) .....	62
	3.2.1.	Datos necesarios .....	62
	3.2.2.	Cálculos.....	62
		3.2.2.1. Punto de admisión .....	63
		3.2.2.2. Punto de ignición a volumen constante .....	64
		3.2.2.3. Punto de escape.....	65
		3.2.2.4. Punto de trabajo .....	66
		3.2.2.5. Punto de ignición a presión constante .....	67
		3.2.2.6. Resumen de puntos del Toyota Prius (ciclo Atkinson) .....	68
		3.2.2.7. Calor de salida.....	69
		3.2.2.8. Calor de entrada .....	69
		3.2.2.9. Trabajo neto.....	69
		3.2.2.10. Eficiencia térmica.....	70
		3.2.2.11. Presión media efectiva .....	70
		3.2.2.12. Resumen de datos del Toyota Prius (ciclo Atkinson) .....	71
3.3.		Comparación de datos.....	71
	3.3.1.	Comparación punto por punto .....	72

3.3.1.1.	Temperatura.....	72
3.3.1.2.	Energía interna.....	73
3.3.1.3.	Volumen específico relativo.....	74
3.3.2.	Comparación general .....	75
4.	OBSERVACIONES.....	77
4.1.	Temperaturas.....	77
4.2.	Energía interna.....	78
4.3.	Volumen específico relativo .....	79
4.4.	Calor de entrada, calor de salida y trabajo neto .....	81
4.5.	Eficiencia térmica .....	82
4.6.	Presión media efectiva (PME).....	84
4.7.	Potencia y torque .....	84
4.8.	Consumo de combustible.....	85
	CONCLUSIONES.....	87
	RECOMENDACIONES .....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	APÉNDICES.....	95
	ANEXOS.....	97

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	XP512, primer automóvil híbrido .....	3
2.	Buick Skylark híbrido .....	4
3.	Audi Duo .....	5
4.	Honda Civic Hybrid.....	6
5.	Mclaren P1 2015 .....	8
6.	Koenigsegg Regera.....	9
7.	Tipos de emisiones .....	11
8.	Diagrama ciclo Otto.....	18
9.	Ciclo Atkinson .....	27
10.	Diagrama de un ciclo Atkinson truncado .....	28
11.	Sistema híbrido en paralelo.....	33
12.	Sistema híbrido en serie.....	34
13.	Motor Toyota híbrido .....	37
14.	Motor eléctrico de corriente continua .....	38
15.	Motor Toyota Prius.....	40
16.	Engranaje planetario .....	41
17.	Batería recargable.....	42
18.	Funcionamiento EGR.....	44
19.	Espectro electromagnético.....	46
20.	Datos de temperatura 13 de marzo de 2016.....	50
21.	Diagrama del ciclo Otto .....	51
22.	Diagrama del ciclo Atkinson .....	63
23.	Comparación de temperaturas.....	73

24.	Comparación de energía interna.....	74
25.	Comparación de volumen específico relativo .....	75

## TABLAS

I.	Datos fichas técnicas.....	52
II.	Datos de interpolación punto 1 ciclo Otto .....	53
III.	Datos de interpolación punto 2 ciclo Otto .....	55
IV.	Datos de interpolación punto 4 ciclo Otto .....	56
V.	Datos de interpolación punto 3 ciclo Otto .....	57
VI.	Resumen de puntos del ciclo Otto .....	58
VII.	Resumen datos Toyota Yaris.....	61
VIII.	Datos de interpolación punto 2 ciclo Atkinson .....	64
IX.	Datos de interpolación punto 4 ciclo Atkinson .....	65
X.	Datos de interpolación punto 3 ciclo Atkinson .....	66
XI.	Datos de interpolación punto “x” ciclo Atkinson .....	68
XII.	Resumen de puntos Prius (ciclo Atkinson) .....	68
XIII.	Resumen datos Toyota Prius.....	71
XIV.	Comparación de temperaturas .....	72
XV.	Comparación de energía interna.....	73
XVI.	Comparación de volumen específico relativo .....	74
XVII.	Tabla resumen de comparación Yaris – Prius .....	76
XVIII.	Diferencia de temperaturas entre ciclos.....	78
XIX.	Diferencia de energía interna entre ciclos.....	79
XX.	Diferencia de volumen específico relativo entre ciclos.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Ah	Amperio-hora
NO <sub>2</sub>	Bióxidos de nitrógeno
Q	Calor
C <sub>v</sub>	Cantidad de calor necesaria para aumentar 1° la temperatura a volumen constante.
cc	Centímetros cúbicos
COV	Compuestos orgánicos volátiles
R	Constante de los gases ideales
CC/CD	Corriente directa
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
$\eta$	Eficiencia térmica
U	Energía interna
°C	Grados centígrados
K	Grados Kelvin
HC	Hidrocarburos
HP/CV	<i>Horse power</i> o caballos de fuerza
kg	Kilogramo

<b>kJ/kg</b>	Kilojoule por kilogramo
<b>km/gal</b>	Kilómetro por galón
<b>Km/hr</b>	Kilómetros por hora
<b>L/100km</b>	Litros por cada cien kilómetros
<b>Pa</b>	Medición de presión en “Pascal”
<b>CH4</b>	Metano
<b>mmHg</b>	Milímetros de mercurio
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>NO</b>	Monóxidos de nitrógeno
<b>N</b>	Newton-metro
<b>N2O</b>	Óxido nitroso
<b>NOx</b>	Óxidos de nitrógeno
<b>HPI</b>	Potencia indicada
<b>P</b>	Presión
<b>PME</b>	Presión media efectiva
<b>RC</b>	Relación de compresión
<b>r</b>	Relación de corte
<b>T</b>	Temperatura
<b>Tsp</b>	Temperatura de salida Prius
<b>Tsy</b>	Temperatura de salida Yaris
<b>W</b>	Trabajo
<b>V</b>	Voltios

<b>v</b>	Volumen relativo
<b>Vr</b>	Volumen relativo específico



## GLOSARIO

<b>Conama</b>	Comisión Nacional del Medio Ambiente.
<b>Caballos de fuerza</b>	Medición de la potencia de una máquina basada en la potencia de los caballos de tiro.
<b>DOHC</b>	Del inglés <i>double overhead camshaft</i> , significando doble árbol de levas en culata.
<b>MARN</b>	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
<b>MCI</b>	Motor de combustión interna, máquina que utiliza la volatilidad de un combustible para generar trabajo.
<b>Insivumeh</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.
<b>P-V</b>	Diagrama presión <i>versus</i> volumen.
<b>PM</b>	Partículas producto del proceso de combustión.
<b>PMI</b>	Punto muerto inferior, posición más baja de un pistón de un motor de combustión interna.
<b>PMS</b>	Punto muerto superior, posición más alta de un motor de combustión interna.

<b>Potencia</b>	Medición de la velocidad con la que se ejerce un trabajo; medida del trabajo por unidad de tiempo.
<b>Potencia indicada</b>	Potencia realmente desarrollada en el interior del cilindro por el proceso de combustión.
<b>Relación de corte</b>	Comportamiento que tiene el volumen en un punto con respecto a otro a presión constante.
<b>TDI</b>	<i>Turbo diesel injection</i> , sistema de inyección utilizado en los motores turbo diésel Volkswagen.
<b>Torque</b>	Medición de la fuerza giratoria que se ejerce sobre un eje multiplicada por la distancia a un punto de pivote.
<b>T-s</b>	Diagrama temperatura <i>versus</i> entropía.
<b>VVT-i</b>	Variable Valve Timing Injection, sistema de inyección utilizado en algunos motores Toyota.

## RESUMEN

Los vehículos que utilizan un motor de combustión interna, han venido a revolucionar a la sociedad en todo sentido, marcando un antes y un después en la historia de los métodos de transporte y cuidado del medio ambiente.

Durante muchos años se ignoraron las consecuencias que producen las emisiones de los automóviles a motor, independientemente del combustible que utilicen; ninguna máquina logra una combustión completa como para evitar emitir contaminantes al ambiente y destruir progresivamente la naturaleza; no fue sino a partir de los años 1960, que se introdujo la primera iniciativa de control de emisiones provenientes de los vehículos que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento, y dicho movimiento ha evolucionado de tal manera, que ha llevado a los ingenieros a idear formas de disminuir el consumo de los derivados del petróleo o sustituirlos con alternativas más ecológicas y amigables con el medio ambiente. Dentro de dichas iniciativas se encuentran los vehículos híbridos, que se han desarrollado a través de la historia a partir de prototipos y que han sido aceptados en el mercado automotriz hasta finales de los años 1990, con el lanzamiento del Toyota Prius.

Luego del éxito que obtuvo el Toyota Prius, los ojos de los grandes productores, en gran parte se han fijado en la economía y eficiencia, en cuanto al consumo de combustible se refiere en cada uno de sus nuevos modelos, ya que “lo verde está de moda”; dentro de este movimiento se han incluido vehículos especializados en el consumo restringido de combustible desarrollados paralelamente con los vehículos híbridos, dentro de los cuales se encuentra el Toyota Yaris, el cual fue un rotundo éxito para la firma japonesa.

Entonces surge la incógnita: ¿Cuál es más eficiente?, ¿qué diferencias existen en cuanto a rendimiento, consumo, funcionamiento, entre otros? La forma más adecuada de realizar dicha comparación es a partir de la ciencia y dentro de esta se encuentra la ingeniería, que ha sido de gran importancia para el desarrollo de la humanidad. Entre las especialidades de la ingeniería se encuentra la termodinámica, de la cual se ha apoyado específicamente en su descripción de los ciclos de potencia de gas utilizados en los motores de combustión interna, como el ciclo Otto (utilizado por el Toyota Yaris), y el ciclo Atkinson (utilizado por el Toyota Prius).

La termodinámica ha sido utilizada para el análisis, toma de datos, cálculos e interpretación llevados a cabo en dicha comparación, que ha guiado este trabajo de graduación de inicio a fin, para lograr los objetivos planteados y concluir a partir de los cálculos y análisis realizados en ambos vehículos.

# OBJETIVOS

## General

Realizar una comparación termodinámica entre los ciclos de potencia Otto, en un Toyota Yaris, y Atkinson, en un Toyota Prius.

## Específicos

1. Investigar el funcionamiento de un ciclo Atkinson en el automóvil Toyota Prius, y el ciclo Otto en un Toyota Yaris, y a partir de las ecuaciones del ciclo respectivo, calcular la eficiencia, trabajo neto, calor de entrada, calor de salida y presión media efectiva de los motores.
2. Indagar respecto al creciente uso de los automóviles híbridos, su evolución a través del tiempo, tipos, funcionamiento, su importancia actualmente, emisiones al medio ambiente y la legislación de contaminación del aire en Guatemala
3. Observar las diferencias termodinámicas y mecánicas entre ambos ciclos y explicar su procedencia.



## INTRODUCCIÓN

La Tierra, actualmente se encuentra en una riesgosa dependencia de uno de los recursos más codiciados en la historia junto con el oro, el llamado oro negro, el petróleo. Las enormes ganancias que los empresarios logran obtener con la explotación de dicho recurso atrae la atención de potencias mundiales, pero hay un detalle muy importante que todos conocen, pero soslayan: el petróleo y sus derivados son recursos finitos.

Alrededor de los años 1970, ante la llamada crisis del petróleo, reapareció el interés de la generación de energía independiente de los combustibles fósiles, que en algún momento había sido propuesta, pero desestimada por todos; el evidente calentamiento global y el alza alarmante de los precios del barril del petróleo en la década 1990 (lo que se considera por muchos la gota que derramó el vaso), comienza una industrialización de los vehículos híbridos, encabezada por la famosa constructora automovilística japonesa Toyota con el primer automóvil híbrido producido en serie, el Toyota Prius, un vehículo basado en un rezagado, pero eficiente ciclo Atkinson y un motor eléctrico a comparación del vehículo convencional de gasolina Otto.

Tras un fuerte golpe sobre la mesa en la iniciativa de los vehículos ecoamigables comenzó la incógnita: ¿Qué tan eficiente térmicamente hablando puede ser este vehículo a comparación del que se tiene?, ¿se obtendrá la misma relación potencia–consumo específico de combustible con este automóvil?, ¿qué aplicaciones podría tener el ciclo Atkinson?, etc. Como una respuesta ante tantas interrogantes se decidió realizar este trabajo de graduación, en el cual se recopilan datos del ciclo Atkinson del Toyota Prius y

se comparan con los datos de un vehículo Toyota Yaris que utiliza el ciclo Otto convencional, para obtener las respuestas que cualquier usuario interesado en la nueva tecnología a favor del ambiente pueda tener, además de enriquecer el conocimiento del lector respecto al funcionamiento básico de un vehículo híbrido Toyota y sus diferencias con los automóviles convencionales.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Vehículos híbridos

Básicamente la palabra híbrido se refiere a todo aquello que es resultado de una combinación o mezcla de dos o más elementos de diferente naturaleza o tipo. Ya hablando puramente de vehículos dentro de los cuales pueden entrar automóviles, camiones, bicicletas, barcos, aviones, entre otros; se refiere a cualquier vehículo que combina dos o más fuentes de poder; estas pueden ser energía eléctrica, motores de combustión interna, energía solar, electrólisis, etc. Un vehículo híbrido es ampliamente conocido por el máximo aprovechamiento de los recursos de los cuales se vale para su funcionamiento, por lo cual es considerado ecológico.

Como un ejemplo claro se pueden mencionar máquinas tan sencillas como una bicicleta motorizada, patinetas eléctricas o un ciclomotor; también máquinas complejas y de gran tamaño como submarinos de la Segunda Guerra Mundial que utilizaban diesel y energía eléctrica para impulsarse, locomotoras híbrida como la que se presenta en China (locomotora G12), que utiliza motor diésel y motor eléctrico e incluso trenes como el Khia E200 (Japón), que utiliza baterías de iones de litio en el techo para almacenar energía.

## **1.2. Evolución de los automóviles híbridos en la historia**

En un principio, cuando el señor Nikolaus Otto patentó en 1863 su primer motor de gas en colaboración con Eugene Langen, no se imaginó que sería la base de millones de automóviles hoy en día. Los siguientes modelos de motores siguieron basando su funcionamiento en el ciclo Otto y utilizando combustibles fósiles sin prever los impactos ambientales que esto podría provocar. Con el monopolio impuesto en la industria por el señor Henry Ford, no fue hasta mediados de los años 1970, cuando la humanidad se percató de la necesidad de buscar fuentes de energía alternas que no fueran los combustibles fósiles ante la creciente contaminación. En 1966, el Congreso de los Estados Unidos introdujo la primera legislación que recomendaba el uso de vehículos eléctricos como medio para reducir la contaminación ambiental causada por los gases de escape de los vehículos de combustión interna. Más o menos en ese año, el ingeniero Victor Wouk mencionó que el futuro no se encontraba en el motor eléctrico sino en el vehículo híbrido o gasolina/eléctrico, por lo cual le llamaron demente.

En 1969, la siempre innovadora General Motors presentó tres prototipos de automóviles: eléctrico, híbrido y de gasolina. Uno de los autos presentados fueron los XP512 (híbridos, mostrado en la figura 1, el cual utilizaba un generador para cargar sus baterías, pero no fue muy bien aceptado por la comunidad automovilística debido a su alto costo.

Los modelos que funcionaban con motores cien por ciento eléctricos mostraban muchas carencias con baterías de muy bajo rendimiento y poca autonomía, así que al final solo se tomó como una demostración tecnológica.

Figura 1. **XP512, primer automóvil híbrido**



Fuente: *A brief history of hybrid cars gives a sense of déjà vu.* <http://gas2.org/2010/09/08/a-brief-history-of-hybrid-cars-gives-a-sense-of-deja-vu/>. Consulta: mayo de 2015.

Luego del rechazo de los automóviles presentados, General Motors, de la mano de Victor Wouk y Charlie Rosen, lo intentó otra vez presentando otro vehículo híbrido basándose en un Buick Skylark 1972, el cual utilizaba un pequeño motor rotativo Wankel y un motor eléctrico de 20 hp; el vehículo superaba los 100 km/hr, pero fue descartado por sus deficiencias estructurales.

En 1970 se emitió la *Clean Air Act*, ya de manera oficial, y poco después en 1973, el precio del petróleo árabe se elevó de manera alarmante, lo cual revivió los deseos de los grandes productores automovilísticos la búsqueda de combustibles alternativos a los provenientes del petróleo. El Departamento de Energía de Estados Unidos realizó entonces varias pruebas con los grandes fabricantes como Volkswagen, con quienes se logró ensamblar el taxi VW en Wolfsburg, Alemania; el cual utilizaba un sistema híbrido intercambiando un motor eléctrico y de gasolina dependiendo de la necesidad del automotor.

Figura 2. **Buick Skylark híbrido**



Fuente: *A brief history of hybrid cars gives a sense of déjà vu.* <http://gas2.org/2010/09/08/a-brief-history-of-hybrid-cars-gives-a-sense-of-deja-vu/>. Consulta: mayo de 2015.

Entre la ardua competencia se hizo presente la gigante productora japonesa Toyota; en 1976 presentó un prototipo de automóvil híbrido en serie propulsado por una turbina de gas y motor eléctrico, el cual fue llamado “Toyota GT Hybrid Concept” basado en el Toyota Sports 800.

En 1980, la compañía de cortacéspedes Briggs & Stratton diseñó un vehículo híbrido utilizando un motor de dos cilindros de 16 CV de gasolina en combinación con un motor eléctrico de 26 CV, el cual constaba con dos puertas y seis ruedas, pero no fue sino hasta finales de los años 1980 que se presentó un modelo que podría entrar al mercado de los automóviles y fue obra de Audi. Se diseñó el Audi Duo a partir del Audi Avant Quattro, el cual tenía un motor eléctrico con baterías de níquel-cadmio para impulsar el eje trasero y un motor de combustión interna de 2 300 cc para el eje delantero.

Figura 3. **Audi Duo**



Fuente: *Historia del coche híbrido: la tecnología se perfecciona.*

<http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-del-coche-hibrido-la-tecnologia-se-perfecciona>. Consulta: mayo de 2015.

Dicho modelo fue rediseñado y se lanzó al mercado el Audi Duo III en 1997, con un motor 1.9 TDI a gasolina de 90 CV y un motor eléctrico de 29 CV en configuración paralela y tracción delantera, el cual fue considerado como el primer híbrido europeo moderno de producción en serie, pero solo se vendieron 60 unidades debido a su elevado precio, por lo que se considera como un fracaso comercial.

Cuando todo parecía indicar que la tecnología híbrida no era la más adecuada para el exigente mercado automovilístico reapareció en diciembre de 1997, la productora Toyota con su revolucionario Toyota Prius (proveniente del latín que significa “pionero”), el cual fue producido masivamente y aceptado de buena manera por los usuarios claramente, ya que solo el primer año se vendieron más de 18 000 unidades.

Ante el creciente interés del usuario por los automóviles híbridos, Honda apareció en la carrera en 1999, con el modelo Honda Insight, un semihíbrido con cambio manual, además de tamaño y peso reducido

Figura 4. **Honda Civic Hybrid**



Fuente: *Historia del coche híbrido: la tecnología se perfecciona.*

<http://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/historia-del-coche-hibrido-la-tecnologia-se-perfecciona>. Consulta: mayo de 2015.

Desde entonces se han producido muchos vehículos híbridos como el Lexus RX 400h, Mercedes-Benz 400 BlueHYBRID, Ford Escape Hybrid, entre otros, que han optado la mayoría por el eficiente ciclo Atkinson, dejando atrás el tan utilizado ciclo Otto. En la actualidad, donde se encuentra más variedad de automóviles híbridos es el mercado automotriz alrededor del mundo; mientras los japoneses y americanos diseñan híbridos de gasolina, en Europa Citroën, Opel y Peugeot han estado realizando estudios de vehículos híbridos con diésel que se espera que aparezcan en los próximos años en el mercado.

### **1.3. Utilización de la tecnología híbrida en la actualidad**

Actualmente en el mundo automotriz, la utilización de la tecnología híbrida ha sido utilizada en muchos ámbitos de la industria, desde los autos familiares hasta los conocidos como súperautos o autos de competición. La competencia por conseguir la mayor cantidad de caballos de fuerza en un auto ha sido tal, que las más grandes empresas productoras de vehículos de alta gama ha implementado la utilización de motores eléctricos acoplados a los ya eficientes motores de combustión interna, obteniendo así vehículos con caballajes, torque, velocidades máximas, entre otros; más altas que nunca, y sobre todo, con menores consumos de combustible.

Dentro de los automóviles a considerar son el Porsche 918 Spyder que combina un motor V8 con inyección de combustible directa de 32 válvulas y 4,6 litros de cilindraje, con dos motores eléctricos al frente y al medio que juntos alcanzan la impresionante cantidad de 887 HP, logrando una marca de 0 a 100 km/hr en tan solo 2,5 segundos.

Uno de los precursores de los súperautos híbridos se encuentra la firma británica McLaren, que con su modelo P1 2015 abrió la brecha para la industria de híbridos de altas prestaciones, combinando un MCI V8 de 3,8 litros biturbo acoplado a un motor eléctrico que combinados forman 904 HP, 350 km/hr como velocidad máxima y una marca de 2,7 segundos de 0 a 100 km/hr, es decir, una bala sobre ruedas.

Los italianos no se quedaron atrás y decidieron entrar al mercado de moda; el prestigioso fabricante Ferrari, conocido por sus modelos tradicionales y ser fieles a los motores sin turbo (hasta el 2015 con su 488 GTB), lanzó el modelo La Ferrari, que cuenta con un MCI V12 de nuevo unido a un motor

eléctrico, llegando a unos impresionantes 950 HP, 0 a 100 km/hr en 2,5 segundos y una velocidad máxima de 350 km/hr, presentándose como un gran candidato para llevarse los honores de mayor caballaje en un auto híbrido, pero no contaban con la presencia de los fabricantes suecos que se han llevado casi todos los récords: Koenigsegg.

Figura 5. **McLaren P1 2015**



Fuente: *Súperautos híbridos*. <http://motoresomos.com/2015/06/14/super-autos-hibridos/>.

Consulta: abril de 2016.

El pequeño, pero ambicioso productor sueco liderado por Christian Von Koenigsegg, conocido por su ingenio y exclusividad en sus vehículos, no escatimó en cuanto a potencia se trata en su último lanzamiento, presentando en Ginebra en 2015 su modelo Regera, que demuestra ser el rey de los súperautos híbridos. Se trata de un MCI de 5,0 litros biturbo de 8 cilindros en V, trabajando en conjunto con un motor eléctrico sobre el cigüeñal que actúa tanto como generador, como motor de arranque y dos motores eléctricos más sobre el eje de las ruedas traseras, combinando una estelar cantidad de 1 822 HP,

casi el doble que su más cercana competición de La Ferrari, alcanzando los 100 km/hr en 2,8 segundos y una velocidad máxima de Récord Guinness: 410 km/hr, algo antes impensable para un automóvil de carretera biplaza.

Figura 6. **Koenigsegg Regera**



Fuente: *Koenigsegg Regera: híbrido enchufable de 1 500 HP sin transmisión o caja de cambios.* [http://aavea.org/blog/wp-content/uploads/2015/04/Koenigsegg-Regera\\_05.jpg](http://aavea.org/blog/wp-content/uploads/2015/04/Koenigsegg-Regera_05.jpg).

Consulta: abril de 2016.

Además, cabe mencionar que, el automóvil no usa caja de cambios utilizada normalmente en los autos híbridos, ni mucho menos la convencional, sino emplea una caja llamada *direct drive*, que envía la fuerza de los dos propulsores principales directa e instantáneamente al eje trasero, prescindiendo de marchas o transmisiones variables tradicionales.

Como se puede notar, la tecnología de los sistemas híbridos no puede ser aplicada solamente para ahorrar combustible, sino también para obtener motores con mayores prestaciones en cualquier área de la industria automotriz.

## **1.4. Contaminación ambiental**

Actualmente, la dependencia a los combustibles fósiles a nivel mundial está alcanzando su nivel crítico; la economía de muchos países pende de un hilo, ya que el precio del petróleo es inestable y casi impredecible, aumentando así las probabilidades de un desplome económico. Además de dicha inestabilidad, el uso excesivo de los derivados del petróleo tanto en su exploración y extracción, ha causado emisiones de gases de efecto invernadero como nunca antes, aumentando los casos de lluvia ácida, agujeros en la capa de ozono, cambios bruscos de temperatura hasta alcanzar cifras históricas, derretimiento de los cascos polares, entre otros.

Ante tantas amenazas al planeta Tierra, surge la pregunta: ¿Qué opciones se tienen? Alternativas hay en abundancia y, aunque con anterioridad no eran bien aceptadas por la desestimación de los efectos anteriormente mencionados, ahora ante la creciente preocupación han salido a luz varias opciones fuertemente viables para salvar al planeta.

### **1.4.1. Emisiones**

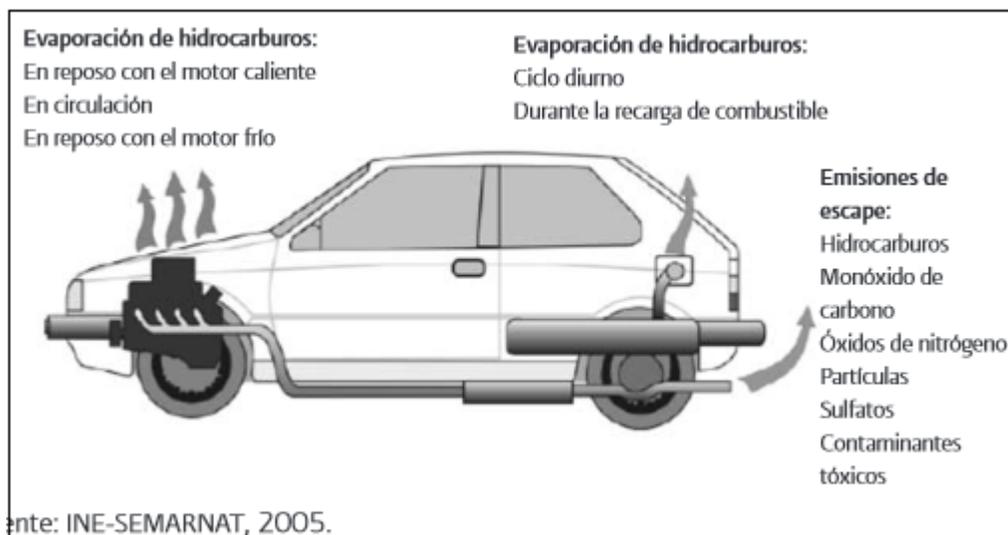
Las posibles emisiones causadas por los vehículos de combustión interna, se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Emisiones evaporativas
- Emisiones por el tubo de escape
- Emisiones de partículas por el desgaste de frenos y llantas

Al ser las emisiones por el desgaste de llantas y frenos literalmente depreciable, se describirán únicamente las emisiones por tubo de escape y

evaporativas, además de no mantener ninguna relación con el funcionamiento de los motores.

Figura 7. Tipos de emisiones



Fuente: *Los vehículos automotores como fuentes de emisión.*

<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/vehiculos.pdf>. Consulta: mayo de 2015.

#### 1.4.1.1. Emisiones evaporativas

Son las emisiones causadas por la evaporación de combustible, las cuales pueden ocurrir tanto cuando el vehículo está en movimiento como cuando está estacionado y su magnitud va a depender de varios factores, como las características y mantenimiento del vehículo, factores geográficos y meteorológicos (temperatura, altura, entre otros), presión de vapor del combustible, entre otros. Los procesos por lo que las emisiones evaporativas se presentan, pueden ser:

- Emisiones luego de recién apagar el motor caliente debido a la volatilización del combustible por su calor residual.
- Emisiones del automóvil en reposo con el motor frío a causa de la pobre permeabilidad de los componentes presentes en el tanque de combustible.
- Emisiones que ocurren a la hora de recargar de combustible el automotor en las estaciones de servicio.
- Emisiones diurnas generadas normalmente a causa de los cambios de temperatura ambiental a lo largo del día que afectan el sistema de combustible.

#### **1.4.1.2. Emisiones por tubo de escape**

Son las de mayor participación en la contaminación ambiental y son producto de la quema del combustible dentro del motor y causan contaminantes altamente tóxicos como el monóxido de carbono, hidrocarburos, azufre, entre otros. La cantidad de emisiones tóxicas presentes a la salida del tubo de escape del vehículo dependen de las características del vehículo, además de su tecnología y su sistema de control de emisiones. El mantenimiento recurrente del vehículo juega un importante papel para determinar cantidad y toxicidad de los gases a la salida del ciclo. Dentro de estos contaminantes se encuentran:

- Hidrocarburos (HC): este aparece ante una combustión incompleta en el motor, es decir cuando no se quema el 100 % del combustible; ya que no existe ningún ciclo termodinámico que funcione idealmente, esto sucede en todos los motores de combustión interna. Dentro de la extensa gama de hidrocarburos generados, los de interés son los compuestos orgánicos volátiles (COV), ya que estos contaminantes son precursores

del ozono, formaldehído, benceno, etc. y tienen una alta toxicidad para el ser humano.

- Monóxido de carbono (CO): al igual que el caso de los hidrocarburos, el monóxido de carbono se produce debido a una combustión incompleta, cuando el carbono en el combustible se oxida solo parcialmente; se adhiere fácilmente a la hemoglobina en la sangre reduciendo el flujo de oxígeno en el cuerpo, ocasionando disfunciones en el sistema nervioso, cardiovascular y, por supuesto, respiratorio.
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>): la alta temperatura y presión que se presentan dentro de los cilindro del motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar el monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), y otros óxidos de nitrógenos no muy comunes que de forma conjunta se conocen como NO<sub>x</sub>; así como los hidrocarburos son precursores de ozono. Además, que con la presencia de humedad atmosférica se convierten fácilmente en ácido nítrico, componente que es responsable de la famosa lluvia ácida. El óxido de nitrógeno puede causar enfermedades respiratorias a niños y personas asmáticas y al ser crónica la exposición puede causar la muerte.
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): este compuesto ha sido catalogado como un gas sin efectos nocivos en la salud humana, pero es uno de los gases de efecto invernadero que se acumula en la tropósfera atrapando la luz solar, contribuyendo grandemente al famoso calentamiento global.
- Metano (CH<sub>4</sub>): así como el dióxido de carbono, el metano es un peligroso gas de efecto invernadero generado durante la combustión en los

vehículos, solamente que tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor al dióxido de carbono.

- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O): es considerado como el gas de efecto invernadero más fuerte de todos, perteneciente a la familia de los óxidos de nitrógeno con un potencial de calentamiento de 310 veces mayor que el dióxido de carbono.
- Partículas (PM): son producto del proceso de combustión dentro de los cilindros del motor y es uno de los que tiene mayor impacto en la salud humana, ya que ha sido asociado con enfermedades respiratorias, reducción de la función pulmonar, agravamiento del asma e incluso muerte por efectos nocivos en el sistema cardiovascular y respiratorio.

#### **1.4.2. Legislación de la contaminación del aire**

De los primeros países que recurrieron a la ley para controlar los gases provenientes de los vehículos a motor de combustión interna fue Estados Unidos en 1970, con el Clean Air Act (CAA) o en español: Acta de Aire Limpio, debido a la excesiva contaminación del aire en muchas ciudades altamente pobladas en dicho país. Se comenzó con normas de emisión que el fabricante debía de cumplir, dentro de los cuales se encontraba el control de hidrocarburos, óxidos nítricos, monóxido de carbono, entre otros.

Alrededor del mundo existen varias agencias que regulan las emisiones, tales como:

- Agencia de Protección del Medio Ambiente en Estados Unidos o más conocido como Environmental Protection Agency (EPA).

- Departamento de Recursos del Aire de California o California Air Resources Board (CARB).
- Control de Emisiones de Europa o Europe Emissions Control (EEC).
- Asociación de Control de Emisiones de Catalizadores (AECC).

Gracias a la incorporación de diversas reglamentaciones en muchos países del mundo se ha logrado disminuir la contaminación de los vehículos en un 90 % desde 1970, pero debido al creciente mercado de los automóviles, cada vez hay más vehículos en las calles de todo el mundo, afectando estas regulaciones.

Recientemente, diversas empresas productoras de vehículos han optado por la construcción de motores pequeños con alta eficiencia y bajo consumo de combustible, además de crear sistemas de inyección de combustible electrónicamente controlada y catalizadores para vehículos de todo tipo, aumentando el desempeño y reduciendo el consumo en general.

En Guatemala han existido varios intentos de implementación de una ley que regule las emisiones provenientes de los vehículos automotores debido al crecimiento exponencial de la cantidad de vehículos (según la Municipalidad de Guatemala, hasta inicios de 2015, solamente en la ciudad capital circulan aproximadamente 1,2 millones de vehículos, aumentando considerablemente no solo el tránsito vehicular, sino las emisiones producidas por dicha cantidad de automotores), pero no se ha logrado llegar a un acuerdo para el establecimiento formal de la misma ante el Congreso de la República.

La legislación de Guatemala es dispersa, debido a que no existe un código que contenga las normas ambientales, sino que las normas se encuentran en varios códigos y la ley existe, pero no tiene los reglamentos necesarios para su

aplicación; actualmente en el país sí se cuenta con una Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, el Decreto Ley 68-86 del Congreso de la República, en el cual quedó establecido el marco general para la protección ambiental, creando la Comisión Nacional del Medio Ambiente (Conama), cuya función principal es el asesoramiento y coordinación de las acciones respecto a la política nacional ambiental y propiciar su aplicación a través de los ministerios del Estado. Pero dicha ley está enfocada más que todo en la protección, conservación y mejoramiento de los recursos naturales del país, así como la prevención, regulación y control de las causas o actividades que originen el deterioro del medio ambiente y sistemas ecológicos del país, es decir, no está enfocada específicamente a la emisión de gases al ambiente.

En el tema de calidad de aire han existido algunos esfuerzos para la medición y monitoreo de emisiones de contaminantes a la atmósfera, estableciendo límites máximos permisibles, como la Ley de Humo Negro (Acuerdo Gubernativo 1017-90), el 9 de octubre de 1990, el cual fijaba un plazo para el ajuste de los motores de los vehículos, emisión que fue modificada por el Acuerdo Gubernativo 14-97, Reglamento para el Control de Emisiones de los Vehículos, pero este fue derogado a finales de 1998. Luego el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), en 2002 propuso un reglamento de emisiones de gases automotrices que no fue aprobada por el Organismo Ejecutivo. Desde entonces los intentos por la creación de una ley para el control de gases vehiculares no han pasado de ser intentos únicamente.

## 2. MARCO TEÓRICO

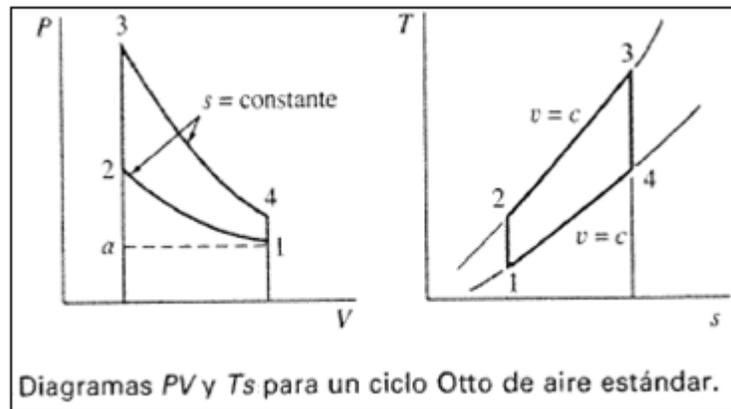
### 2.1. Ciclo Otto

Es un conjunto de procesos utilizados por los motores de combustión interna, de encendido provocado o gasolina de dos o cuatro tiempos; fue inventado por el ingeniero alemán Nikolaus August Otto en 1876. El motor de cuatro tiempos de ignición forzada o de encendido provocado es un componente tecnológico para responder a las fuertes exigencias de la sociedad actual, por lo que será el ciclo analizado en este trabajo de graduación.

Dicho ciclo se compone de cuatro procesos internamente reversibles, además de una parte del ciclo para la admisión y para el escape. Considérese un dispositivo cilindro-émbolo que contenga aire y con el émbolo en el punto muerto inferior (PMI), el cual se muestra como punto 1 en la figura 8.

Mientras el émbolo se mueve hacia el punto muerto superior el aire se comprime adiabáticamente; como los procesos son reversibles, el proceso de compresión es isoentrópico y termina en el estado 2. Después se transfiere calor al aire dentro del émbolo instantáneamente de tal forma que la presión como la temperatura aumenta a valores altos en un proceso a volumen constante como el proceso 2-3. Mientras el émbolo se desplaza al PMI de nuevo, sucede la expansión internamente reversible de forma adiabática hasta el punto 4.

Figura 8. **Diagrama ciclo Otto**



Fuente: WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. p. 721.

Por último, con el émbolo en el PMI, el aire cede calor a volumen constante hasta que alcance su estado inicial de donde el fluido puede iniciar un nuevo ciclo. Para que el ciclo sea más real se debe considerar el escape de los productos de la combustión como parte del mismo, en el cual se abre la válvula de escape y el émbolo se mueve del PMI a PMS expulsando los gases al ambiente; durante esta carrera de succión el cilindro se llena con aire fresco para el siguiente ciclo. En resumen, el ciclo se compone de los siguientes procesos internamente reversibles:

- 1-2 compresión adiabática
- 2-3 suministro de calor a volumen constante
- 3-4 expansión adiabática
- 4-1 cesión de calor a volumen constante

### 2.1.1. Deducción de ecuaciones

Para analizar el ciclo Otto ideal se pueden despreciar en el balance los procesos de admisión y de escape a presión constante, ya que al ser idénticos y reversibles en sentido opuesto, todo el calor y el trabajo que se intercambien en uno de ellos, se cancela con un término opuesto en el otro.

#### 2.1.1.1. Intercambio de calor

De los cuatro procesos que forman el ciclo cerrado, no se intercambia calor en los procesos adiabáticos, pero sí en los procesos a volumen constante. En la ignición de la mezcla, una cierta cantidad de calor  $Q_c$  procedente de la energía del combustible se transfiere al aire:

$$Q_c = \Delta U - W \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Donde

$Q_c$  = calor de entrada

$\Delta U$  = cambio de energía interna

$W$  = trabajo

Como el proceso sucede a volumen constante, el calor coincide con el aumento de energía interna, la cual es igual a la entalpía, es decir:

$$Q_c = \Delta u \quad \text{[Ecuación 2]}$$

En la expulsión de los gases, el aire sale a una temperatura mayor que a la entrada, liberando posteriormente un calor  $Q_f$  al ambiente. En el modelo de

sistema cerrado en el que se supone que el mismo aire se comprime una y otra vez en el motor, este  $Q_f$  (calor de salida) es liberado por enfriamiento, por lo que su signo se supone negativo, entonces se tiene:

$$Q_f = |\Delta u| \quad \text{[Ecuación 3]}$$

### 2.1.1.2. Trabajo realizado

De forma opuesta a lo que ocurre en el calor, no se realiza trabajo sobre el sistema en los dos procesos isócoros, pero sí en los adiabáticos.

En la compresión 1-2 de la mezcla se realiza un trabajo positivo sobre el gas; al ser un proceso adiabático, todo este trabajo se invierte en incrementar la energía interna, elevando su temperatura:

$$W_{1-2} = \Delta u - Q \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde

$W_{1-2}$  = cambio de trabajo entre punto 1 y punto 2 (figura 8)

$Q$  = calor

$\Delta u$  = cambio de entalpía

Donde  $Q$  es cero por ser un proceso adiabático, es decir:

$$W_{1-2} = \Delta u \quad \text{[Ecuación 5]}$$

En la expansión es el aire quien realiza trabajo sobre el pistón, de nuevo este trabajo útil equivale a la variación de la energía interna al ser igual que la compresión un proceso adiabático:

$$W_{3-4} = \Delta u \quad \text{[Ecuación 6]}$$

Donde

$W_{3-4}$  = cambio de trabajo entre punto 3 y punto 4 (figura 8)

El trabajo útil realizado por el motor será el trabajo neto entregado menos lo que emplea en funcionar, es decir:

$$W_T = |W_{3-4}| - |W_{1-2}| \quad \text{[Ecuación 7]}$$

Donde

$W_T$  = trabajo neto

$W_{3-4}$  = cambio de trabajo entre el punto 3 y el punto 4 (figura 8)

$W_{1-2}$  = cambio de trabajo entre el punto 1 y el punto 2 (figura 8)

Por ser un proceso cíclico, la variación de energía entalpía es nula al finalizar el ciclo; esto implica que el calor neto introducido en el sistema debe ser igual al trabajo neto realizado por este, en valor absoluto:

$$|Q_c| - |Q_f| = W_T = |W_{3-4}| - |W_{1-2}| \quad \text{[Ecuación 8]}$$

### 2.1.1.3. Rendimiento

La eficiencia o rendimiento de una máquina térmica se obtiene en general como lo que se utiliza (trabajo total realizado), dividido dentro de lo que cuesta lo utilizado (calor suministrado al fluido de trabajo); en este caso lo que se utiliza es el trabajo neto útil  $|W|$ , y lo que cuesta es el calor que se introduce en la combustión, es decir:

$$\eta = \frac{W_T}{Q_{absorbido}} = \frac{Q_{cedido} - Q_{absorbido}}{Q_{absorbido}} \quad \text{[Ecuación 9]}$$

Donde

$\eta$  = eficiencia térmica

$Q_{absorbido}$  = calor absorbido

$Q_{cedido}$  = calor cedido

La absorción de calor tiene lugar en la etapa 2-3 y la cesión en la 4-1, por lo que se tiene:

$$\eta = \frac{Q_{4-1} - |Q_{2-3}|}{|Q_{2-3}|} \quad \text{[Ecuación 10]}$$

### 2.1.2. Relación de compresión (RC)

Dentro de un motor de combustión se tiene un aumento de presión desde la compresión hasta la finalización de la ignición, lo que provoca una disminución de volumen específico de los gases que son expuestos a dichas altas presiones. Tomando como referencia la figura 8, del punto 1 al 2 se tiene una adición de trabajo al sistema de forma isentrópica, y del punto 3 al 4 una

cedencia de trabajo con el mismo comportamiento, por lo que se puede asumir un sistema cerrado sometido a un trabajo puramente de frontera, presentándose un cambio de volúmenes específicos debido al cambio en la presión; la relación de compresión hace referencia a dicho cambio de presión y volumen, relacionando el volumen presente en el punto muerto inferior del pistón (PMI) y el punto muerto superior (PMS) o cámara de combustión. Es decir, la relación de compresión de un motor, da el nivel de compresión al que se somete la mezcla en el interior del cilindro. Para calcularla, se divide el volumen de aire contenido en el cilindro cuando el pistón está en el PMI por el volumen que ocupa al pasar el pistón al PMS, es decir:

$$RC = \frac{v_{max}}{v_{min}} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{[Ecuación 11]}$$

Donde

RC = relación de compresión

$v_{max}$  = volumen máximo

$v_{min}$  = volumen mínimo

$v_1$  = volumen en el punto 1 (figura 8)

$v_2$  = volumen en el punto 2 (figura 8)

### 2.1.3. Presión media efectiva (PME)

Como es de esperarse, la potencia desarrollada por un motor de combustión interna dentro de los cilindros (es decir potencia indicada o HPI), está directamente relacionada con la eficiencia de combustión del ciclo termodinámico, y por supuesto la presión desarrollada durante dicho proceso. La presión media efectiva es un concepto importante a considerar a la hora de

juzgar cuál sería la potencia útil que puede dar un proceso de combustión en condiciones de trabajo normales, por lo que se ampliará su definición.

Se supone que la presión de los gases que actúa sobre cada pistón del motor no varía a través del tiempo, sino que se mantiene constante, permitiendo tomar su valor medio. Ahora se puede suponer que esta presión media de los gases sufre una reducción en una cantidad estrictamente necesaria para vencer las pérdidas por rozamiento, por lo que se le llama presión media efectiva.

Considerando el mismo escenario anterior de otra manera, se puede considerar a la presión media efectiva como la presión media, que impuesta a los pistones de un motor carente de rozamientos, produciría la misma potencia útil que un motor verdadero. Debido a la dificultad que presenta, dicha presión no se puede medir directamente, pero se puede calcular termodinámicamente con la siguiente fórmula, utilizando como referencia la figura 8:

$$PME = \frac{W_{neto}}{v_1 - v_2} \quad \text{[Ecuación 12]}$$

Donde

PME = presión media efectiva

$W_{neto}$  = trabajo neto

Para obtener los volúmenes se puede utilizar la ecuación de los gases ideales, la cual se define como:

$$P * v = m * R * T \quad \text{[Ecuación 13]}$$

En donde P es la presión, v es el volumen, m es la masa (que puede ser sustituido por uno sobre la masa molar M), R es la constante de los gases y T la temperatura. Despejando el volumen de la ecuación 13 se tiene:

$$v = \frac{R*T}{M*P} \quad \text{[Ecuación 14]}$$

Luego para obtener el volumen en el punto dos, simplemente se despeja  $v_2$  de la ecuación 11, obteniendo:

$$v_2 = \frac{v_1}{RC} \quad \text{[Ecuación 15]}$$

## 2.2. Ciclo Atkinson

Es un ciclo termodinámico inventado por James Atkinson en 1882, poco después de la invención del ciclo Otto en 1876. En el ciclo Otto y en el ciclo Diésel, cuando se produce la expansión y el pistón ha llegado a su PMI, la presión en el cilindro es mayor a la atmosférica; se podría obtener un trabajo adicional al original si la expansión se alargara hasta la presión atmosférica. El ciclo Atkinson se caracteriza por prolongar la expansión adiabática hasta la línea de presión atmosférica, es decir es un ciclo donde la compresión y el suministro de calor se realiza como en ciclo Otto, pero a diferencia de este, la expansión se alarga hasta que se alcanza la presión atmosférica.

Debido a la prolongación de la expansión adiabática con respecto al ciclo Otto, en el pistón se debe tener una carrera de expansión más grande que la de compresión, lo cual no es posible conseguir con el sistema de manivela convencional donde la carrera de expansión es igual a la de compresión. Al realizar esta observación, el mismo Atkinson ideó un mecanismo para conseguir

dicha condición, lo cual ha sido la solución para muchas aplicaciones mecánicas propuestas. Este mecanismo se basa en la eliminación de bielas, las cuales se sustituyen por émbolos gobernados por levas; se trata de motores llamados k-ciclo, los cuales logran una mayor eficiencia, ya que se consigue una relación de compresión más alta, obteniendo así un rendimiento termodinámico mayor.

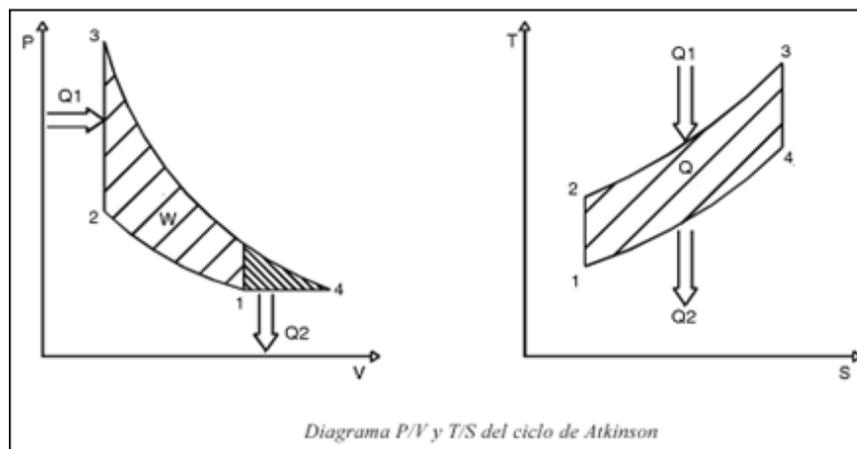
Pero la solución también puede obtenerse de una forma indirecta; se toma un motor convencional y se hace la carrera de compresión efectiva más corta que la geométrica, cerrando la válvula de admisión con un avance o atraso variables. De esta manera se logra conseguir una carrera efectiva de compresión más corta que la de expansión dando lugar a un ciclo Atkinson truncado, los cuales se identifican como ciclo Miller. Ahora se tiene una carrera de compresión menor que la de expansión.

Este ciclo de Atkinson truncado es muy conocido como el ciclo de cinco tiempos, ya que en la carrera de compresión se mantiene por cierto tiempo la válvula de admisión abierta, causando así un llamado reflujo de gases que salen del pistón y ayudan a precalentar la mezcla del ciclo siguiente, agregando calor a presión constante; luego se cierra la válvula de admisión y el tiempo de carrera es tan corto, que se comporta como en un ciclo Diésel, es decir, le agrega calor al ciclo a volumen constante a la hora de la ignición, aumentando la relación de compresión del sistema.

El motor del Toyota Prius cuenta con un sistema de inyección de distribución variable llamado Variable Valve Timing Injection (VVT-i), lo que permite cerrar la válvula de admisión luego que el pistón alcance el PMI, es decir la válvula de admisión no se cierra sino hasta alcanzar aproximadamente media carrera ascendente, por lo que se tiene una relación de corte igual a dos.

Como hay una menor mezcla en el cilindro debido al reflujo de gases, la potencia es inferior al de un motor Otto de la misma cilindrada, pero la eficiencia termodinámica es más alta, por lo que se consume menos combustible. Debido a esto el ciclo Atkinson se presta como el mejor candidato para ser utilizado en motores híbridos, donde el motor eléctrico aporta la potencia faltante y así ambos motores combinados entregan una potencia considerable con un bajo consumo de combustible.

Figura 9. **Ciclo Atkinson**



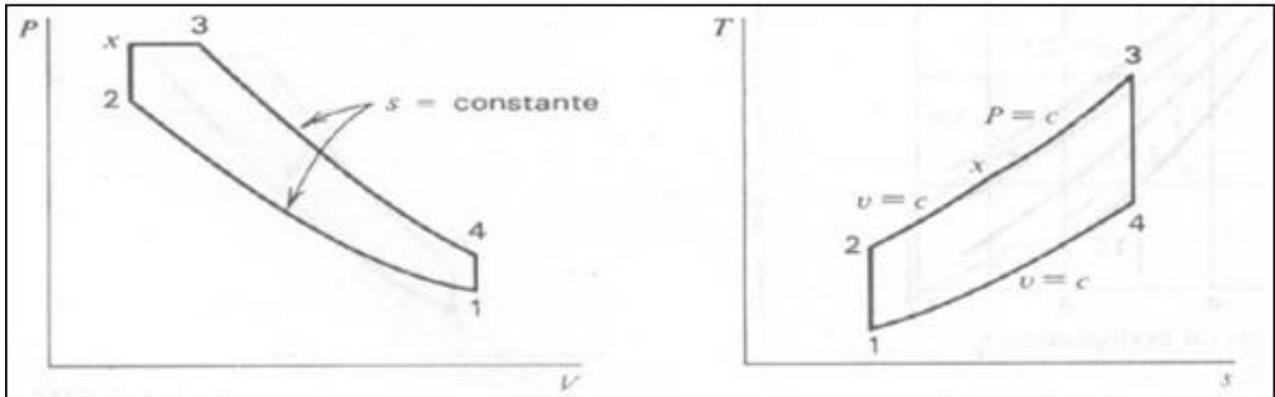
Fuente: ÁLVAREZ FLORES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras*. p. 89.

A partir la figura 9 se pueden describir las fases del ciclo como:

- 1-2 compresión adiabática
- 2-3 aportación de calor a volumen constante
- 3-4 expansión adiabática
- 4-1 extracción de calor a presión constante

Es importante mencionar que este fue el modelo sobre el cual se diseñó el ciclo Atkinson truncado o Miller, ya que el mostrado en la figura 9 solo cuenta con cuatro puntos, mientras al ciclo Miller se le debe agregar la separación de la adición de calor a volumen y presión constante, cuyo comportamiento se muestra en la figura 10, el cual se asemeja mucho a un ciclo dual:

Figura 10. **Diagrama de un ciclo Atkinson truncado**



Fuente: SÁNCHEZ, Josmery. *Ciclos de potencia de gas aire cerrados*. p. 8.

Según la figura 10 se tiene el siguiente comportamiento:

- 1-2 compresión adiabática
- 2-x transmisión de calor a volumen constante
- x-3 transmisión de calor a presión constante
- 3-4 expansión adiabática
- 4-1 cedencia de calor a volumen constante

### 2.2.1. Deducción de ecuaciones

La deducción de las ecuaciones será similar a la del ciclo Otto. Sabiendo anteriormente que:

$$\eta = \frac{\text{calor aportado} - \text{calor extraído}}{\text{calor aportado}} \quad [\text{Ecuación 16}]$$

Como ya se sabe, en el proceso 2-x se tiene una aportación de calor a volumen constante, y de x-3 se tiene adición de calor a presión constante, por lo que:

$$Q_{2-x} = \Delta u_{2-x} - W_{2-x} \quad [\text{Ecuación 17}]$$

$$Q_{x-3} = \Delta u_{x-3} - W_{x-3} \quad [\text{Ecuación 18}]$$

Donde Q es calor, u es entalpía y W trabajo; el trabajo es igual a cero por ser la condición de volumen mencionada anteriormente, entonces:

$$Q_{\text{aportado}} = \Delta u_{2-x} + \Delta u_{x-3} \quad [\text{Ecuación 19}]$$

Ahora, partiendo de la ecuación de la energía, en cuanto a calor extraído se tiene:

$$Q_{\text{extraído}} = u_4 - u_1 + P_4V_4 - P_1V_1 \quad [\text{Ecuación 20}]$$

Donde P es presión y V volumen; sabiendo que el cambio de volumen es cero, entonces:

$$Q_{\text{extraído}} = \Delta u_{4-1} \quad [\text{Ecuación 21}]$$

### 2.2.2. Ecuación de eficiencia

Con lo obtenido a partir de la deducción anterior se puede concluir que:

$$\eta = \frac{\Delta u_{2-x} + \Delta u_{x-3} - \Delta u_{4-1}}{\Delta u_{2-x} + \Delta u_{x-3}} \quad [\text{Ecuación 22}]$$

### 2.2.3. Efectos del aumento de la relación de compresión

Actualmente, para el desarrollo de motores de combustión interna, los diseñadores han optado por la utilización de relaciones de compresión cada vez más grandes, ya que esto presenta diversas ventajas. Cuando la relación aumenta, también lo hace la potencia desarrollada y la economía del consumo sin la necesidad de un aumento del peso y tamaño del motor. Esto se debe a que a la hora de aumentar dicha relación, el pistón prensa más la mezcla aire-combustible, sometiéndola a mayores presiones, causando que se obtenga un mayor trabajo en la carrera de expansión. Someter la mezcla a una mayor presión al final de la carrera de compresión, se traducirá en una mayor presión de combustión o impulso obtenido por el pistón durante la carrera de trabajo.

Aun así, no todo el panorama de aumentar la relación de compresión resulta beneficioso para un motor de combustión; ante el aumento de la presión se puede presentar un fenómeno conocido como autoencendido, que es el encendido prematuro del combustible sin necesidad de chispa debido a un aumento anómalo de la temperatura ideal de detonación, causando un temprano y rápido quemado de combustible en algún punto de la flama, seguido por una combustión casi instantánea del gas remanente, produciendo un ruido llamado golpeteo o cascabeleo. Este golpeteo es altamente dañino para un motor de combustión interna, ya que somete a todas las piezas involucradas en

el movimiento alternativo incluyendo el pistón, cilindro, bielas, muñequillas, bulones, cojinetes de deslizamiento, entre otros, a esfuerzos inesperados para los cuales no fueron diseñados, causando un desgaste prematuro y acelerado, además de disminuir enormemente la eficiencia tanto térmica como mecánica del motor, ya que la explosión sucede en un tiempo no ideal para una combustión adecuada.

Un combustible presenta cierta resistencia a la detonación o autoencendido al ser sometido a altas presiones y temperaturas llamado octanaje. El índice de octano de un combustible se obtiene por comparación del poder detonante del mismo con la mezcla de isooctano y heptano; al isooctano se le asigna un poder antidetonante de 100 al poseer excelente cualidades antidetonantes y al heptano de 0, o sea nulas cualidades antidetonantes. Es decir, una gasolina con un índice de 97 octanos se comporta, en cuanto a su capacidad antidetonante, como una mezcla que contiene el 97 % de isooctano y el 3 % de heptano. Este valor se obtiene de forma experimental en motores monocilíndricos diseñados para tener la capacidad de variar su relación de compresión, logrando comparar el poder antidetonante de la gasolina con la mezcla heptano-isooctano, el cual puede ser aumentado al agregársele Metil T-Butil Eter (MTBE) o mezclas de alcohol y posibilitando el aumento de la relación de compresión sin correr el riesgo del autoencendido y, por lo tanto, golpeteo. Es decir, la manipulación de las propiedades de un combustible con respecto a su resistencia a la detonación, es básica para el correcto funcionamiento de un MCI, por lo que es necesario una precisa relación heptano-isooctano para asegurar una combustión adecuada y completa dentro del cilindro.

## **2.3. Automóviles híbridos**

Como se explicó anteriormente, un sistema híbrido es aquel que trabaja con dos o más fuentes de poder para trabajar; por lo tanto un automóvil híbrido es el que funciona con dos o más fuentes de energía distintas.

### **2.3.1. Tipos de motores híbridos**

Los tipos de motores híbridos se clasifican más que todo por su estructura. Las fuentes de energía se pueden combinar de diferentes maneras o estructuras, lo que resulta en muchos sistemas y vehículos; además hay que tomar en cuenta que cada fabricante tiene su propio diseño y funcionamiento con base en sus pruebas e investigaciones realizadas.

Pero en general, los motores híbridos se dividen en dos grandes grupos:

- En serie
- En paralelo

Aunque, también se pueden clasificar dichos motores en pequeños grupos basándose en la capacidad de un vehículo en poder funcionar con ambas fuentes de energía de manera independiente en un momento dado, dependiendo de la configuración del mismo y su sistema de transmisión de potencia:

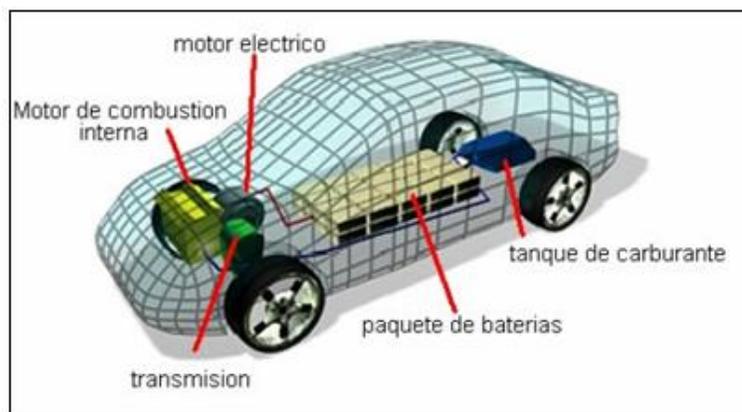
- Híbrido básico: sistema híbrido que utiliza solo un motor de arranque sobredimensionado que le brinda asistencia al motor de gasolina cuando este consume más combustible.

- Híbrido por asistencia alta: siguiendo siempre la combinación de motor eléctrico y de gasolina, se habla de un motor que no puede ser impulsado solamente por el motor eléctrico, sino que este utiliza una asistencia para el motor de combustión nada más, que suele ser pequeño y eficiente.
- Híbrido total: este tipo de motor puede impulsarse solamente con el motor eléctrico sin ayuda del motor de combustión, solo cuando se le requiera.

### 2.3.1.1. Sistema híbrido en paralelo

En este tipo de motor, tanto el motor eléctrico como el de combustión interna están contactados directamente a las ruedas del automóvil, permitiendo trabajar de forma conjunta o por separado; es decir, los ejes de ambos motores se encuentran unidos en un solo mecanismo.

Figura 11. Sistema híbrido en paralelo



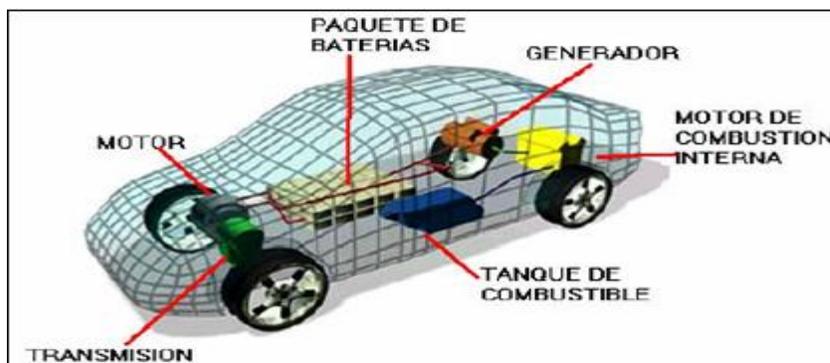
Fuente: ZELAYA MIRA, Oswaldo Antonio. *Análisis general de los vehículos híbridos y su funcionamiento*. p. 19.

Cuando se circula por la ciudad, cuando el tránsito es lento y la potencia requerida no es mucha, el motor eléctrico se mantiene en funcionamiento permitiendo un ahorro notable de combustible y no produce emisión alguna a la atmósfera. Este sistema tiene un tanque de combustible para el motor de combustión interna y un juego de baterías que proporciona energía al motor eléctrico.

### 2.3.1.2. Sistema híbrido en serie

A comparación de los motores en paralelo, el vehículo logra moverse con la potencia que suministra el motor eléctrico el cual es alimentado por la energía eléctrica suministrada por el generador, este es accionado por el motor de combustión interna. Es decir, el vehículo funciona como uno tradicional con su propia transmisión, pero cuenta con un generador eléctrico conectado al motor de combustión interna para impulsar uno o varios motores eléctricos, lo que permite un mejor aprovechamiento del espacio, mejor control de tracción, además de estabilidad.

Figura 12. Sistema híbrido en serie



Fuente: ZELAYA MIRA, Oswaldo Antonio. *Análisis general de los vehículos híbridos y su funcionamiento*. p. 18.

### **2.3.2. Automóvil híbrido Toyota y sus componentes principales**

Toyota ha logrado implementar la tecnología híbrida en un motor que combina eficiencia y economía de una manera que no se había logrado antes. Comenzó con su lanzamiento en 1997, y 19 años después ha sufrido pequeñas modificaciones que se han implementado debido a el acelerado mejoramiento de la tecnología, pero su funcionamiento básico sigue siendo el mismo del inicio.

Es un sistema híbrido en paralelo; como se había mencionado anteriormente, el motor actualmente es la tercera versión de este modelo y cuenta con un motor a gasolina de 4 cilindros y 1 500 cc que trabaja conjuntamente con un motor eléctrico de corriente continua de imán permanente, el cual provee asistencia al motor de gasolina para encontrar condiciones ideales de funcionamiento y bajo ciertas circunstancias funciona el motor eléctrico independientemente del de gasolina, reduciendo los consumos de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. El motor eléctrico se alimenta de una serie de baterías que se recargan mientras el automóvil está en movimiento, por lo que no requiere una fuente externa de energía. Toda esta distribución de potencia es controlada por el *hybrid synergy drive*; este sistema es clave dentro del funcionamiento del vehículo para asegurar el bajo consumo de combustible y la recarga constante de las baterías, contando con las siguientes etapas:

- A bajas revoluciones: el automóvil utiliza la energía proveniente de las baterías para vencer la inercia de su peso y moverse; cuando el nivel de energía en almacenamiento es bajo, utiliza el motor de combustión interna para dar potencia al generador y recargar la batería.

- En condiciones normales o de exigencia media: el sistema hybrid synergy drive determina que el MCI es la principal fuente de energía, transmitiendo su potencia directamente a las ruedas y al generador, el cual impulsa el motor eléctrico y ayuda en cierta proporción al MCI a brindar potencia al vehículo, manteniendo siempre la relación óptima entre ambas fuentes de energía para brindarle potencia.
- Aceleración total o alta exigencia: al acelerar de golpe o aumentar en gran medida las revoluciones del motor, se combina el generador eléctrico, las baterías de alto voltaje y motor de combustión para proporcionar la máxima potencia a la transmisión, brindando una aceleración suave y lineal.
- Desaceleración: al disminuir la velocidad del automóvil, el motor eléctrico controla la distribución de potencia a las ruedas, permitiendo al MCI actuar como un gran generador, recuperando la energía y almacenándola en la batería de alto voltaje.
- Detención: cuando el vehículo se encuentra encendido, pero sin acelerarse, el motor de combustión interna se detiene para disminuir el consumo de combustible, dejando la responsabilidad de mantener encendido el automóvil solamente en el motor eléctrico.

### 2.3.2.1. Motor de combustión Atkinson

El motor de combustión interna que utiliza el Toyota Prius es un motor a gasolina basado en el ciclo Atkinson, que se describió anteriormente en la sección 2.2.

Figura 13. Motor Toyota híbrido



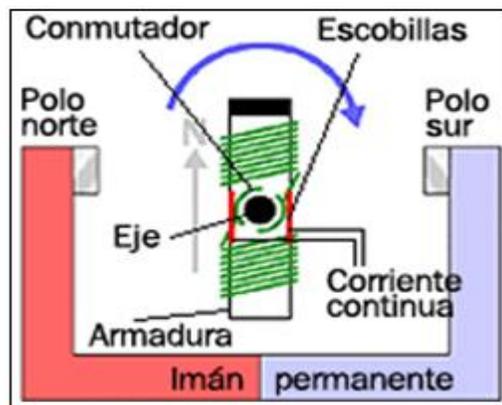
Fuente: Autorepuestos Copartes. <http://www.copartes.com/catalogo/partes>. Consulta: mayo de 2015.

Contiene 4 cilindros en línea con 16 válvulas y un sistema DOHC VVT-i, una cilindrada de 1 500 cc, construido con una culata de aluminio y un bloque de motor de aleación de aluminio; la inyección es tipo EFI secuencial multipuerto (L-Jetronic) con una relación de compresión de 13:1. La potencia máxima es de 100 HP con un torque máximo de 169 Nm.

### 2.3.2.2. Motor eléctrico

El motor eléctrico utilizado es de corriente continua; convierte la energía eléctrica en mecánica mediante el movimiento rotativo. Es muy versátil, por lo que se ha utilizado por años en motores de tranvías y otros vehículos. También es denominado motor de corriente directa, motor CC o DC.

Figura 14. Motor eléctrico de corriente continua



Fuente: *Unidad didáctica 9, magnetismo.*

[http://www.quimicaweb.net/grupo\\_trabajo\\_fyq3/tema9/index9.htm](http://www.quimicaweb.net/grupo_trabajo_fyq3/tema9/index9.htm). Consulta: de mayo 2015.

Se compone básicamente de dos partes principales: el estator y el rotor; el estator es el encargado de brindar soporte mecánico al motor y contiene los devanados principales de la máquina, los cuales se le conocen como polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados sobre un núcleo de hierro; el rotor es normalmente cilíndrico, que contiene también su devanado y núcleo alimentado con corriente directa a través de escobillas fijas o carbones.

Una corriente eléctrica proveniente de las baterías pasa por el conductor, el cual está sumergido en un campo magnético proveniente del imán

permanente, por lo que el conductor sufre una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente (ley de la mano derecha), lo que causa que comience a girar. A medida que gira, la corriente se activa en el conductor apropiado a través del conmutador que cambia la dirección de la misma permitiendo el giro del rotor, obteniendo así la energía mecánica deseada.

### **2.3.2.3. Generador eléctrico**

Un generador eléctrico es un aparato capaz de mantener una diferencia de cargas eléctricas o voltajes entre dos puntos llamados polos, terminales o bornes, transformando la energía mecánica en corriente alterna. Se basa en el principio de inducción electromagnética, la cual establece que si un conductor eléctrico es movido a través de un campo magnético, se inducirá una corriente eléctrica que fluirá a través del conductor. La transformación en este caso se consigue por la acción de un campo magnético actuando sobre conductores eléctricos colocados sobre una armadura llamada estator; si se produce de manera mecánica un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se generará una fuerza electromotriz. El generador utilizado en el Toyota Prius es de corriente alterna. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección es necesario invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución.

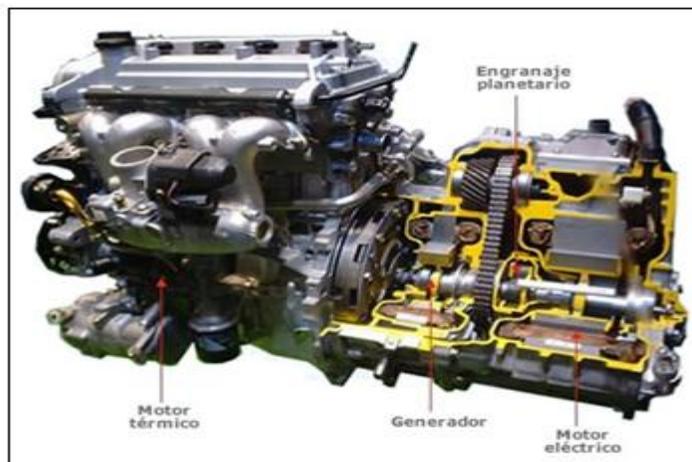
Los generadores de corriente continua normalmente, funcionan a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que pueden llegar a producirse entre las escobillas y el conmutador a altos voltajes.

#### 2.3.2.4. Transmisión

Toyota denomina a la transmisión utilizada por el Prius como *power split device*, ya que en sí, el automóvil no cuenta con una caja de cambios convencional como se tiene acostumbrado; este vehículo contiene un engranaje planetario para transmitir el movimiento a las ruedas.

Como el motor funciona siempre a una carga cercana a la máxima y un margen de revoluciones no muy amplio, era necesario una serie de engranes que fuera útil para arrancar en marcha lenta e ir a gran velocidad eventualmente con estas condiciones. Este engrane planetario tiene tres elementos:

Figura 15. **Motor Toyota Prius**

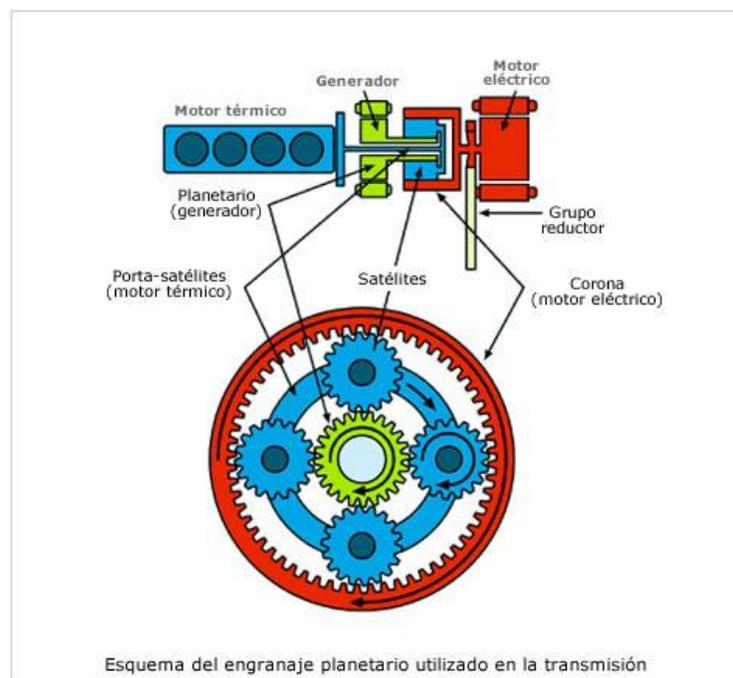


Fuente: *Vehículos híbridos*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>. Consulta: mayo de 2015.

- Engrane central o planetario: está unido al generador eléctrico
- Portasatélites: está unido al motor térmico
- Corona: unida al motor eléctrico

La clave del sistema es que el giro del generador eléctrico puede ser mayor o menor, en función de la resistencia que oponga. Si es necesario un desarrollo corto, el generador eléctrico opone una gran resistencia al movimiento, por lo que le quita fuerza al motor térmico y la envía al motor eléctrico que también impulsa las ruedas, es decir la fuerza que va al motor es siempre la misma, pero si la fuerza no llega al motor se dirige directamente a las baterías.

Figura 16. **Engranaje planetario**



Fuente: *Vehículos híbridos*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>. Consulta: mayo de 2015.

A medida que se aumenta la velocidad del vehículo, el generador eléctrico presenta menos resistencia y su giro aumenta, por lo que las baterías no intervienen en la aceleración y toda la fuerza con la que se impulsa el vehículo

proviene del motor de combustión interna. La energía que suministra el generador no depende solo de su giro, sino que el sistema puede variar o eliminar completamente el par resistente del generador para adecuar la energía que genera dependiendo de la condición de funcionamiento.

### 2.3.2.5. Batería recargable

La batería que contiene el Toyota Prius es de níquel e hidruro metálico fabricado por la empresa Panasonic, la cual proporciona 202 V, contiene 6,5 Ah de capacidad (aproximadamente 3 horas) y pesa 42 kg; esta batería es recargada a través del generador, el cual es impulsado por el motor de combustión interna; no tiene ningún tipo de conexión para conectarla a una red u otro dispositivo.

Figura 17. **Batería recargable**



Fuente: *Vehículos híbridos*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos-prius.htm>. Consulta: mayo de 2015.

Tiene la gran ventaja que no sufre del efecto memoria, ya que el sistema eléctrico está hecho para que nunca baje de cierto nivel de carga mientras el vehículo está funcionando; cuando el automóvil está parado el proceso de descarga es muy lento.

#### **2.3.2.6. Método de eliminación de los gases NOx**

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, en el inciso 1.4.1.2, dentro de las emisiones por tubo de escape se encuentran los peligrosos NOx u óxidos de nitrógeno que se presentan en los motores de combustión interna que trabajan a altas presiones y temperaturas, por ejemplo, el Toyota Prius, debido a la alta relación de compresión con la que trabaja.

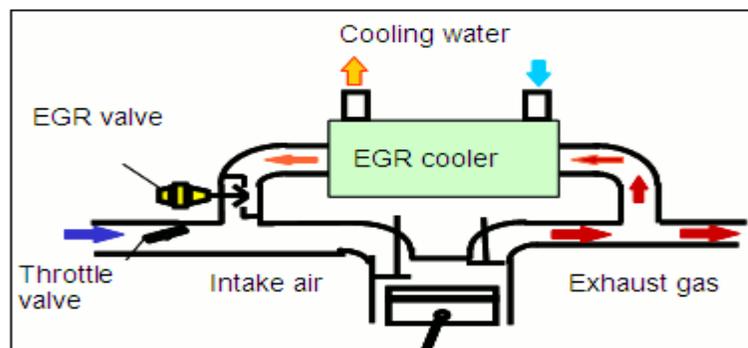
Estos gases son altamente dañinos para el ambiente, ya que reaccionan con el oxígeno del aire y forman compuestos como el monóxido de nitrógeno, bióxido de nitrógeno, entre otros, que se convierten fácilmente en ácido nítrico en presencia de la humedad en el ambiente, lo que causa la tan peligrosa lluvia ácida; además, al ser inhalada por los seres vivos, puede causar enfermedades respiratorias, es decir, hay que eliminarlo de alguna u otra manera debido a sus altas repercusiones.

Ante la necesidad de eliminar dichos compuestos, la empresa DENSO Corporation ha desarrollado su primer enfriador de gases de escape conocido como *exhaust gas recirculation* (EGR) que es 30 % más pequeño que el utilizado normalmente en el mercado, ofreciendo el mismo rendimiento; este EGR es instalado en los vehículos Toyota en sus modelos Camry y Prius C.

El sistema EGR recircula una porción de los gases de escape dentro de los cilindros, en vez de utilizar aire fresco, disminuyendo la carga del pistón, mientras se mantiene una pequeña cantidad de inyección de combustible. El efecto que se consigue es la disminución de la temperatura en la mezcla aire-combustible, aumentando la eficiencia de consumo. Esto aumenta la densidad de los gases de escape, mejorando el rendimiento el sistema EGR, reduciendo las pérdidas en el motor y alargando la vida del mismo; se estima que la utilización de dicho sistema aumenta la eficiencia del motor en aproximadamente 2 o 3 %, además de evitar la formación de compuestos NOx, presentándose como una solución perfecta al problema descrito anteriormente.

El sistema EGR de DENSO utiliza aberturas más finas, solamente de 1 mm de ancho, comparados con los modelos convencionales que presentan aberturas de hasta 4 o 5 mm, lo que le permite al sistema DENSO descargar más calor por unidad de volumen y, como se mencionó anteriormente, una disminución de tamaño del 30 % con respecto al resto con el mismo rendimiento.

Figura 18. **Funcionamiento EGR**



Fuente: *DENSO develops compact EGR cooler for gasoline engines; applied in Prius C.*  
<http://www.greencarcongress.com/2012/01/denso-20120130.html>. Consulta: abril de 2016.

## **2.4. Medidores de temperatura infrarrojos**

Un medidor de temperatura a distancia, frecuentemente llamado pirómetro de infrarrojos, es una herramienta altamente eficiente y de gran utilidad para el mantenimiento preventivo de las máquinas, ya que brinda la posibilidad de tomar datos de temperatura en rangos bastante amplios y a distancias considerables, posibilitando mediciones de áreas difíciles de alcanzar o que presentan alto riesgo a cercana distancia. Además tiene una exactitud de 0,05 por ciento, presentándose como un medidor altamente confiable utilizado incluso en laboratorios. Muchas veces se le llama erróneamente termómetro láser, ya que normalmente cuenta con un láser como asistente para garantizar una mayor exactitud de medición, utilizándose únicamente para apuntar mejor hacia el área que se desea medir; se puede asemejar a las miras utilizadas en ciertas armas, ya que no se usa para hacer la medida sino solo para apuntar.

### **2.4.1. Funcionamiento**

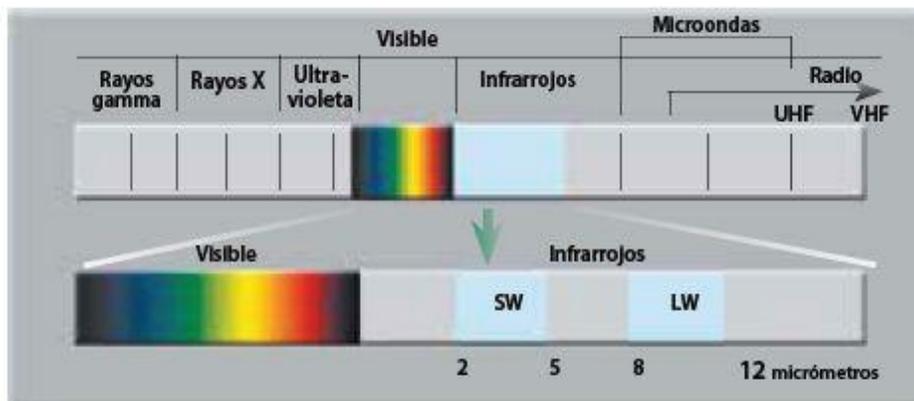
Un medidor de temperatura por infrarrojos, registra la intensidad de la radiación en la zona infrarroja del espectro electromagnético y la convierte en una imagen visible o una medición de temperatura.

Los ojos funcionan como detectores de radiación electromagnética en el espectro de luz visible, por lo que cualquier otro tipo de radiación fuera de dicho espectro, como los infrarrojos, es invisible para el ojo humano. Este fenómeno fue descubierto por el astrónomo Sir Frederick William Herschel, a partir de la diferencia térmica mostrada por los distintos colores de la luz solar al pasar a través de un prisma de cristal, formando un espectro del cual midió la temperatura de cada partición, descubriendo que las temperaturas de los colores aumentaban a medida que se acercaban al rojo. Al medir más allá del

punto rojo del espectro se percató del aumento de temperatura notable que presentaba dicha región, a lo que se denominó: infrarrojo.

La fuente principal de radiación de los infrarrojos es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que se encuentre sobre el cero absoluto (-273 C), emite radiación infrarroja, incluso los objetos más fríos y, aunque los ojos no lo vean, los nervios de la piel lo perciben como calor; mientras más caliente es un objeto, mayor radiación infrarroja emite.

Figura 19. **Espectro electromagnético**



Fuente: FLIR. *Guía de termografía para mantenimiento predictivo*. p. 7.

Bajo ese mismo principio se basa un medidor infrarrojo; un objeto cualquiera es enfocado con el sistema óptico del medidor sobre un detector de infrarrojos, el detector envía los datos al sensor electrónico que traduce la señal radiante en una señal de temperatura ya sea digital o análoga. En realidad, lo que mide un pirómetro de infrarrojos no es la temperatura, sino la radiación térmica o cantidad de energía radiante emitida por el objeto, lo cual traduce en temperatura.

### **2.4.2. Aplicaciones**

Como se pudo notar en el inciso anterior, los termómetros de infrarrojos son muy confiables y útiles para lecturas de temperatura en un punto específico con alta precisión, sin embargo, si se necesitara una medición de temperatura de un área específica y no un punto, entonces el medidor de temperatura no es lo más recomendable, sino una cámara termográfica, que funciona bajo el mismo principio, pero con la diferencia que en vez de convertir una sola señal de radiación en una señal de salida, percibe miles de señales de miles de puntos detectados en el visor del medidor para convertirlo en una imagen.

Los medidores de temperatura son altamente utilizados en el área de mantenimiento preventivo de máquinas, tanto térmicas como mecánicas y eléctricas, ya que permiten la detección de puntos con temperaturas más altas de lo normal o de lo recomendado por el fabricante, dando lugar a posibles fallas, acumulaciones de esfuerzos, incendios, entre otros. Se suelen utilizar en sistemas eléctricos para detectar áreas que transportan alta tensión, motores de combustión interna, tuberías, calderas, motores eléctricos, entre otros.



### 3. COMPARACIÓN TÉRMICA DE CICLOS ATKINSON Y OTTO

Como se mencionó en la teoría, se utilizarán los diagramas representativos de cada ciclo para realizar los cálculos respectivos y obtener los datos que sean necesarios en la comparación final entre ambos tipos de motores. A continuación los cálculos y su justificación:

#### 3.1. Toyota Yaris (ciclo Otto)

Para lograr armar el ciclo termodinámico, es necesario un procedimiento para la recolección de datos, el cual se muestra a continuación.

##### 3.1.1. Datos necesarios

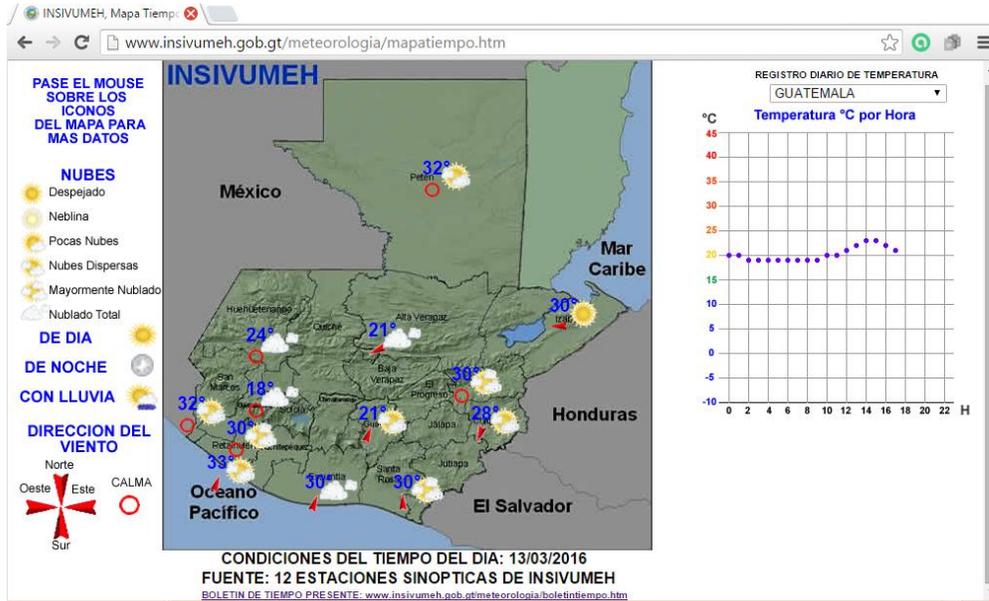
Según los datos tomados del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) de Guatemala, el 13 de marzo del 2016 a las 12 del mediodía, día y hora en la que se tomaron las mediciones, se tuvo una temperatura de 20 C (ver figura 20)

Además, según el Insivumeh, en la ciudad capital se tiene una presión más o menos constante de 640 mmHg, pero estos datos se requieren en el sistema internacional, por lo que:

$$P_{prom} = 640 \text{ mmHg} * \frac{133,32 \text{ Pa}}{1 \text{ mmHg}} = 85,32 \text{ kPa}$$

$$T_{prom} = 20^{\circ} + 273,15 = 293,15K$$

Figura 20. Datos de temperatura 13 de marzo de 2016



Fuente: *Condiciones del tiempo del día*. [www.insivumeh.gov.gt/meteorologia/mapatiempo.htm](http://www.insivumeh.gov.gt/meteorologia/mapatiempo.htm).  
 Consulta: marzo de 2016.

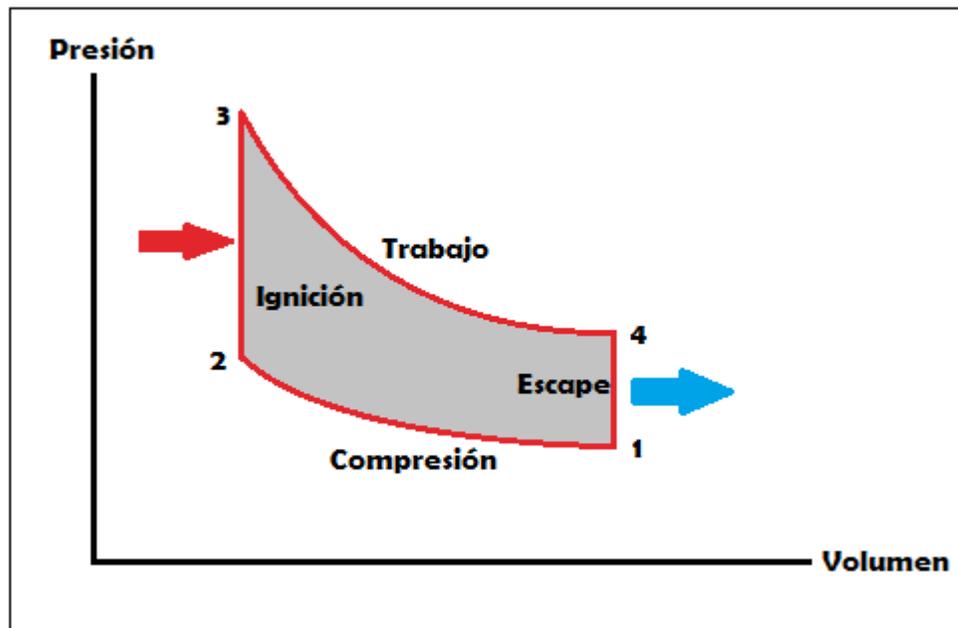
Utilizando la figura 21 como guía, esta presión y temperatura se podría utilizar como las condiciones del punto 1 del diagrama, es decir antes de iniciar la compresión.

El verdadero dilema se encuentra en la obtención de datos en cualquiera de los otros puntos del diagrama de la manera más apegada a la realidad de los que sucede dentro del cilindro, tanto para la ignición como para la del trabajo, por lo que se decidió tomar los datos lo más exacto posible, con la ayuda de Toyota Guatemala® y utilizando un medidor de temperatura a distancia o un pirómetro de temperatura marca Fluke®, tomando la temperatura de los gases de escape de ambos automóviles (ver apéndices), obteniendo así la temperatura en el punto 4 del diagrama. Los datos obtenidos fueron los siguientes:

$$T_{Sy} = 191^{\circ}C + 273.15 = 464.15K$$

$$T_{Sp} = 271^{\circ}C + 273.15 = 544.15K$$

Figura 21. **Diagrama del ciclo Otto**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Word.

Siendo  $T_{Sy}$  la temperatura de salida del Yaris y  $T_{Sp}$  la temperatura de salida del Prius. Además de la ficha técnica (ver anexos 2 y 3) brindada por Toyota Guatemala® y datos en su página web [toyota.com.gt](http://toyota.com.gt) se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla I.

Tabla I. **Datos fichas técnicas**

	<b>Yaris</b>	<b>Prius</b>
<b>Relación de compresión</b>	10,5:1	13:1
<b>Cilindrada</b>	1 497cc	1 496cc
<b>Potencia máxima</b>	107HP	73HP
<b>Torque máximo</b>	141Nm	111Nm
<b>Consumo de combustible</b>	6,80 L/100km	3,90 L/100km

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2. Cálculos

Para realizar los cálculos se tomarán varias suposiciones para aproximar el ciclo lo más cercano a lo real, pero tomando como referencia el ideal para entender el comportamiento del mismo en cada carrera. Se toman como verdaderas y aplicables las suposiciones de aire estándar; se consideran intrascendentes los cambios de energía cinética y potencial en el sistema y se considerará la variación de los calores específicos debido a los cambios de temperatura durante el proceso de combustión. Se trabajarán con dos puntos decimales para estandarizar la manera de mostrar los datos.

Entonces, ya con las suposiciones aclaradas, para resolver el problema utilizando el Toyota Yaris, se tienen los siguientes datos:

$$P_1 = 85,32 \text{ kPa} \quad T_4 = 434,15 \text{ K}$$

$$RC = 10,5 \quad T_1 = 293,15 \text{ K}$$

### 3.1.2.1. Punto de compresión

Para el punto 1 se tiene una temperatura de 293,15 K y para obtener los datos necesarios en el ciclo, se utilizarán las tablas de gas ideal de aire del libro *Termodinámica* de Cengel, tabla A-17 del anexo 3. En dicha tabla se tienen datos de temperatura en los que no figura el dato anteriormente mencionado, por lo que se tendrá que interpolar:

La ecuación de interpolación es:

$$y = y_a + (x - x_a) * \frac{(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)} \quad \text{[Ecuación 23]}$$

En donde a y b son los datos de los extremos y x el dato que se conoce, por consiguiente se tendría lo descrito en la tabla II:

Tabla II. Datos de interpolación punto 1 ciclo Otto

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
290	206,91	676,10
293,15	u1	v1
295	210,49	647,90

Fuente: elaboración propia.

$$u_1 = 206,91 + (293,15 - 290) * \frac{(210,49 - 206,91)}{(295 - 290)}$$

$$u_1 = 209,17 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_{r1} = 676,1 + (293,15 - 290) * \frac{(647,9 - 676,1)}{(295 - 290)}$$

$$v_{r1} = 658,33$$

### 3.1.2.2. Punto de ignición

Para tomar los datos del punto dos se necesitará ayuda de la teoría; entre el punto 1 y el 2, según la figura 8, se tiene un proceso a entropía constante, por lo que se toma como verdadero el comportamiento de un gas ideal bajo compresión isentrópica. En otras palabras:

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{RC} \quad \text{[Ecuación 24]}$$

Despejando el dato de interés ( $v_{r2}$ ) se obtendría:

$$v_{r2} = \frac{v_{r1}}{RC} \quad \text{[Ecuación 25]}$$

Sustituyendo datos en la ecuación 25 se puede encontrar el volumen específico en 2, es decir:

$$v_{r2} = \frac{658,33}{10,5} = 62,70$$

En la tabla A-17 (anexo 3) no se tiene este dato exacto, por lo que hay que interpolar de nuevo.

Obteniendo:

$$u_2 = 528,14 + (62,70 - 64,53) * \frac{(528,14 - 536,07)}{(64,53 - 62,13)}$$

$$u_2 = 534,19 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_2 = 720 + (62,70 - 64,53) * \frac{(720 - 730)}{(64,53 - 62,13)}$$

$$T_2 = 727,63 K$$

Tabla III. Datos de interpolación punto 2 ciclo Otto

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
720	528,14	64,53
T2	u2	62,70
730	536,07	62,13

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2.3. Punto de escape

Para el punto 4 se utilizará el dato de temperatura tomado directamente del colector de escape del Toyota Yaris, es decir, que la temperatura en el punto 4 es de 434,15 K, entonces es necesario interpolar de nuevo, como se indica en la tabla IV.

Obteniendo:

$$u_4 = 329,97 + (464,15 - 460) * \frac{(337,32 - 329,97)}{(470 - 460)}$$

$$u_4 = 333,02 \frac{kJ}{kg}$$

Tabla IV. Datos de interpolación punto 4 ciclo Otto

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
460	329,97	211,40
464,15	u4	v4
470	337,32	200,10

Fuente: elaboración propia.

$$v_{r4} = 211,4 + (464,15 - 460) * \frac{(200,1 - 211,4)}{(470 - 460)}$$

$$v_{r4} = 206,71$$

#### 3.1.2.4. Punto de trabajo

Para el análisis del punto 3 se utilizará el mismo principio del punto 2, pero en vez de una compresión isentrópica, se tendrá una expansión isentrópica entre los puntos 3 y 4, por lo que se pueden relacionar sus valores de volumen específico y la relación de compresión de la siguiente manera:

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{v_4}{v_3} = RC \quad \text{[Ecuación 26]}$$

Despejando la ecuación, se puede obtener el volumen específico en el punto 3:

$$v_{r3} = \frac{v_{r4}}{RC} \quad \text{[Ecuación 27]}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación 27 se obtiene:

$$v_{r3} = \frac{206,71}{10,5} = 19,69$$

Este dato, como era de esperarse, no se encuentra de manera exacta en la tabla A17, entonces se interpolará, como se muestra en la tabla V.

Tabla V. Datos de interpolación punto 3 ciclo Otto

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
1 080	827,88	19,98
T3	u3	19,69
1 100	845,33	18,90

Fuente: elaboración propia.

Obteniendo:

$$u_3 = 827,88 + (19,69 - 19,98) * \frac{(845,33 - 827,88)}{(18,90 - 19,98)}$$

$$u_3 = 832,57 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_3 = 1 080 + (19,69 - 19,98) * \frac{(1 100 - 1 080)}{(18,90 - 19,98)}$$

$$T_3 = 1 085,37 K$$

### 3.1.2.5. Resumen de puntos de ciclo Otto

Con los datos necesarios en cada uno de los puntos, se puede resumir el comportamiento del ciclo con la tabla VI.

Tabla VI. Resumen de puntos del ciclo Otto

	Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
Punto 1	293,15	209,17	658,33
Punto 2	727,63	534,19	62,70
Punto 3	1 085,37	832,57	19,69
Punto 4	464,15	333,02	206,71

Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2.6. Calor de salida

Para el cálculo del calor de salida es necesario fijarse en los puntos 1 y 4, ya que entre ambos sucede el escape de los gases residuales de la combustión, por lo que:

$$q_{salida} = u_4 - u_1 \quad \text{[Ecuación 28]}$$

Sustituyendo los datos de la tabla VI en la ecuación se obtiene:

$$q_{salida} = 333,02 - 209,17$$
$$q_{salida} = 123,85 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.1.2.7. Calor de entrada

Dentro del análisis realizado en el marco teórico, el calor de entrada sucede entre los puntos 2 y 3, entonces:

$$q_{entrada} = u_3 - u_2 \quad \text{[Ecuación 29]}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$q_{entrada} = 832,57 - 534,19$$

$$q_{entrada} = 298,38 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.1.2.8. Trabajo neto

Según la teoría analizada, el trabajo neto es el calor de entrada menos el calor de salida (ecuación 8), entonces:

$$w_{neto} = 298,38 - 123,85$$

$$w_{neto} = 174,53 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.1.2.9. Eficiencia térmica

Ahora se tomará como referencia la ecuación 10, en donde la eficiencia térmica es el valor del trabajo neto sobre la entrada de calor, es decir:

$$\eta_{t\acute{e}rmica} = \frac{174,53}{298,38}$$

$$\eta_{t\acute{e}rmica} = 0,5849 = 58,49 \%$$

### 3.1.2.10. Presi3n media efectiva

En la ecuaci3n 12 se defini3 la manera de obtener la presi3n media efectiva:

$$PME = \frac{W_{neto}}{v_1 - v_2}$$

Hace falta el valor del volumen en el punto 1, el cual se puede obtener despejando de la ecuaci3n de los gases ideales seg3n la ecuaci3n 14.

$$v_1 = \frac{R * T_1}{M_{aire} * P_1} \quad \text{[Ecuaci3n 30]}$$

Donde

$$R = 8,314 * 10^{-3} \text{ bar} * \text{m}^3 \text{ kmol} * K$$

$$M_{aire} = 28,97 \text{ g mol}$$

Sustituyendo en la ecuaci3n 30:

$$v_1 = \frac{8,314 * 10^{-3} * 293,15}{28,97 * 0,8532} = 0,9861 \text{ m}^3 \text{ kg}$$

Ahora, para el cálculo del volumen en 2 se sustituyen datos en la ecuación 15:

$$v_2 = \frac{v_1}{RC} = \frac{0,9861}{11} = 0,08965 \text{ m}^3 \text{ kg}$$

Sustituyendo la ecuación 12 con los valores obtenidos y los datos de la tabla VI se puede obtener el valor de la PME:

$$PME = \frac{174,53 \text{ kJ/Kg}}{(0,9861 - 0,08965) \text{ m}^3 \text{ kg}} * \frac{\text{bar} * \text{m}^2}{10^5 \text{ N}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}$$

$$PME = 1,95 \text{ bar}$$

### 3.1.2.11. Resumen de ciclo Otto

Los datos del ciclo Otto obtenidos en los cálculos anteriores se muestran en la tabla VII.

Tabla VII. Resumen datos Toyota Yaris

Dato	Valor
Calor de salida (kJ/kg)	123,85
Calor de entrada(kJ/kg)	298,38
Trabajo neto(kJ/kg)	174,53
Eficiencia térmica (%)	58,49
PME (bar)	1,95

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Toyota Prius (ciclo Atkinson)

Así como en los cálculos del ciclo Otto, en el caso del ciclo Atkinson se requiere una recopilación de datos y su posterior uso con apoyo de las ecuaciones deducidas en la teoría, para la ejecución de cálculos adecuados y acorde a la realidad, como se muestra a continuación.

#### 3.2.1. Datos necesarios

En el caso del ciclo Atkinson, se tomarán las mismas suposiciones que para el ciclo Otto, pero esta vez se tendrá como referencia la figura 22, como se puede apreciar, es distinto al ciclo Otto (figura 21). Siempre se trabajarán con dos decimales.

Con estas aclaraciones se puede proseguir con los cálculos y estos serían los datos a tomar en cuenta:

$$RC = 13 \quad T_4 = 544,15 \text{ K}$$

$$T_1 = 293,15 \text{ K} \quad P_1 = 85,32 \text{ kPa}$$

#### 3.2.2. Cálculos

Para realizar los cálculos del ciclo Atkinson se lleva a cabo un procedimiento parecido al ciclo Otto, difiriendo solamente en el lapso de adición de calor, como se puede apreciar a continuación.

### 3.2.2.1. Punto de admisión

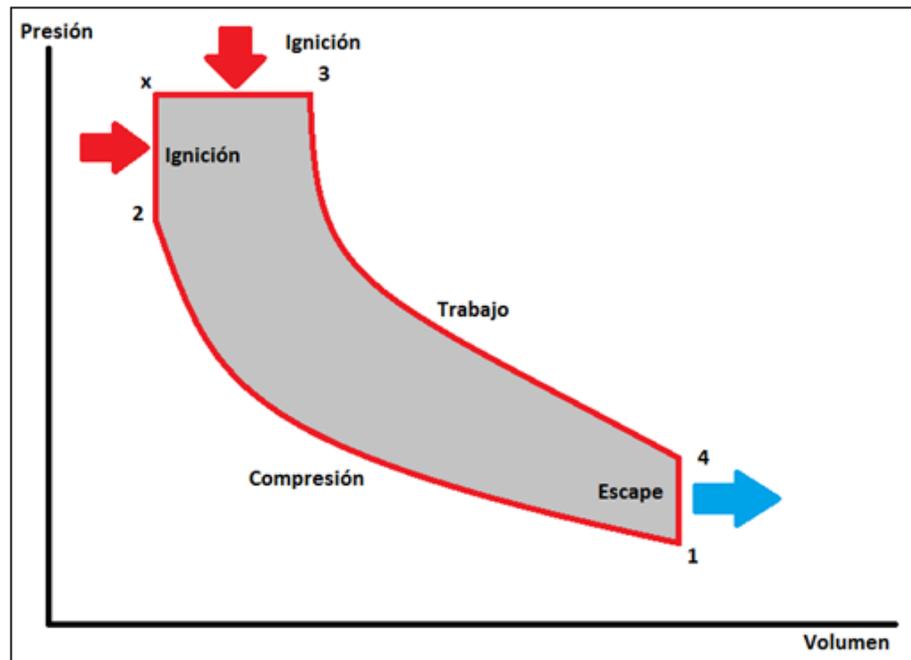
Las condiciones en el punto 1 son las mismas que en el ciclo Otto, ya que se tomaron a la misma temperatura y presión atmosférica, entonces:

$$T_1 = 293,15 \text{ K}$$

$$u_1 = 209,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_{r1} = 658,33$$

Figura 22. Diagrama del ciclo Atkinson



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Word.

### 3.2.2.2. Punto de ignición a volumen constante

Siguiendo las bases del comportamiento de un gas ideal bajo compresión isentrópica y la ecuación 25 utilizada para los cálculos del ciclo Otto se tendrían los siguientes resultados:

$$v_{r2} = \frac{658,33}{13} = 50,64$$

En la tabla A-17 (anexo 3), no se tiene este dato exacto, por lo que hay que interpolar:

Tabla VIII. Datos de interpolación punto 2 ciclo Atkinson

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
780	576,12	51,64
T2	u2	50,64
800	592,30	48,08

Fuente: elaboración propia.

Obteniendo:

$$u_2 = 576,12 + (50,64 - 51,64) * \frac{(592,30 - 576,12)}{(48,08 - 51,64)}$$

$$u_1 = 580,66 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_2 = 780 + (50,64 - 51,64) * \frac{(800 - 780)}{(48,08 - 51,64)}$$

$$T_2 = 785,62 K$$

### 3.2.2.3. Punto de escape

Al igual que en el análisis del Toyota Yaris, se tomará la temperatura del colector de escape del automóvil como la temperatura en 4 (escape), siendo esta 544,15 K, entonces es necesario interpolar de nuevo.

Tabla IX. Datos de interpolación punto 4 ciclo Atkinson

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	$v_r$
540	389,34	139,70
544,15	$u_4$	$v_4$
550	396,86	133,10

Fuente: elaboración propia.

Obteniendo:

$$u_4 = 389,34 + (544,15 - 540) * \frac{(396,86 - 389,34)}{(550 - 540)}$$

$$u_4 = 392,46 \frac{kJ}{kg}$$

$$v_{r4} = 139,7 + (544,15 - 540) * \frac{(133,1 - 139,7)}{(550 - 540)}$$

$$v_{r4} = 136,96$$

Habiendo obtenido los datos en el punto 4, se proseguirá al análisis del punto 3 de la misma manera que en el ciclo Otto, solamente que esta vez se presentan variables a la hora del cálculo del calor.

### 3.2.2.4. Punto de trabajo

Retomando el análisis del ciclo Otto en este mismo punto y con base en la ecuación 27, se puede calcular el volumen específico; sustituyendo los datos en la ecuación mencionada se obtiene:

$$v_{r3} = \frac{136,96}{13} = 10,54$$

Al no encontrarse el dato de manera exacta en la tabla A17 (anexo 3), se interpolará:

Tabla X. Datos de interpolación punto 3 ciclo Atkinson

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
1 320	1 040,88	10,75
T3	u3	10,54
1 340	1 058,94	10,25

Fuente: elaboración propia.

Obteniendo:

$$u_3 = 1\,040,88 + (10,54 - 10,75) * \frac{(1\,058,94 - 1\,040,88)}{(10,25 - 10,75)}$$

$$u_3 = 1\,048,47 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_3 = 1\,320 + (10,54 - 10,75) * \frac{(1\,340 - 1\,320)}{(10,25 - 10,75)}$$

$$T_3 = 1\,328,40 K$$

### 3.2.2.5. Punto de ignición a presión constante

Ahora, para encontrar los valores en el punto x, es necesario apoyarse en la teoría; según lo planteado en el inciso 2.2, la relación de corte del motor del Toyota Prius podría tomarse como 2 a 1, es decir, que el volumen en el punto 3 debe de ser el doble que en el punto “x” y, debido a que la válvula de admisión se cierra aproximadamente a la mitad de la carrera de ignición, significando que la mitad del calor aportado por el sistema sucede a volumen constante y la otra mitad a presión constante. Entonces el volumen específico relativo total se reparte la mitad de 2 a “x” y la otra mitad de “x” a 3, por lo que:

$$v_{rx} = v_{r3} + \frac{v_{r2} - v_{r3}}{2} = 10,54 + \frac{50,64 - 10,54}{2}$$

$$v_{rx} = 30,59$$

Este dato no se encuentra en la tabla A17 (anexo 3) de manera exacta, por lo que se debe interpolar.

Obteniendo:

$$u_x = 691,28 + (30,59 - 32,18) * \frac{(708,08 - 691,28)}{(30,22 - 32,18)}$$

$$u_x = 704,91 \frac{kJ}{kg}$$

$$T_x = 920 + (30,59 - 32,18) * \frac{(940 - 920)}{(30,22 - 32,18)}$$

$$T_x = 936,22 K$$

Tabla XI. Datos de interpolación punto “x” ciclo Atkinson

Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
920	691,28	32,18
Tx	ux	30,59
940	708,08	30,22

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2.6. Resumen de puntos del Toyota Prius (ciclo Atkinson)

Terminados los cálculos en cada punto del diagrama, estos se resumen en la tabla XII.

Tabla XII. Resumen de puntos Prius (ciclo Atkinson)

	Temperatura (K)	u (kJ/kg)	vr
Punto 1	293,15	209,17	658,33
Punto 2	785,62	580,66	50,64
Punto “x”	936,22	704,91	30,59
Punto 3	1 328,40	1 048,47	10,54
Punto 4	544,15	392,46	136,96

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2.7. Calor de salida

Según la ecuación 28, el calor de salida es la energía interna en el punto 4 menos la energía interna el punto 1; sustituyendo los datos de la tabla XII en la ecuación se obtiene:

$$q_{salida} = 392,46 - 209,17$$

$$q_{salida} = 183,29 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.2.2.8. Calor de entrada

En el análisis del ciclo Otto se mostró la ecuación 29, en donde el calor de entrada es la diferencia entre la energía entre el punto 2 y el punto 3, pero esta vez su utilizará la ecuación 19 en donde el calor aportado es la diferencia entre la energía interna en el punto "x" y el punto "2" sumado a la diferencia entre la energía interna entre el punto "3" y el punto "x"; sustituyendo en la ecuación:

$$q_{entrada} = 704,91 - 580,66 + (1\ 048,47 - 704,91)$$

$$q_{entrada} = 467,81 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.2.2.9. Trabajo neto

Para el trabajo neto se calculará con la diferencia entre el calor de entrada y el calor de salida, es decir:

$$w_{neto} = 467,81 - 183,29$$

$$w_{neto} = 284,52 \frac{kJ}{kg}$$

### 3.2.2.10. Eficiencia térmica

En la teoría, la ecuación 22 era la que definía la eficiencia térmica del ciclo Atkinson truncado, y sustituyendo los datos anteriores se obtiene:

$$\eta_{térmica} = \frac{284,52}{467,70}$$

$$\eta_{térmica} = 0,6081 = 60,81 \%$$

### 3.2.2.11. Presión media efectiva

El volumen en el punto 1 sigue siendo el mismo en el ciclo Atkinson, ya que las condiciones de entrada no cambiaron, pero debido al aumento de la relación de compresión, el volumen en 2 varió de la siguiente manera:

$$v_2 = \frac{v_1}{RC} = \frac{0,9861}{13} = 0,07585 m^3$$

Sustituyendo la ecuación 12 con los valores obtenidos y los datos de la tabla XII se puede obtener el valor de la PME:

$$PME = \frac{284,52 \text{ kJ/Kg}}{(0,9861 - 0,07585) m^3} * \frac{bar * m^2}{10^5 N} * \frac{1000 g}{1 kg}$$

$$PME = 3,13 \text{ bar}$$

### 3.2.2.12. Resumen de datos del Toyota Prius (ciclo Atkinson)

A partir de los cálculos realizados anteriormente, los datos del ciclo Atkinson se pueden ordenar como se muestra en la tabla XIII.

Tabla XIII. Resumen datos Toyota Prius

Dato	Valor
Calor de salida (kJ/kg)	183,29
Calor de entrada(kJ/kg)	467,81
Trabajo neto(kJ/kg)	284,52
Eficiencia térmica (%)	60,83
PME (bar)	3,13

Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Comparación de datos

Para la comparación de datos, se analizará punto por punto de cada diagrama para encontrar diferencias en temperatura, volumen específico relativo y energía interna, para culminar con una comparación mecánica con los datos obtenidos a partir de la fichas técnicas brindadas por Toyota Guatemala®.

### 3.3.1. Comparación punto por punto

Para una mejor visualización de las diferencias entre ambos ciclos termodinámicos, se compararán los tres datos básicos que se utilizaron durante todo el análisis; temperatura, energía interna y volumen específico relativo.

#### 3.3.1.1. Temperatura

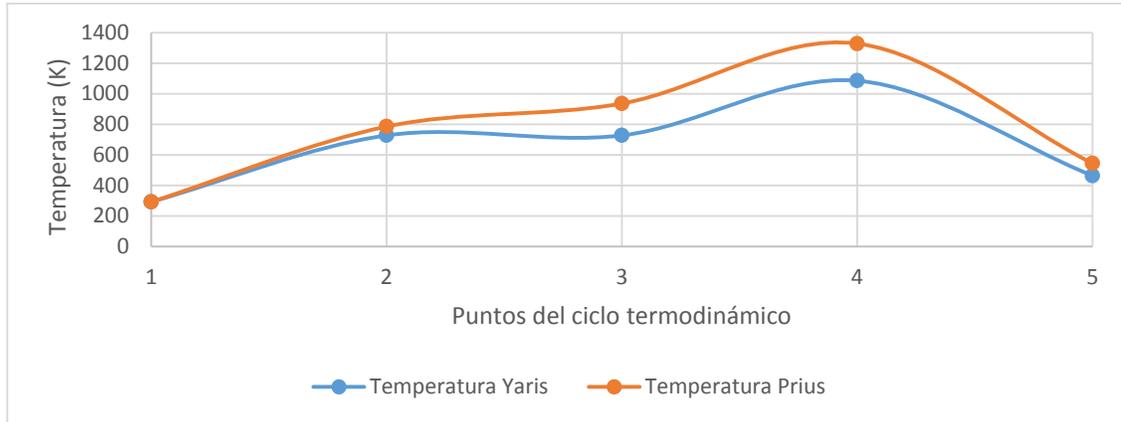
Los datos de temperatura por puntos se muestran en la tabla XIV, la cual se utilizará como referencia para la comparación de temperaturas mostrada en la figura 23.

Tabla XIV. **Comparación de temperaturas**

	Temperatura Yaris	Temperatura Prius
<b>Punto 1</b>	293,15	293,15
<b>Punto 2</b>	727,63	785,62
<b>Punto "x"</b>	-	936,22
<b>Punto 3</b>	1 085,37	1 328,40
<b>Punto 4</b>	464,15	544,15

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Comparación de temperaturas**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

### 3.3.1.2. **Energía interna**

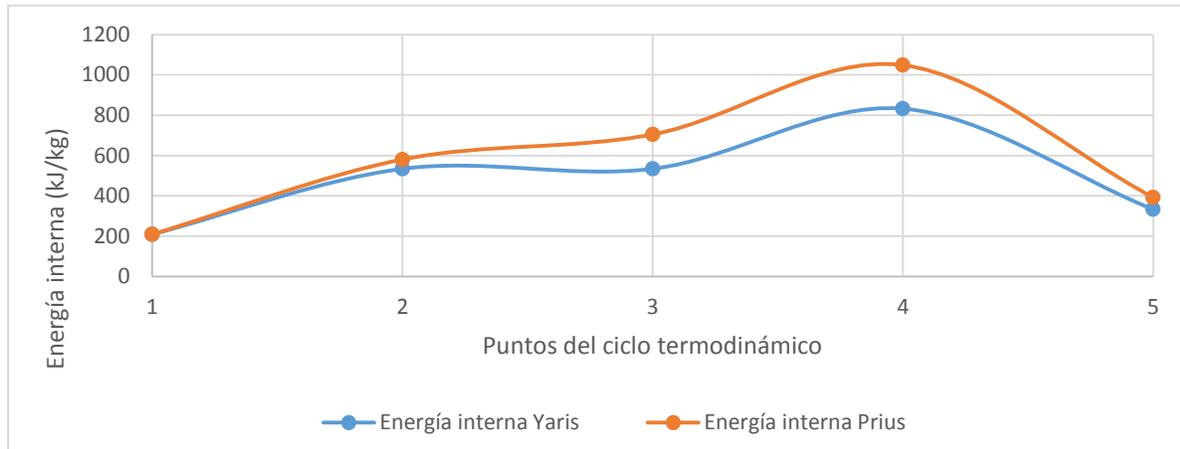
Los datos de comparación de energía interna se muestran en la tabla XV.

Tabla XV. **Comparación de energía interna**

	Energía interna Yaris	Energía interna Prius
<b>Punto 1</b>	209,17	209,17
<b>Punto 2</b>	534,19	580,66
<b>Punto "x"</b>	-	704,91
<b>Punto 3</b>	832,57	1 048,47
<b>Punto 4</b>	333,02	392,46

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Comparación de energía interna**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

### 3.3.1.3. **Volumen específico relativo**

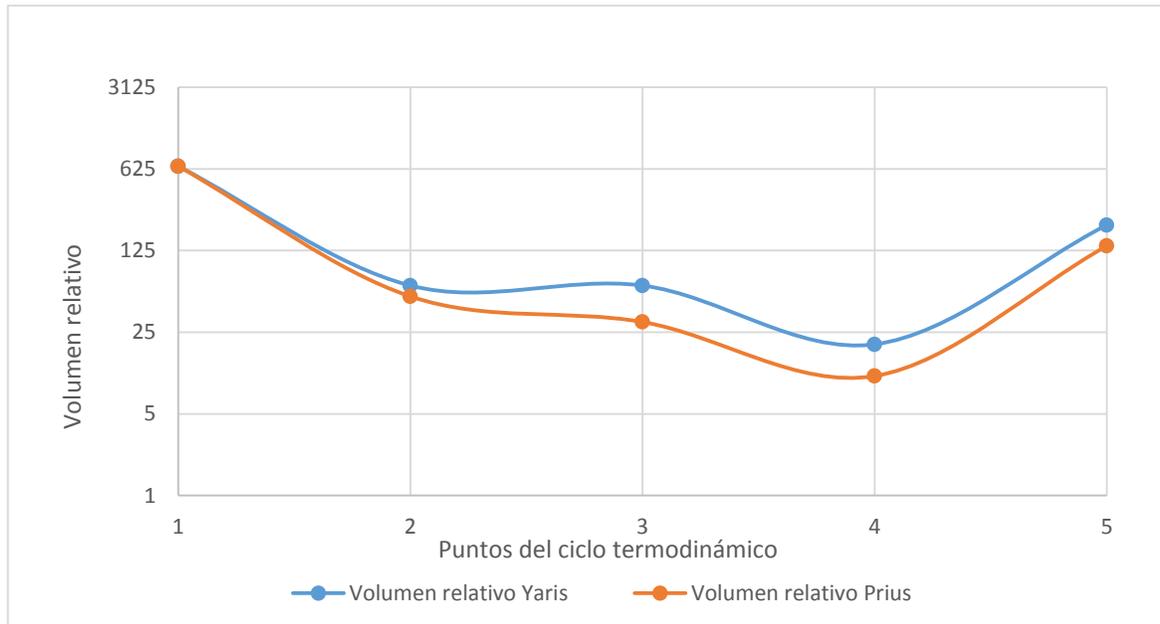
Los datos de comparación del volumen específico relativo se muestran en la tabla XVI.

Tabla XVI. **Comparación de volumen específico relativo**

	Volumen específico relativo Yaris	Volumen específico relativo Prius
<b>Punto 1</b>	658,33	658,33
<b>Punto 2</b>	62,70	50,64
<b>Punto "x"</b>	-	30,59
<b>Punto 3</b>	19,69	10,54
<b>Punto 4</b>	206,71	136,96

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Comparación de volumen específico relativo**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel.

### 3.3.2. **Comparación general**

Para la comparación general de ambos motores, se realizará una gráfica resumen, la cual se puede apreciar en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Tabla resumen de comparación Yaris – Prius**

<b>Comparación térmica</b>		
	<b>Toyota Yaris</b>	<b>Toyota Prius</b>
<b>Temperatura de gases de escape (K)</b>	464,15	544,15
<b>Calor de salida (kJ/kg)</b>	123,85	183,29
<b>Calor de entrada (kJ/kg)</b>	298,38	467,81
<b>Trabajo neto (kJ/kg)</b>	174,53	284,52
<b>Eficiencia térmica (%)</b>	58,49	60,83
<b>PME (bar)</b>	1,95	3,12
<b>Comparación mecánica</b>		
<b>Relación de compresión</b>	10,5:1	13:1
<b>Potencia máxima (HP)</b>	107	73
<b>Torque máximo (Nm)</b>	141	111
<b>Consumo de combustible (L/100km)</b>	6,80	3,90

Fuente: elaboración propia.

## 4. OBSERVACIONES

### 4.1. Temperaturas

Una de las notables diferencias entre los dos ciclos termodinámicos discutidos en este estudio, fueron las temperaturas de trabajo; como se puede observar en el los apéndices, en el pirómetro de temperatura se observó que en el colector de escape, la temperatura del Toyota Prius era 80 °C más alta que en el Toyota Yaris, diferencia que no solo se hizo presente en el medidor, sino también al tacto, ya que con tan solo esperar 8 a 10 minutos en lo que los automóviles alcanzaban su temperatura normal de operación, al abrir el capó se pudo sentir una emanación de calor mucho mayor en el Prius que en el Yaris, lo cual se manifestó también en la medida tomada.

A lo largo de los cálculos se pudo observar una diferencia de temperaturas en cada uno de los puntos analizados, exceptuando el primero, como se observa en la tabla XVII.

Como se puede observar, la diferencia de temperaturas se incrementa a medida que la mezcla es comprimida, alcanzando su punto de mayor compresión en el punto 3 de ambos diagramas, en donde se alcanzan hasta 243,09 K de diferencia. Esto se debe a que a mayor presión, mayor energía, lo cual se traduce en mayor temperatura (que de por sí se define como la medida del nivel de actividad molecular causado por la velocidad de vibración, lo cual se traduce en calor ganado o energía). Entonces, ante este aumento de energía, se obtiene una mayor temperatura de trabajo en el ciclo Atkinson que en el ciclo Otto.

Tabla XVIII. **Diferencia de temperaturas entre ciclos**

<b>Punto del ciclo</b>	<b>Diferencia de temperaturas entre ciclos (K)</b>
<b>1</b>	0
<b>2</b>	57,99
<b>3</b>	243,03
<b>4</b>	80

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2. Energía interna**

La energía interna hace referencia las formas microscópicas de energía presentes en las sustancias y procesos, es decir se relaciona con la estructura molecular de un sistema y el grado de actividad molecular; la suma de todas las formas microscópicas de energía se denomina energía interna.

Como ya se pudo observar, la diferencia de temperaturas entre ciclos hace evidente un cambio de actividad molecular, es decir, un cambio de energía interna, el cual se puede observar en la tabla XVIII.

Al igual que para la temperatura, la diferencia de energía interna se hace realmente notable en el punto de máxima compresión, es decir el punto 3, en donde el ciclo Atkinson tiene un 215,9 kJ/kg más de energía interna, es decir, casi un 26 % más de energía disponible para el uso del ciclo y convertirlo en trabajo.

Tabla XIX. **Diferencia de energía interna entre ciclos**

<b>Punto del ciclo</b>	<b>Diferencia de energía interna entre ciclos (kJ/kg)</b>
<b>1</b>	0
<b>2</b>	46,47
<b>3</b>	215,90
<b>4</b>	59,44

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de trabajo producido a partir del calor generado por la combustión, está limitado por supuesto, por el calor de salida cumpliendo la segunda ley de la termodinámica (la energía tiene un orden y una dirección, es decir es necesario una pérdida de energía para que se complete un ciclo termodinámico, ya que la irreversibilidades hacen imposible obtener un 100 % de eficiencia termodinámica).

Claro está que de nuevo el aumento de la relación de compresión se hace presente en los parámetros medidos en el análisis termodinámico de ambos ciclos; el ciclo Atkinson ante la mayor compresión de la mezcla, aumenta la actividad molecular, produciendo así un aumento de temperatura y energía interna, como ya se pudo discutir en los anteriores párrafos.

#### **4.3. Volumen específico relativo**

En el caso de los procesos isentrópicos de los gases ideales, se tiene una relación de volúmenes entre dos puntos en función de una temperatura (ya que la presión se considera constante); el volumen específico relativo es eso mismo,

una relación adimensional de la variación de dos volúmenes específicos con respecto a un cambio de temperatura.

En el caso de la comparación térmica, también se pudo observar un cambio en los volúmenes específicos relativos entre ambos ciclos, aunque no fue tan marcada como en la temperatura y la energía interna. Esto se puede observar claramente en la tabla XX.

Tabla XX. **Diferencia de volumen específico relativo entre ciclos**

<b>Punto del ciclo</b>	<b>Diferencia de volumen específico entre ciclos</b>
<b>1</b>	0
<b>2</b>	12,06
<b>3</b>	9,15
<b>4</b>	69,75

Fuente: elaboración propia.

Ahora se nota un efecto contrario que en las dos comparaciones anteriores: a mayor compresión (punto 3), menor diferencia de volumen específico relativo, pero, como se observó los incisos 4.1 y 4.2, la diferencia de temperatura y de energía interna aumenta con el aumento de la compresión. Ahora surge la incógnita: ¿Por qué?

La razón es por el comportamiento que tiene el volumen específico relativo con respecto a la temperatura y la energía interna; el volumen específico relativo en vez de incrementarse junto con la temperatura de operación como lo hace la energía interna, disminuye debido a que como se explicó en el inciso

4.1, mientras mayor sea la presión mayor será la temperatura, es decir, mientras más prensada esté la mezcla, más calor emitirá a la hora de combustionar y por esta mayor presión, la relación de volúmenes específicos será menor.

Esto es claramente visible en la tabla que se utilizó como referencia (A17), en donde la energía interna cambia en menor proporción a bajas temperaturas que a altas, y como se pudo observar en los cálculos realizados en el punto 3, una diferencia de volúmenes relativos específicos de solamente 9.15, causó una diferencia de energías internas de 215,9 kJ/kg, mientras que en el punto 2 una diferencia de 12,06 causó un cambio de energías internas de tan solo 46,47 kJ/kg debido a las diferentes temperaturas en las que operan, a tal punto que en dicha tabla, entre 2 200 K y 2 250 K, una diferencia de solamente 0,148 en el volumen específico relativo, causa un incremento de 48,9 kJ/kg.

Este comportamiento es muy marcado en los ciclos termodinámicos, como por ejemplo, en el ciclo Diésel en el que se trabajan relaciones de compresión entre 20 y 21 a 1, por lo que un ligero cambio de presión en la carrera de compresión, causa fácilmente un autoencendido y, por consiguiente, el famoso golpeteo del motor.

#### **4.4. Calor de entrada, calor de salida y trabajo neto**

Con respecto al calor de entrada, cabe mencionar que es uno de los factores que más influye a la hora de calcular la eficiencia termodinámica de un ciclo, por lo que en la industria se le presta mucha atención; en el caso del ciclo Otto se tienen casi 300 kJ/kg de calor entre los puntos dos y tres, es decir, en el lapso de ignición, pero en el ciclo Atkinson se tiene aproximadamente 57 % más calor de entrada (467,7 kJ/kg), que sucede entre los puntos 2, x y 3, haciéndose

presente los efectos de una mayor relación de compresión que se traduciría en más calor aportado en la ignición, por lo que en teoría, se debería de tener un mayor trabajo y eficiencia termodinámica, pero, para aseverar esto se debe tomar otro factor en cuenta: el calor de salida.

El calor de salida en ambos ciclos sucede entre los puntos 4 y 1, en donde se tiene el escape y es necesario para cerrar el ciclo y cumplir con la segunda ley de la termodinámica; en este caso el calor de salir no tuvo mayor diferencia, siendo 123,54 kJ/kg en el Toyota Yaris y 183,29 kJ/kg en el Prius. A pesar de la corta diferencia entre calores de salida entre ciclos, es muy influyente en el caso de la eficiencia térmica y trabajo neto, ya que a menor calor de salida, mayor es el trabajo y por supuesto la eficiencia térmica.

El trabajo neto se define como la diferencia entre el calor de entrada y el de salida, representando el trabajo útil termodinámicamente hablando que puede ser aprovechado por una máquina para convertirlo en trabajo útil o energía; como se mencionó en los párrafos anteriores, el calor de entrada y de salida son los que definen el trabajo neto, y en este caso se tiene una diferencia de casi 63 % a favor del Toyota Prius, ya que al tener más calor de entrada y un calor de salida proporcional al de entrada menor, se logra obtener un mayor trabajo neto, pero esto ¿por qué no se traduce en mayor torque y potencia? La respuesta se analizará en el inciso 4.7.

#### **4.5. Eficiencia térmica**

La eficiencia es un término que ha tomado mayor importancia en los últimos años, dándosele prioridad en la mayoría de las industrias, incluyendo la automotriz. Pero ¿qué es eficiencia? Es un término utilizado para describir la proporción entre la cantidad de recursos invertidos y recursos obtenidos a partir

de dicha inversión; térmicamente se habla de la relación entre trabajo neto (calor de entrada menos calor de salida) y el calor de entrada, es decir, que tanto de la energía invertida en el ciclo se está recibiendo de vuelta. Termodinámicamente es imposible obtener una eficiencia del 100 %, ya que se estaría violando la segunda ley de la termodinámica y contradiciendo los conceptos de transferencia de energía que suceden en la vida real.

En el caso de los motores analizados, existe tan solo una diferencia de 2,34 % entre eficiencias de ciclos (58,49 % del ciclo Otto contra 60,83 % del ciclo Atkinson), pero esa pequeña diferencia de eficiencia puede llegar a ser muy significativa en una máquina térmica. Esto se puede ver en el simple hecho que de un motor a gasolina con un 25 % de eficiencia a un motor diésel con 35 por ciento, ya se considera muchísimo más eficiente por un 10 % de diferencia de porcentaje de eficiencia.

La diferencia de eficiencia se traduce en un mayor aprovechamiento del combustible, logrando así un menor consumo (tema que se discutirá en el inciso 4.8) y un funcionamiento más cercano al óptimo de la máquina. Este pequeño pero importante aumento de eficiencia térmica entre ambos motores se debe de nuevo a una mayor relación de compresión, ya que al aumentar la presión en el cilindro se obtienen mayores calores de entrada con un relativamente bajo calor de salida, causando así un mejor aprovechamiento de energía de entrada y una combustión más completa, incluso contaminando menos el ambiente, ya que a mejor calidad de combustión, menor cantidad de aldehídos que se expelen al aire.

#### 4.6. Presión media efectiva (PME)

Como se mencionó en la teoría, la PME se define como la presión que actúa directamente sobre los pistones y es 100 % aprovechable despreciando los rozamientos en el motor, o sea es la cantidad de presión que puede ser transformada en trabajo directamente a la salida del pistón.

Entre ambos motores se puede observar una gran diferencia de PME, siendo para el Yaris 1,95 Pa y 3,13 Pa para el Prius, mostrando este último casi un 60% más de presión disponible para ser transformada en energía, debido al aumento de presión del cilindro y una carrera de compresión más corta con respecto a la de expansión, logrando aprovechar al máximo la presión residual en la carrera de escape, pero ¿por qué esto no se refleja en la potencia y el torque en la comparación mecánica? Esto se discutirá en el siguiente inciso.

#### 4.7. Potencia y torque

La potencia es un parámetro que se le brinda mucha importancia en el mundo automotriz, ya que puede llegar a determinar la capacidad de un vehículo para realizar carreras con alta rapidez, ya que la potencia se define como la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo y a mayor relación trabajo-tiempo, mayores prestaciones tendrá el automóvil.

En el caso del Prius y el Yaris, la potencia no juega un gran papel debido a que se habla de vehículos familiares diseñados para la ciudad y no para altas velocidades, pero aun así llama la atención el hecho que, a pesar de que en el ciclo Atkinson se tiene una mayor eficiencia, trabajo neto, PME, entre otros, el Prius produce solamente 73 HP de potencia (hablando del motor de combustión exclusivamente), *versus* el Yaris que logra obtener 107 HP, según los datos de

las fichas técnicas obtenidas en Toyota Guatemala®; térmicamente esto no tiene sentido, ya que según la teoría a mayor relación de compresión mayor potencia, torque, trabajo neto, etc. e incluso en los vehículos de competición, las relaciones de compresión pueden alcanzar hasta los 14 o 15 a 1, logrando así ciclos termodinámicos de alto rendimiento y con potencias que superan los 1 000 HP.

Como se explicó en el inciso 2.2, en la carrera de compresión, el ciclo Atkinson mantiene abierta la válvula de admisión durante aproximadamente la mitad de dicho avance, por lo que, lógicamente cierta cantidad de la mezcla que ha ingresado al cilindro en la carrera de admisión, volverá a salir, calentando la mezcla del siguiente ciclo; debido a esta pérdida de combustible en la cámara de combustión, el ciclo Atkinson pierde potencia, pero el consumo de combustible es considerablemente menor que el del ciclo Otto.

Mientras la diferencia de potencias entre motores es considerable (el Yaris produce 52 % más potencia que el Prius), la diferencia de torque no es tan distante; el Yaris con 141 Nm, logra obtener un 27 % más de torque que el Prius con 111 Nm. La explicación a este fenómeno es que en el ciclo Atkinson agrega calor a presión constante como sucede con los motores diésel, lo cual se caracteriza por carreras más lentas y logrando una mayor eficiencia volumétrica y, por lo tanto, produciendo un mayor torque.

#### **4.8. Consumo de combustible**

En los últimos años, la industria automovilística se ha concentrado en producir automóviles más económicos con respecto al consumo de combustible debido a la creciente conciencia ambiental, razón por la cual también impulsó la producción de vehículos híbridos como el Toyota Prius y la intención se plasma

claramente en la ficha técnica brindada por Toyota Guatemala®, en donde se observa un consumo de 3,9 L/100km por parte del Toyota Prius (aproximadamente 97 km/gal), mientras el Toyota Yaris muestra un 6,8 L/100km (que se traduce en aproximadamente 56 km/gal) en transporte mixto (combinación entre ciudad y carretera).

Es realmente impresionante como el Prius con un simple cambio a su traslape valvular, logra un 82 % más kilometraje recorrido por galón de combustible, con ayuda del motor eléctrico por supuesto, pero aun así es de reconocer como con un pequeño aumento de 2,34 % de la eficiencia térmica y un acople a un motor eléctrico, se logra casi el doble de kilómetros recorrido con la misma cantidad de gasolina. Este ahorro de combustible, sumado al uso de un catalizador, convierte al Toyota Prius en uno de los vehículos a motor de combustión interna más ecoamigables del mercado, reduciendo las emisiones de Nox, CO<sub>2</sub>, metano, etc. a valores casi despreciables, asumiendo la atmósfera como un sumidero de calor.

## CONCLUSIONES

1. A partir de los datos y cálculos realizados para el Toyota Yaris contra el Toyota Prius, cabe mencionar que, a pesar de la diferencia de eficiencias termodinámicas entre ambos motores (+2,34 % a favor del Prius), la diferencia entre las prestaciones entre ambos vehículos no fueron para nada proporcionales a este dato, ya que el Toyota Yaris desarrolla 52 % más de potencia y 27 % más de torque, pero el Toyota Prius consume un 82 % menos de combustible en promedio (con ayuda del motor eléctrico por supuesto), y genera 57 % más de calor de entrada y más de un 60 % más de trabajo neto, inclinando la balanza hacia el híbrido que parece equilibrarse en cuanto a costos de cada uno se refiere, ya que el Yaris requiere una inversión de 26 % menos para su obtención directa en la agencia de Toyota Guatemala® que el Toyota Prius (ver anexos 4 y 5).
2. Con base en las fichas técnicas brindadas por Toyota Guatemala® y los cálculos realizados a partir de dichas fichas y los tomados directamente de los vehículos, se observan claras diferencias entre ambos automotores, comenzando desde el ciclo termodinámico que se utiliza hasta en la transmisión de potencia; como se mencionó al inicio, el Toyota Yaris utiliza un ciclo termodinámico basado en el ciclo Otto, utiliza una transmisión, ya sea mecánica o automática convencional, desarrolla un consumo de combustible de aproximadamente 55 km por galón y desarrolla una presión media efectiva de 1,95 bar a partir de una relación de compresión de 10,5 a 1, mientras que el Toyota Prius utiliza una transmisión exclusivamente automática basada en una sistema de engranajes planetario, obtiene potencia adicional a partir de un motor

eléctrico que cuenta con un generador para recargar un banco de baterías de litio que se alojan en la parte posterior del vehículo para suministrarle energía al motor eléctrico, desarrolla un consumo de combustible de aproximadamente 95 km por galón y desarrolla una presión media efectiva de 3,12 bar a partir de una relación de compresión de 13 a 1.

3. Luego de la comparación de características, tanto mecánicas como termodinámicas de ambos vehículos, se puede concluir que el aumento de eficiencia térmica, mayor calor de entrada, trabajo neto y presión media efectiva y disminución del volumen específico relativo en el Toyota Prius con respecto al Toyota Yaris, se basa principalmente en el aumento de la relación de compresión proveniente del atraso de la válvula de admisión a aproximadamente la mitad de la carrera, que convierte el ciclo Otto en el ciclo Atkinson truncado, disminuyendo la carrera de compresión con respecto a la de expansión, y añadiendo calor al ciclo no solo a volumen constante sino también a presión constante, lo que causa un aumento de presión a la hora de la ignición de la mezcla, incrementando la temperatura, el calor y, por supuesto la eficiencia del ciclo.

4. El desarrollo de la conciencia ambiental no es un tema que haya surgido recientemente, sino las tendencias marcadas en la historia relatan la evolución que ha sufrido la industria con respecto a la contaminación y cuidado del ambiente; el ámbito de los vehículos híbridos no ha sido la excepción, desde ideas revolucionarias con prototipos sencillos como el XP512 a finales de los años 1960, pasando por el Audi Duo hasta el ahora moderno Toyota Prius, que se muestra totalmente renovado con respecto a sus predecesores, mostrando comodidades y ergonomía en cada punto del vehículo y con prestaciones cada vez mejores. Actualmente, la tecnología de los vehículos híbridos ha evolucionado de tal manera que ha alcanzado el mercado de los súperautos, en donde gigantes fabricantes de vehículos de alto rendimiento han experimentado con dicha tecnología como Ferrari, con su modelo La Ferrari híbrido, mientras la firma alemana Porsche ha respondido con su modelo Carrera 918 Spyder, y la compañía sueca Koenigsegg ha lanzado el Regera, que junto a su motor eléctrico alcanza unos impresionantes 1 822 HP; la utilización de un motor eléctrico se ha expandido en el mercado automotriz y podría ser en un futuro, el principal impulsor de vehículos para conveniencia no solo de los bolsillos de los usuarios, sino también del medio ambiente.



## RECOMENDACIONES

1. Las investigaciones, cálculos y resultados obtenidos en este trabajo de graduación, pueden tomarse como una base sólida para recomendar a los usuarios de vehículos de ciudad la utilización y aprovechamiento de la tecnología de vehículos híbridos, ya que, a pesar de requerir una inversión inicial un tanto mayor que la de un vehículo convencional, resultan considerablemente económicos, en lo que a consumo de combustible se refiere, con el plus de brindarle una notable ayuda al medio ambiente reduciendo las emisiones tóxicas y dañinas, tanto para la atmósfera como para los seres humanos, a partir de un ciclo termodinámico más eficiente y la utilización de un motor eléctrico auxiliar.
2. Ante el creciente interés de los fabricantes de vehículos en mejorar sus productos, tanto en rendimiento como en comodidad, se recomendaría ampliamente a los fabricantes de automóviles la utilización de motores de combustión interna con una mayor relación de compresión, ya que, como se pudo notar en este trabajo de graduación, el aumentar dicho parámetro incrementa la eficiencia termodinámica del ciclo, además de mejorar el rendimiento del motor, su tiempo de vida y su funcionamiento, brindando así una satisfacción completa en el cliente.

3. La investigación realizada en el primer capítulo de este trabajo de graduación, permite mostrar cómo la utilización de la tecnología híbrida ha generado interés en casi todos los sectores del mercado automotriz, permitiendo la recomendación a los futuros diseñadores y fabricantes automovilísticos de una continuación en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que utilicen dicho sistema, permitiendo así mejoras no solo de rendimiento y cuidado del ambiente, sino también de posicionamiento en el mercado, ya que la clara tendencia de productos ecoamigables son clave en la captación de mercado actual, más que todo en jóvenes y jóvenes adultos.
  
4. El desarrollo de este trabajo de graduación permite notar las ligeras, pero importantes diferencias entre los ciclos Otto y Atkinson, las cuales básicamente se resumen en una adición de calor no solo a presión constante, sino también a volumen constante, lo que aumenta la eficiencia termodinámica debido a un aumento de relación de compresión, por lo que se recomienda a los desarrolladores de automóviles la utilización del ciclo Atkinson en los vehículos híbridos que no requieran altas prestaciones, ya que a pesar de que produce menos potencia, brinda un menor consumo de combustible, lo cual mejora y compensa la pérdida de potencia con respecto al ciclo Otto a través de un motor eléctrico.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ FLORES, Jesús Andrés. *Máquinas térmicas motoras*. Barcelona: Ediciones UPC, 2002. 297 p.
2. CENGEL A., Yunus; BOLES A. Michael. *Termodinámica*. 5a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 1009 p.
3. MIHELICIC, James R.; ZIMMERMAN, Julie Beth. *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. México: Alfaomega, 2012. 729 p.
4. NEVERS, Noel. *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México: McGraw-Hill, 1998. 546 p.
5. PARDIÑAS, José. *Sistemas auxiliares del motor*. Madrid, España: EDITEX S.A., 2007. 352 p.
6. WARK, Kenneth Jr. *Termodinámica*. 6a ed. Madrid, España: McGraw-Hill, 2001. 1048 p.
7. ZELAYA MIRA, Oswaldo Antonio. *Análisis general de los vehículos híbridos y su funcionamiento*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. 106 p.



## APÉNDICES

### Apéndice 1. Datos de Toyota Yaris



Fuente: Elaboración propia.

### Apéndice 2. Datos de Toyota Prius



Fuente: Elaboración propia.



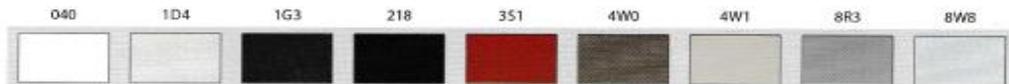
# ANEXOS

## Anexo 1. Ficha técnica Toyota Yaris



ESPECIFICACIONES	1.5 G	1.5 S/1.5 E	1.5 Estándar	1.3 S / 1.5 e	1.3 Estándar
	1NZ-FE			2NZ-FE	
Ocupantes	5				
<b>DIMENSIONES Y PESO</b>					
Longitud total mm	4410				
Ancho total mm	1700				
Altura total mm	1475, 1495*1				
Distancia entre ejes mm	2550				
Ancho de vía	Delantero mm	1470/1460*1	1480/1475*1	1470/1460*1	1480/1475*1
	Trasero mm	1460	1470	1460	1470
Despeje de suelo mm	145,165*1				
Peso en orden de marcha kg	1050-1075	1040-1075	1010-1045	1030-1060	1005-1055
	1050-1080*1	1040-1080*1	1015-1050*1	1030-1065*1	1010-1060*1
	1070-1095*2	1055-1095*2	1035-1065*2	1040-1070*2	1020-1060*2
	1070-1100*3	1055-1100*3	1035-1070*3	1040-1075*3	1020-1065*3
Peso bruto del vehículo kg	1500				
<b>CHASIS</b>					
Suspensión	Delantero	De tirantes MacPherson			
	Trasero	De barra de torsión			
Frenos	Delanteros	De disco ventilado			
	Traseros	De tambor			
Radio mínimo de giro (neumáticos) m	5.1				
Capacidad del depósito de combustible litros	42				
Neumáticos	185/60R15	175/65R14	185/60R15	175/65R14	
MOTOR	Motor de Gasolina de 1.5 litros (1NZ-FE)			Motor de Gasolina de 1.5 litros (2NZ-FE)	
Tipo	DOHC de 16 válvulas con VVT-i			DOHC de 16 válvulas con VVT-i	
Cilindrada cc	1497			1299	
Potencia máxima (SAE neta) KW/rpm	80/6000			63/6000	
Par motor máximo (SAE neta) Nm/rpm	141/4200			121/4400	
Sistema de combustible	EFI			EFI	

\*1: Versión caminos agrestes \*2: Modelos AT \*3: Modelos AT (versión caminos agrestes)



- La adición de características extra puede cambiar las cifras de esta gráfica.  
 - Toyota Motor Corporation se reserva el derecho de alterar cualquier detalle de las especificaciones y el equipamiento sin previo aviso.  
 - Los detalles de las especificaciones y el equipamiento también están sujetos a cambios para satisfacer las condiciones y requisitos locales.  
 - Sírvase consultar a su concesionario local sobre los detalles de cualquier cambio que pudiera ser requerido en su zona.  
 - Nota: Los vehículos fotografiados y los detalles de las especificaciones de este catálogo pueden ser diferentes de los modelos y equipamiento disponibles en su zona.  
 - El color de la carrocería de los vehículos puede diferir ligeramente de las fotos impresas de este catálogo.

[www.toyota.com.gt](http://www.toyota.com.gt)

Fuente: Toyota Guatemala.

## Anexo 2. Ficha técnica Toyota Prius

ESPECIFICACIONES:			
Código de modelo	NHP10L-AHXVB		
Transmisión	Transmisión continuamente variable controlado eléctricamente.		
DIMENSIONES Y PESO			
Longitud total x ancho x altura/mm	3995 X 1695 X 1450*1, 1455*2, 1475*3		
Distancia entre ejes/mm	2550		
Tread	Frente / mm	1465*4, 1470*1	
	Trasero/ mm	1460	
Altura sobre el suelo/ mm	150		
Peso en vacío/ kg	1120-1140		
Peso bruto del vehículo/ kg	1565		
FUNCIONAMIENTO / DESEMPEÑO			
Total máx. Salida / KW	74		
Consumo de combustible	Conjunto	L/100km	3.9
		Extraurbano L/100km	3.9
		Urbano L/100km	3.7
Co2 emisiones	Conjunto	g/km	91
		Extraurbano g/km	90
		Urbano g/km	86
CHASSIS			
Suspensión	Frente	MacPhersons puntales	
	Trasero	Barra de torsión	
Frenos	Tipo	Hidráulico / Regenerador	
	Frente	Discos ventilados	
	Trasero	Tambor	
Radio de giro mínimo (neumáticos) / m	4.8		
Capacidad del tanque de combustible / litros	36		
Neumáticos	185/60R15		
MOTOR	16V 1.5-litro (1NZ-FXE)		
Tipo	4-cil Twin Cam 16-válvulas con VVT-i		
Cilindros / cc	1496		
Máx. salida (SAE net) KW/rpm	54/4800		
Máx. torque (SAE net) Nm/rpm	111/4000		
Sistema de combustible	Inyección electrónica de combustible		
MOTOR			
Tipo	Sincronización alterna motor de corriente (Tipo de imán permanente)		
Máx. voltage / V	520		
Máx. salida /KW	45		
Máx. torque / Nm	169		
BATERÍA			
Tipo	Sellado NI-MH (níquel - metal híbrido)		
Módulos	20 (144V)		
Método de conexión	Series		
Capacidad / Ah	6.5 (3H)		

Fuente: Toyota Guatemala.

### Anexo 3. Tabla A-17, propiedades

930 | Tablas de propiedades, figuras y diagramas (unidades SI)

**TABLA A-17**

Propiedades de gas ideal del aire

$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K	$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Continuación del anexo 3.

**TABLA A-17**

Propiedades de gas ideal del aire (conclusión)

$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K	$T$ K	$h$ kJ/kg	$P_r$	$u$ kJ/kg	$v_r$	$s^\circ$ kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30969	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Nota: Las propiedades  $P_r$  (presión relativa) y  $v_r$  (volumen específico relativo) son cantidades adimensionales utilizadas en el análisis de procesos isentrópicos y no deben confundirse con las propiedades de presión y volumen específico.

Fuente: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, cuarta edición, Nueva York, McGraw-Hill, 1983, pp. 785-786, Tabla A-5. Publicada originalmente en J. H. Keenan y J. Kaye, *Gas Tables*, Nueva York, John Wiley & Sons, 1948.

Fuente: CENGEL A., Yunus; BOLES A. Michael. *Termodinámica*. p. 934.

## Anexo 4. Costo Yaris

Guatemala, 11 de marzo de 2016



### Dimensiones y Capacidades

- Largo 4,115 mm.
- Ancho 1,700 mm.
- Alto 1,475 mm.
- Capacidad del depósito de combustible 12 galones

### Precio

Precio de Venta:	Q151,200.00
Estimado Placas:	Q1,454.00
Total	----- Q152,654.00

\* Precio sujeto a cambio sin previo aviso.  
Precio incluye 12% de IVA.

### Garantía

- Fabricado en Thailandia
- 3 Años ó 100,000 Kms

### Precio Especial

Precio de Venta:	Q136,100.00
Estimado Placas:	Q1,454.00
Total	----- Q137,554.00

Fuente: Toyota Guatemala.

## Anexo 5. Costo Prius

Guatemala, 11 de marzo de 2016



**TOYOTA**

### Dimensiones y Capacidades

- Largo 3,995 mm.
- Ancho 1,695 mm.
- Alto 1,455 mm.
- Capacidad del depósito de combustible 10 galones

### Precio

Precio de Venta:	Q170,800.00
Estimado Placas:	Q1,912.00
<b>Total</b>	<b>Q172,712.00</b>

\* Precio sujeto a cambio sin previo aviso.  
 Precio incluye 12% de IVA.

### Garantía

- Fabricado en Japón
- 3 Años ó 100,000 Kms

### Precio Especial

Precio de Venta:	Q170,800.00
Estimado Placas:	Q1,912.00
<b>Total</b>	<b>Q172,712.00</b>

Fuente: Toyota Guatemala.