

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
UN SISTEMA HÍBRIDO A BUSES DE TRANSPORTE DE
PASAJEROS**

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO**

ELABORADO POR:

**ÁLVAREZ ANDRADE LUCIO ANDRÉS
CHAVARREA VIZUETE GEOVANNY MARCELO**

DIRECTOR: ING. ALEXIS ORTIZ

CODIRECTOR: ING. ROBERTO GUTIÉRREZ

SANGOLQUI, 16 de julio de 2010

CERTIFICADO DE LA ELABORACION DEL PROYECTO

El proyecto de grado titulado “INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO A BUSES DE TRANSPORTE DE PASAJEROS” fue realizado en su totalidad por los Srs. LUCIO ANDRÉS ÁLVAREZ ANDRADE y GEOVANNY MARCELO CHAVARREA VIZUETE como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Alexis Ortiz
Director

Ing. Roberto Gutiérrez
Codirector

LEGALIZACION DEL PROYECTO

“INGENIERÍA CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO A BUSES DE TRANSPORTE DE PASAJEROS”

Elaborado por:

Andrés Álvarez
CI: 1711013209

Geovanny Chavarrea
CI: 1715293690

Ing. Emilio Tumipamba
DIRECTOR DE LA CARRERA

DEDICATORIA

A mi familia por toda la confianza depositada en mí y el apoyo constante para llegar a culminar este proyecto, a mis compañeros y amigos, los que llegaron a cumplir este sueño y los que quedaron en el camino, con quienes compartí buenas y malas experiencias a lo largo de estos años, y a todos aquellos que contribuyeron de una u otra manera para que este proyecto sea terminado con éxito.

Lucio Andrés Álvarez Andrade

El presente proyecto se lo dedico a mis padres ya que con su esfuerzo y dedicación han permitido que me forme como persona y profesionalmente, a mi hermano porque en el he encontrado un apoyo incondicional y uno de los pilares más importantes en mi vida, a mi padrino y principal promotor de este logro que sin ese apoyo desinteresado que siempre me ha entregado no hubiese podido lograr este objetivo, a mis profesores donde siempre encontré una mano amiga y un ejemplo a seguir.

Geovanny Marcelo Chavarrea Vizúete

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi mama Isidora por todo su esfuerzo y dedicación para darme la oportunidad de estar aquí el día de hoy, a mis hermanas Nathalie y Katherine quienes me han servido de ejemplo y gracias su apoyo incondicional y sus consejos siempre acertados, me han ayudado a formarme como persona, a mis amigos, los que siempre están en las buenas y en las malas y hacen que esta vida tenga un sabor diferente. Además, quiero expresar un sincero agradecimiento a todos los docentes y personal administrativo de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE, por su valiosa contribución en la consecución de este gran sueño.

Lucio Andrés Álvarez Andrade

Un gran agradecimiento a todo el personal docente y administrativo de la facultad y en especial a los directores de este proyecto por la acertada guía y colaboración en la elaboración del mismo. A mi familia y a todos los que hicieron posible este que ahora es una realidad.

Y un especial agradecimiento a todos mis amigos con los cuales compartí muchas experiencias que lejos de ser buenas o malas me sirvieron para madurar y crecer como persona.

Geovanny Marcelo Chavarrea Vizúete

Tabla de Contenidos

1. GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. General.....	2
1.3.2. Específicos	2
1.4. ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	3
2. MARCO TEORICO	4
DEFINICIONES	4
2.1. TRANSPORTE MASIVO DE PASAJEROS	4
2.1.1. Clasificación de Transporte Masivo Terrestre.....	4
2.1.1.1. Transporte Urbano.....	4
2.1.1.2. Buses Interparroquiales, Intercantoniales e Interprovinciales	5
2.1.1.3. Transporte Escolar	5
2.2. MOTORES HÍBRIDOS.....	6
2.2.1. Tipos de Motores Híbridos	7
2.3. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS	31
2.3.1. Sistema Convencional.....	31
2.3.2. Sistema Híbrido.....	35
3. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y PARTES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO	47
3.1. SELECCIÓN DEL MEDIO DE TRANSPORTE MASIVO MÁS COMÚN Y MÁS CONTAMINANTE.....	47
3.2. FACTIBILIDAD TÉCNICA	49
3.2.1. Selección de sistema híbrido	49
3.2.2. Análisis de elementos y partes de los sistemas.....	112
3.2.2.1. Bus tradicional.....	112
3.2.2.2. Bus Híbrido	118
3.2.3. Estudio Comparativo	121
3.2.3.1. Partes y elementos comunes, modificables y descartables.....	121
3.3. FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	122
3.3.1. Detalle de elementos.....	122
3.3.1.1. Comunes	122
3.3.1.2. Modificables.....	122
4. EVALUACIÓN Y DESEMPEÑO	123
4.1. FACTIBILIDAD OPERACIONAL.....	123
4.1.1. Parámetros de Funcionamiento Teórico	123
4.1.1.1. Sistema de Transporte Tradicional.....	123

4.1.1.2. Sistema de Transporte Híbrido.....	126
4.1.2. Comparación del Sistema Híbrido con relación al tradicional	132
4.1.2.1. Ventajas.....	136
4.1.2.2. Desventajas.....	137
5. MANTENIMIENTO	138
5.1 MANTENIMIENTO DE BUS URBANO	138
5.2 MANTENIMIENTO DE BUS HÍBRIDO.....	139
6. IMPACTO AMBIENTAL	141
6.1. AGENTES CONTAMINANTES	141
6.1.1. Gases de Escape	141
6.1.2. Ruido	149
6.2. NIVELES DE CONTAMINACIÓN.....	150
6.2.1 Sistema de Transporte Tradicional.....	150
6.2.2 Sistema de Transporte Híbrido.....	154
7. SIMULACIÓN DE FRECUENCIA DE FALLAS.....	156
8. ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO	171
8.1 ESTUDIO ECONÓMICO	171
8.1.1 Antecedentes.....	171
8.1.2 Costos del Proyecto.....	171
8.1.2.1 Costos Directos.....	171
8.1.2.2 Costos Indirectos	172
8.1.3 Costo Total del Proyecto	172
8.2 ESTUDIO FINANCIERO.....	172
8.2.1 Tasa Interna de Retorno, Valor presente neto, Beneficio Costo, en base a la vida útil del sistema.....	172
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	177
9.1. TÉCNICOS	177
9.2. ECONÓMICOS.....	178
9.3. SOCIALES	179
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	181
CONCLUSIONES:	181
RECOMENDACIONES.....	184

Listado de Figuras

FIGURA 2.1 ESQUEMA DEL TREN DE ACCIONAMIENTO HÍBRIDO – ELÉCTRICO.....	7
FIGURA 2.2 CLASIFICACIÓN DEL MODO DE CONEXIÓN DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS	11
FIGURA 2.3 CONFIGURACIÓN DEL TREN DE POTENCIA HÍBRIDO – ELÉCTRICO EN SERIE	12
FIGURA 2.4 CONFIGURACIÓN DEL TREN DE TRACCIÓN EN PARALELO	15
FIGURA 2.5 ESQUEMA DE ACOPLAMIENTO DE TORQUE.....	16
FIGURA 2.6 ESQUEMA COMÚNMENTE USADO PARA EL ACOPLAMIENTO MECÁNICO ..	17
FIGURA 2.7 CONFIGURACIÓN DE DOBLE EJE 1	18
FIGURA 2.8 ESFUERZO DE TRACCIÓN VS VELOCIDAD DE VEHÍCULO CON DIFERENTES JUEGOS DE ENGRANES DE TRANSMISIÓN	19
FIGURA 2.9 CONFIGURACIÓN DE DOBLE EJE 2	21
FIGURA 2.10 PRE TRANSMISIÓN DE COMBINACIÓN EN UN SOLO EJE (PARALELO)	22
FIGURA 2.11 POST TRANSMISIÓN DE COMBINACIÓN EN UN SOLO EJE (PARALELO)....	22
FIGURA 2.12 ENLACE DE VELOCIDADES	24
FIGURA 2.13 TREN DE TRACCIÓN HÍBRIDO – ELÉCTRICO CON ENLACE DE VELOCIDAD CON UNIDAD DE ENGRANES PLANETARIOS	25
FIGURA 2.14 TREN DE TRACCIÓN HÍBRIDO – ELÉCTRICO CON ENLACE DE VELOCIDAD MEDIANTE TRANSMOTOR ELÉCTRICO	26
FIGURA 2.15 TORQUE Y VELOCIDAD ALTERNADOS EN TREN DE POTENCIA DE HÍBRIDO ELÉCTRICO CON UNIDAD DE ENGRANES PLANETARIOS	28
FIGURA 2.16 TORQUE Y VELOCIDAD ACOPLADOS ALTERNATIVAMENTE EN EL TREN DE TRACCIÓN HÍBRIDO ELÉCTRICO CON TRANSMOTOR	29
FIGURA 2.17 INTEGRACIÓN DE VELOCIDAD Y TORQUE (TREN DE TRACCIÓN HÍBRIDO)	30
FIGURA 2.18 TREN DE TRACCIÓN DE UN VEHÍCULO	31
FIGURA 2.19 CAJA DE VELOCIDADES	32
FIGURA 2.20 ESQUEMA DE UN DIFERENCIAL	34
FIGURA 2.21 ESQUEMA DE UN EMBRAGUE	35
FIGURA 2.22 FUERZA DE FRENADO VS. TIEMPO	36
FIGURA 2.23 FRENO REGENERATIVO VS. FRENO HIDRÁULICO	36
FIGURA 2.24 INVERSOR TOYOTA PRIUS	39

FIGURA 2.25 INTERIOR INVERSOR TOYOTA PRIUS.....	39
FIGURA 2.26 DIVISOR DE POTENCIA DE HÍBRIDO EN PARALELO	40
FIGURA 2.27 DISPOSICIÓN DE ENGRANES DEL DIVISOR DE POTENCIA.....	41
FIGURA 3.1 RESISTENCIAS QUE SE OPONEN AL MOVIMIENTO DE UN VEHÍCULO.....	51
FIGURA 3.2 VARIACIÓN DE PRESIÓN EN UN NEUMÁTICO.....	51
FIGURA 3.3 ZONAS DE PRESIÓN DE AIRE EN UN VEHÍCULO EN MOVIMIENTO.....	54
FIGURA 3.4 COMPONENTES DEL PESO DE UN VEHÍCULO.....	56
FIGURA 3.5 CONFIGURACIÓN TÍPICA DEL TREN DE TRACCIÓN SISTEMA HIBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE.....	57
FIGURA 3.6 EJEMPLO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR Y DE LA REGIÓN DE FUNCIONAMIENTO ÓPTIMO	59
FIGURA 3.7 ILUSTRACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA EL MAX. SOC-DE-FEHP	62
FIGURA 3.8 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DEL MAX. SOC-DE-FEHP	63
FIGURA 3.8 ILUSTRACIÓN DE CONTROL DEL TERMOSTATO.....	64
FIGURA 3.9 VELOCIDAD - TORQUE (POTENCIA) CARACTERÍSTICOS DE UN MOTOR ELÉCTRICO	66
FIGURA 3.10 RANGO DE LA POTENCIA DE TRACCIÓN VS. LA VELOCIDAD PROMEDIO DE LA VELOCIDAD DE TRACCIÓN	67
FIGURA 3.11 CARGA DE ENERGÍA DE UN COCHE DE PASAJEROS 1500 KG A UNA VELOCIDAD CONSTANTE	69
FIGURA 3.12 LA POTENCIA MEDIA CONSUMIDA EN LA ACCELERACIÓN Y DESACELERACIÓN CON PLENO,.....	70
PARCIAL Y CERO FRENADO REGENERATIVO.....	70
FIGURA 3.13 LA POTENCIA INSTANTÁNEA Y LA POTENCIA MEDIA, CON PLENO Y CERO FRENADO REGENERATIVO EN LOS TÍPICOS CICLOS DE MANEJO.....	71
FIGURA 3.14 CAMBIOS DE ENERGÍA EN UN CICLO DE MANEJO URBANO TÍPICO CON ESTRATEGIA DE CONTROL DE MAX.SOC	73
FIGURA 3.15 CONFIGURACIÓN DEL TREN DE TRACCIÓN HIBRIDO CON ACOPLE DE TORQUES	75
FIGURA 3.16 ESQUEMA DE CONTROL GLOBAL DE LA CADENA CINEMÁTICA HÍBRIDA EN PARALELO	76
FIGURA 3.17 DEMOSTRACIÓN DE VARIOS MODOS DE OPERACIÓN BASADOS EN LA DEMANDA DE ENERGÍA.....	78

FIGURA 3.18 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL PARA UN MAX SOC DE LAS PPS	82
FIGURA 3.19 ESTRATEGIA DE CONTROL DEL MCI.....	83
FIGURA 3.20 VELOCIDAD DEL VEHÍCULO, POTENCIA DEL MCI CON EL ACELERADOR A FONDO, EL PODER DE RESISTENCIA, VS. TIEMPO DE ACELERACIÓN.....	86
FIGURA 3.21 CONFIGURACIÓN EN PARALELO DEL TREN DE TRACCIÓN PSEUDO HIBRIDO	91
FIGURA 3.22 MODO DE CARGA DE LA BATERÍA O TRACCIÓN ÚNICAMENTE POR MOTOR, DEPENDIENDO DEL SOC DE LA BATERÍA.....	93
FIGURA 3.23 RENDIMIENTO CON ACELERADOR A FONDO	94
FIGURA 3.24 MAPA DE CONSUMO DE ENERGÍA	94
FIGURA 3.25 ACELERACIÓN.....	95
FIGURA 3.26 ESFUERZO DE TRACCIÓN VS. VELOCIDAD DEL VEHÍCULO	95
FIGURA 3.27 VELOCIDAD DE VEHÍCULO, POTENCIA DE MOTOR, POTENCIA DE MOTOR ELÉCTRICO Y SOC DE BATERÍA.....	96
FIGURA 3.28 MAPA DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO	97
FIGURA 3.29 MAPA DE EFICIENCIA DEL MOTOR Y PUNTOS DE FUNCIONAMIENTO.....	97
FIGURA 3.30 TREN DE TRACCIÓN PSEUDO HIBRIDO EN PARALELO-SERIE CON UNA UNIDAD DE ENGRANAJE PLANETARIO	99
FIGURA 3.31 UNIDAD DE ENGRANAJE PLANETARIO	100
FIGURA 3.32 EL TORQUE EN LA CORONA Y EN EL PORTASATÉLITES (TORQUE DEL MOTOR Y TORQUE EN LA TRANSMISIÓN) VARIA CON RELACIÓN TRANSMISIÓN, R, A UN TORQUE DADO EN EL ENGRANAJE PLANETA (TORQUE DEL MOTOR ELÉCTRICO)	101
FIGURA 3.33 VELOCIDAD DE MOTOR CONTROLADO POR EL TORQUE DEL MOTOR ELÉCTRICO Y LA ACELERACIÓN DEL MOTOR	103
FIGURA 3.34 ESQUEMA DE PARTES PRINCIPALES DEL TREN DE TRACCIÓN.....	112
FIGURA 3.35 CHASIS DE BUS VW 17.210 OD	113
FIGURA 3.36 CONFIGURACIÓN EN SERIE DEL TREN DE TRACCIÓN HÍBRIDO ELÉCTRICO	118
FIGURA 4.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MOTOR DIESEL VW 17.210 OD	124
FIGURA 4.2 AJUSTE DE RPM DE MOTOR DIESEL	127
FIGURA 4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE MOTOR ELÉCTRICO VOITH ELVO DRIVE® TIPO TFM DE IMANES PERMANENTES	129

FIGURA 4.4 VARIACIÓN DE TORQUE VS. VELOCIDAD.....	132
FIGURA 4.5 CURVAS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR DIESEL	133
FIGURA 4.6 CURVAS DE DESEMPEÑO DE UN MOTOR ELÉCTRICO	134
FIGURA 4.7 ESFUERZO DE TRACCIÓN VS. VELOCIDAD (TRANSMISIÓN MULTIMARCHAS)	135
FIGURA 4.8 VELOCIDAD DEL VEHÍCULO VS VELOCIDAD DE GIRO, ENTRE CAMBIO DE MARCHAS.....	135
FIGURA 4.9 ESFUERZO DE TRACCIÓN CON TRANSMISIÓN SIMPLE.....	136
FIGURA 5.1 GRÁFICA COMPARATIVA DE MANTENIMIENTO CONVENCIONAL VS. MANTENIMIENTO BUS HÍBRIDO	140
FIGURA 6.1 MATERIAL PARTIVULADO ANUAL.....	152
FIGURA 6.2 VARIACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	153
FIGURA 6.3 CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE ACUERDO A DIFERENTES TECNOLOGÍAS	154
FIGURA 6.4 VARIACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CON TECNOLOGÍA HÍBRIDA.....	155
FIGURA 7.1 ENSAYO DE CONDUCCIÓN FTP 75 DE VEHÍCULOS PARA CIUDAD Y AUTOPISTA.....	157
FIGURA 7.2 ONDA FUNDAMENTAL CON ONDA SUPERPUESTA.....	164
FIGURA 7.3 VARIACIÓN DE AISLAMIENTO VS. TIEMPO DE USO	166
FIGURA 7.4 DESBALANCE INDUCTIVO – CORTO ENTRE ESPIRAS	167
FIGURA 7.5 MUESTRA UN ROTOR EN BUEN ESTADO.....	169
FIGURA 7.6 MUESTRA UN ROTOR EN MAL ESTADO	169
FIGURA 7.7 EXCENTRICIDAD ESTÁTICA	170
FIGURA 7.8 MUESTRA COMO ES LA EXCENTRICIDAD DINÁMICA.....	170
FIGURA 9.1 MATERIAL PARTICULADO CONTAMINANTE ANUALMENTE.....	180

Listado de tablas

TABLA 3.1 DIVISIÓN DE TRANSPORTE URBANO	47
TABLA 3.2 LISTA DE CHASISES CALIFICADOS PARA TRANSPORTE URBANO	48
TABLA 3.3 RESULTADO DE PRUEBA DE OPACIDAD	49
TABLA 3.4 COEFICIENTES DE RESISTENCIA A LA RODADURA.....	53
TABLA 3.5 COEFICIENTES DE RESISTENCIA AERODINÁMICA DE ALGUNOS TIPOS DE CARROCERÍA	55
TABLA 3.6 ESTRATEGIA LÓGICA DE CONTROL.....	93
TABLA 3.7 ESPECIFICACIONES DE MOTOR VW 17.210 OD	113
TABLA 3.8 SISTEMA DE LUBRICACIÓN DE MOTOR VW 17.210 OD.....	114
TABLA 3.9 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE MOTOR VW 17.210 OD	114
TABLA 3.10 EMBRAGUE DE BUS VW 17.210 OD	114
TABLA 3.11 CAJA DE TRANSMISIÓN DE BUS VW 17.210 OD	115
TABLA 3.12 ÁRBOLES DE TRANSMISIÓN DE BUS VW 17.210 OD	115
TABLA 3.13 EJE TRASERO DE BUS VW 17.210 OD	116
TABLA 3.14 DIRECCIÓN DE BUS VW 17.210 OD.....	116
TABLA 3.15 EJE DELANTERO DE BUS VW 17.210 OD	116
TABLA 3.16 SISTEMA DE FRENOS DE BUS VW 17.210 OD	117
TABLA 3.17 COMPRESOR DE AIRE DE BUS VW 17.210 OD	118
TABLA 3.18 MOTOR DIESEL DE SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE	119
TABLA 3.19 MOTOR ELÉCTRICO DE SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE.....	119
TABLA 3.20 GENERADOR DE SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE	120
TABLA 3.21 BATERÍAS DE SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE.....	120
TABLA 3.22 INVERSOR DE SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE.....	120
TABLA 3.23 MATRIZ COMPARATIVA DE ELEMENTOS NECESARIOS EN SISTEMA HÍBRIDO ELÉCTRICO EN SERIE.....	121
TABLA 3.24 COSTO DE COMPONENTES DE SISTEMA ELÉCTRICO	122
TABLA 4.1 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO DE MOTOR DIESEL	125
TABLA 4.2 PARÁMETROS DE DESEMPEÑO CON AJUSTE DE RPM.....	128
TABLA 5.1 NO. DE KM Y FRECUENCIA LABORAL DE UN BUS URBANO.....	138

TABLA 6.1 NIVELES DE CONTAMINACIÓN	149
TABLA 6.2 COMPONENTES DE LOS GASES DE ESCAPE	151
TABLA 6.3 DATOS DE PRUEBA DE CONTROL DE OPACIDAD POR MARCAS	153
TABLA 7.1 VIDA ÚTIL Y RESIDUAL DE TRANSPORTE PÚBLICO.....	158
TABLA 7.2 VIDA ÚTIL DE BUS TRADICIONAL	159
TABLA 7.3 TABLA COMPARATIVA BUS CONVENCIONAL VS. BUS HÍBRIDO	160
TABLA 7.4 VIDA ÚTIL DE BUS HÍBRIDO	161
TABLA 8.1 COSTO DE REMUNERACIONES	171
TABLA 8.2 LISTA DE COSTOS INDIRECTOS	172
TABLA 8.3 COSTOS DE ELEMENTOS DEL SISTEMA HÍBRIDO.....	173
TABLA 8.4 COSTOS DE MANO DE OBRA	173
TABLA 8.5 GASTOS ANUALES EN MANTENIMIENTO Y COMBUSTIBLE.....	173
TABLA 8.6 DATOS DE CÁLCULO DE VAN, TIR	174
TABLA 8.7 CÁLCULO DE COSTO BENEFICIO	174
TABLA 8.8 COSTO DE UN BUS NUEVO HÍBRIDO.....	174
TABLA 8.9 CÁLCULO DEL TIR, VAN PARA UN BUS NUEVO MODIFICADO	175
TABLA 8.10 CÁLCULO DEL COSTO BENEFICIO PARA UN BUS NUEVO MODIFICADO ...	176

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo A: Cuadro de Mantenimiento de bus urbano
- Anexo B: Cuadro de Costos de Mantenimiento Bus Urbano
- Anexo C: Cuadro y costo de mantenimiento de bus urbano de acuerdo al kilometraje recorrido
- Anexo D: Cuadro de Mantenimiento General de Motores Eléctricos
- Anexo E: Cuadro de Mantenimiento de Bus Híbrido de acuerdo al kilometraje recorrido
- Anexo F: Cuadro y costo de mantenimiento de Bus Híbrido de acuerdo al kilometraje recorrido
- Anexo G: Cuadro de Mantenimiento e ingreso de parámetros de bus urbano obtenido en el programa para determinar La Vida Útil de Transporte Público realizado por la ESPE
- Anexo I: Cuadro de Mantenimiento, costos de mano de obra y repuestos de acuerdo al kilometraje recorrido, sugerido para un bus híbrido obtenido en el programa para determinar La Vida Útil de Transporte Público realizado por la ESPE
- Anexo J: Cálculos

NOMENCLATURA UTILIZADA

SOC:	Estado de Carga.
PPS:	Fuente para picos de energía.
FEHP:	Fuente de energía en horas pico.
MCI:	Motor de Combustión Interna.
ME:	Motor Eléctrico.
VHE:	Vehículo Híbrido Eléctrico.
VE:	Vehículo Eléctrico.
M_v :	Masa total de vehículo.
f_r :	Coefficiente de resistencia a la rodadura.
C_d :	Coefficiente de resistencia aerodinámica.
A_f :	Área frontal.
η_f :	Eficiencia de transmisión (marcha única).
g :	Gravedad.
ρ_a :	Densidad del aire.
t_a :	Tiempo de aceleración.
V_b :	Velocidad base.
V_f :	Velocidad final.
δ :	Factor de masa del vehículo.
P_t :	Potencia nominal del motor.
r :	Radio de rueda.
V_{max} :	Velocidad máxima del vehículo.
i_g :	Relación de transmisión.
i_o :	Relación de transmisión (entrada y salida).
T_p :	Torque de salida de la fuente de energía.
F_t :	Fuerza de Tracción.
V_m :	Velocidad máxima de circulación permitida en ciudad para buses.
F_w :	Fuerza aerodinámica.
d :	Factor de rendimiento del vehículo.
α :	Ángulo de carretera.
η_t :	Eficiencia de transmisión.
V_1 :	Velocidad Máxima en carretera según FTP 75 en autopista.

$P_{e/g}$:	Potencia carga media.
V_o :	Velocidad inicial.
D :	Distancia de prueba.
t :	Tiempo de prueba (1/4 milla).
a :	aceleración.
V_2 :	Velocidad constante.
P_{ave} :	Potencia Promedio.
P_{fe} :	Energía sobrante.
P_b :	Máxima capacidad de la fuente de energía.
T_P :	Torque de salida del motor.
i :	Grado máximo de pendiente.
N_{tf} :	Relación combinada entre caja y grupo.
P_e :	Potencia generada por motor.
P_{max_ace} :	Potencia media con máxima aceleración.
P_m :	Potencia en determinadas condiciones.
P_r :	Potencia de resistencia.
t_i :	Tiempo inicial.
P_{ea} :	Potencia restante para acelerar el vehículo.
$P_{demandada}$:	Potencia demandada en condiciones críticas.
ECB:	Control Electrónico de Frenado.
FEM:	Fuerza electromotriz.
F_{rd} :	Fuerza de Resistencia del neumático.
E_{batt} :	Energía de baterías.
g_e :	Consumo específico de combustible.
γ_f :	Densidad diesel.
Q_s :	Consumo de Combustible.
S :	Distancia promedio recorrida.
P_{b_out} :	Potencia de consumo del motor eléctrico.
P_{b_in} :	Energía producida por el motor eléctrico con frenos regenerativos
N_{mmax} :	Velocidad máxima de giro del motor.
V_{max} :	Velocidad máxima.

RESUMEN

En la actualidad las crecientes actividades vinculadas a la protección ambiental han impulsado la investigación y desarrollo de tecnologías que permitan reducir los efectos dañinos al ambiente. Uno de los problemas más graves es la generación de gases contaminantes al utilizar combustibles fósiles en los vehículos propulsados por motores de combustión interna.

El proyecto que se presenta a continuación, consiste en la ingeniería conceptual para verificar la viabilidad de la modificación del sistema de propulsión convencional de un bus de transporte de pasajeros por un sistema de propulsión híbrido eléctrico, contemplando todas las etapas de investigación y diseño para que cumpla con los requisitos básicos de funcionamiento del sistema convencional.

La tecnología híbrida consiste en la combinación de dos fuentes de energía que permitan aprovechar las mejores características de las mismas mejorando así la eficiencia energética del sistema. Existen muchas combinaciones posibles del tren de tracción híbrido eléctrico de las cuales se pueden destacar la configuración en serie y paralelo, de las que se analizaron sus características de funcionamiento para definir la configuración más adecuada para este proyecto.

Una vez seleccionada la configuración en serie para la modificación del tren de tracción híbrido eléctrico se obtuvieron resultados que muestran una reducción de consumo de combustible de un 30 por ciento, de emisión de material particulado de un 20 a 30 por ciento, reducción de gastos operativos de un 30 por ciento. Sumado a estas bondades del sistema se puede mencionar que la configuración en serie permite aprovechar la mayor cantidad de elementos del sistema tradicional logrando así que la inversión sea la mínima y esta se pueda recuperar a corto plazo.

Con estos resultados se pudo alcanzar el principal objetivo de este proyecto el cual era reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia energética, implementando una nueva tecnología de propulsión para vehículos. El punto clave fue que en esta

configuración el motor de combustión interna está desacoplado de las ruedas motrices por lo que puede trabajar en su régimen más óptimo donde el consumo de combustible sea el mínimo posible y tenga un buen desempeño.

Los costos que se muestran en este proyecto son estimados para un prototipo y no alcanzan un nivel industrial, pero se puede afirmar que esta tecnología es viable tanto en el aspecto técnico como ambiental.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El gobierno ecuatoriano, representado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, en un afán por reducir el consumo de derivados del petróleo y así disminuir la dependencia de los combustibles fósiles en busca de fuentes de energía menos dañinas para el ambiente, pero que puedan satisfacer la demanda del sector automotriz, firmó un convenio con la ESPE y Toyota del Ecuador en diciembre del 2007 para la entrega de un automóvil modelo Prius, con el fin de evaluar el desempeño de un auto híbrido en las condiciones de un país andino.

Los resultados de los estudios de campo realizados por la ESPE y presentados al Ministerio de Electricidad y Energía Renovable en febrero del 2008 mostraron que el Prius en comparación con otros automóviles que formaron partes en la investigación llega a alcanzar un 60 por ciento de ahorro de combustible, lo que abrió las puertas en el mercado ecuatoriano para los autos híbridos así como a nuevos estudios para implementar dicha tecnología.

Es así como el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable dio el primer paso al adquirir el primer Toyota Highlander con tecnología híbrida, además, incentivó la compra de estos vehículos al liberarlos del pago de varios gravámenes como el Impuesto al Valor Agregado (IVA) del 12 por ciento y la cancelación del Impuesto a los Consumos Especiales (ICE) que, según el costo del auto, puede ascender hasta un 35 por ciento.

Una decisión que ha puesto a trabajar rápidamente al sector privado para la comercialización de estos vehículos a nivel nacional, de esta manera Chevrolet y Ford se suma a Toyota y ya lanzaron los modelos Tahoe y Ford Escape Híbridos respectivamente junto con el Toyota Prius, Highlander y Camry.

1.2. Definición del Problema

El alto consumo de combustibles fósiles a nivel mundial y los índices elevados de contaminación, generado por las emisiones debido a la combustión de los mismos, produce una constante y preocupante degradación del ambiente. Lo que incentiva a la búsqueda de sistemas alternativos para la propulsión de los automotores, los cuales permitan reducir el consumo de combustibles fósiles y mejorar la eficiencia energética.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Realizar la ingeniería conceptual para implementar a los medios de transporte de pasajeros nuevas tecnologías que permitan reducir el consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases contaminantes.

1.3.2. Específicos

- Identificar los diferentes tipos de transporte masivo terrestre existentes.
- Seleccionar un tipo de transporte de pasajeros común, identificar sus elementos característicos y definir sus condiciones de operación.
- Identificar los elementos característicos de un sistema híbrido de transporte.
- Analizar los elementos que se pueden modificar y cambiar (Factibilidad Técnica).
- Selección de nuevos elementos y costos de los mismos (Factibilidad Económica).
- Comparar el desempeño teórico del nuevo sistema en relación al tradicional (Factibilidad operacional).
- Evaluar el impacto ambiental.

1.4. Alcance del Proyecto

Realizar un estudio de factibilidad para implementar un sistema híbrido en medios de transporte de pasajeros que nos permita reducir la dependencia de combustibles fósiles, con el fin de disminuir la contaminación ambiental.

1.5. Justificación e Importancia

La ESPE y el DECEM siempre a la vanguardia en la elaboración y ejecución de proyectos que permiten solucionar los problemas de la comunidad, busca una nueva alternativa para disminuir el consumo de combustibles fósiles y mejorar así la calidad del ambiente, para lo cual presenta un proyecto donde se realizará la Ingeniería Conceptual para la implementación de un sistema híbrido a buses de transporte de pasajeros.

Esto reduciría la dependencia actual de los combustibles fósiles, ya que su presencia actualmente es muy limitada, permitiendo el desarrollo de nuevas tecnologías acordes a las exigencias de la sociedad con un menor impacto ambiental.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

Definiciones

2.1. Transporte Masivo de pasajeros

Se refiere al traslado de un lugar a otro a cierto número de personas por medio de un vehículo diseñado para este fin, ya sea por vía marítima, terrestre o aérea.

2.1.1. Clasificación de Transporte Masivo Terrestre

Al transporte masivo terrestre lo podemos clasificar en:

2.1.1.1. Transporte Urbano

La concentración de la población en grandes ciudades ha supuesto la necesidad de dotación de un transporte colectivo eficiente para el desarrollo de la vida cotidiana de éstas ciudades.

Los transportes públicos en una ciudad procuran el desplazamiento de personas de un punto a otro en el área de esa ciudad.

El transporte público urbano es parte esencial de una ciudad. Disminuye la contaminación, ya que se usan menos automóviles para el transporte de personas, además, de permitir el desplazamiento de personas que, no teniendo automóvil propio, necesitan recorrer largas distancias.

2.1.1.1.1. Buses Urbanos

Es un automotor de transporte público y trayecto fijo dentro de la ciudad y su capacidad puede variar entre 50 y 90 pasajeros.

2.1.1.1.2. Buses Articulados

Es un autobús de dos o más cuerpos ("vagones"), si posee dos cuerpos frecuentemente está dotado con dos ejes en el cuerpo delantero y un tercer eje en el cuerpo trasero (remolque). El autobús articulado de dos cuerpos suele poseer una longitud que suele estar en torno a los 18 metros, en comparación con los 10 a 12 metros de un bus normal de un cuerpo.

La capacidad varía entre 80 a 160 pasajeros, dependiendo del modelo, la cantidad de asientos y la extensión del autobús.

2.1.1.2. Buses Interparroquiales, Intercantoniales e Interprovinciales

Son buses destinados al traslado de pasajeros, con o sin carga, con rutas trazadas para conectar provincias, cantones y parroquias. Su capacidad varía entre 30 y 50 pasajeros.

2.1.1.3. Transporte Escolar

El transporte escolar hace referencia a los autobuses que dedican a llevar a los escolares de su lugar de residencia a una institución educativa y viceversa, y presenta, una especial relevancia dada la singularidad de sus usuarios. La atención que este modo de transporte presta a sus usuarios requiere que se intensifiquen las garantías de su prestación, fundamentalmente en materia de su seguridad.

2.1.1.3.1. Buses

Se refiere a un bus que debe contar con un mínimo de 23 asientos.

2.1.1.3.2. Furgonetas

Son vehículos que tienen de 17 a 22 asientos sin incluir el asiento del chofer.

2.2. Motores Híbridos

El término propulsión híbrida es utilizado para referirse a vehículos con más de una fuente de propulsión.

Básicamente, el tren de propulsión de un vehículo está obligado a:

- Desarrollar la energía necesaria para satisfacer las demandas del vehículo,
- Cargar suficiente energía a bordo para apoyar el movimiento del vehículo en un rango determinado,
- Demostrar la alta eficiencia, y
- Disminuir la contaminación ambiental.

En general, un vehículo puede tener más de una fuente de energía y un convertidor de energía, tales como sistemas de calor de gasolina (o diesel), sistemas de motor de baterías de hidrógeno, sistema de motor de baterías electro - químicas, etc.

Los sistemas híbridos pueden incorporar varios tipos de acumuladores de energía y/o conversores de energía.

El objetivo del desarrollo de las tecnologías híbridas es combinar dos fuentes de energía, de manera que las cualidades de cada sistema sean utilizadas bajo condiciones de generación variables, de tal forma que las ventajas globales del desarrollo del sistema híbrido pesen más que el costo de su configuración.

El *REGLAMENTO A LA LEY ORGANICA DE REGIMEN TRIBUTARIO INTERNO* define como vehículos híbridos a aquellos que se impulsan por un motor eléctrico y alternativamente por un motor de combustión interna.

Un Vehículo híbrido con un tren de tracción eléctrico es llamado Vehículo Híbrido Eléctrico (VHE).

2.2.1. Tipos de Motores Híbridos

Normalmente el tren de tracción de un vehículo híbrido consiste en no más de dos fuentes propulsión ya que una configuración de más de dos complicaría el sistema. Para el propósito de la recuperación de la energía de frenado disipada en forma de calor en los vehículos convencionales con MCI, el tren de tracción híbrido utiliza un tren de propulsión bidireccional con un inversor, mientras que el otro tren de propulsión puede ser bidireccional o unidireccional.

La figura 2.1 muestra el concepto de un tren de tracción híbrido y las diferentes posibilidades del flujo de energía.

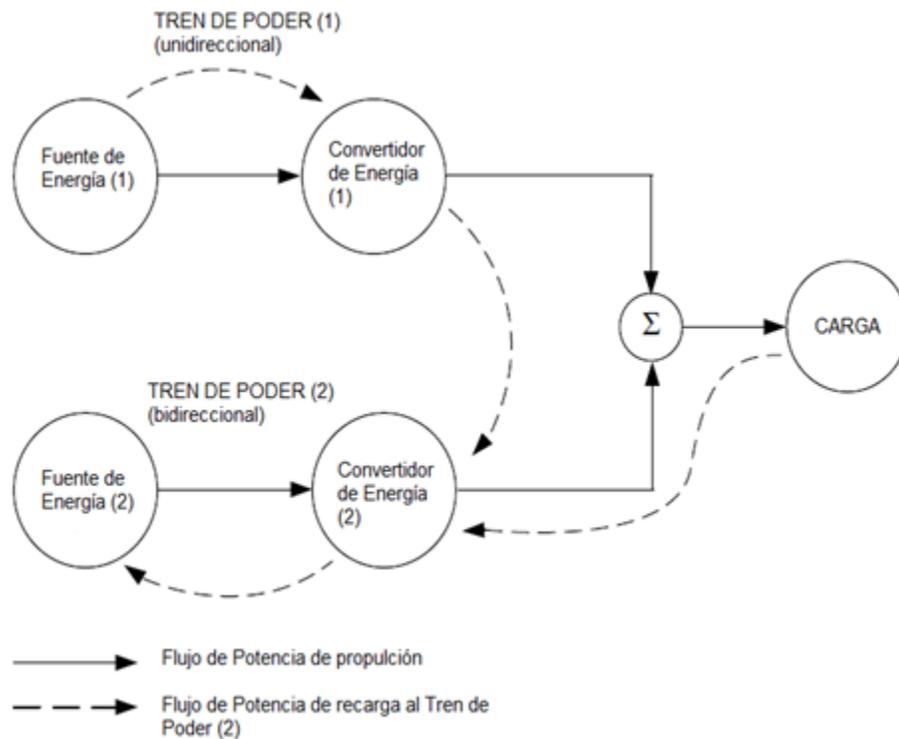


Figura 2.1 Esquema del tren de accionamiento híbrido – eléctrico¹

¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 118 p.

Los vehículos híbridos eléctricos usan dos fuentes de energía, una fuente primaria y una secundaria, combinando las ventajas de ambos tipos de vehículos para así superar sus desventajas.

Hay muchos modelos disponibles de la combinación de los flujos de energía para cumplir los requisitos de carga tal como se describe a continuación

1. Tren de propulsión 1 solo entregan energía a la carga.
2. Tren de propulsión 2 solo entregan energía a la carga
3. Los trenes de propulsión 1 y 2 entregan energía a la carga al mismo tiempo.
4. El tren de propulsión 2 obtiene energía de la carga (frenado regenerativo)
5. El tren de propulsión 2 obtiene energía del tren de propulsión 1
6. El tren de propulsión 2 obtiene energía del tren de propulsión 1 y de la carga al mismo tiempo.
7. El tren de propulsión 1 entrega energía a la carga y al tren de propulsión 2 al mismo tiempo.
8. El tren de propulsión 1 entrega energía al tren de propulsión 2 y el tren de propulsión 2 entrega energía a la carga.
9. El tren de propulsión 1 entrega energía a la carga y la carga entrega energía al tren de propulsión 2.

En el caso de utilizar un combustible líquido para motor de combustión interna (en el tren de propulsión 1) y una máquina eléctrica a baterías (en el tren de propulsión 2).

Sería el sistema de propulsión modelo 1 este puede ser usado cuando las baterías están casi totalmente descargadas y al motor no le sobra energía para cargar las baterías, o cuando las baterías han sido totalmente cargadas y el motor está en condiciones de proveer suficiente energía para satisfacer las demandas de energía del vehículo.

El modelo 2 es solamente eléctrico, en el cual el MCI está apagado, este modelo puede ser utilizado en condiciones en las cuales el trabajo del motor no es de lo más eficiente, como velocidades muy bajas o lugares donde las emisiones son totalmente prohibidas.

El modelo 3 es de propulsión híbrida, y puede ser utilizado cuando grandes cantidades de energías son requeridas, como en fuertes aceleraciones o al subir colinas muy empinadas.

El modelo 4 es de frenos regenerativos, por el cual la energía cinética o energía potencial del vehículo es recuperada por un motor eléctrico que funciona como un generador. La energía recuperada es almacenada en baterías y reutilizada posteriormente.

El modelo 5 es en el cual el motor carga las baterías mientras se encuentra en ralentí, en modo crucero o descendiendo levemente de velocidad, en donde la energía ni va ni viene de la carga.

El modelo 6 es en el cual tanto los frenos regenerativos como el MCI cargan las baterías simultáneamente.

El modelo 7 es en el cual el MCI impulsa al vehículo y carga las baterías al mismo tiempo.

El modelo 8 es el modo en que el motor carga las baterías, y las baterías suministran energía a la carga.

El modelo 9 es en el cual la energía proveniente del calor del motor a través de la masa del vehículo fluye dentro de la batería. La típica configuración de este modelo son dos trenes de propulsión separados montados en el eje delantero y en el eje trasero del vehículo.

Los variados modos de operación de los vehículos híbridos crean mayor flexibilidad sobre un tren de tracción. Con una adecuada configuración y control, aplicando un modelo específico para cada condición de operación podemos optimizar el rendimiento total, la eficiencia y las emisiones. Sin embargo en el diseño práctico, decidir qué modelo debería usarse depende de varios factores tales como: la configuración física del tren de tracción, la eficiencia del sistema de propulsión, las características de la carga, etc.

Operar cada tren de tracción en su región óptima de eficiencia es esencial para la eficiencia total del vehículo. Un MCI generalmente tiene su región de eficiencia operativa más óptima con la válvula reguladora del acelerador totalmente abierta. Operar fuera de este rango reduciría en gran magnitud la eficiencia del vehículo. Por otro lado, una reducción de la

eficiencia en el motor eléctrico no es tan determinante como para un MCI trabajar fuera de su rango óptimo de operación.

La energía de carga de un vehículo varía en forma aleatoria en la operación real debido a la aceleración frecuente, desaceleraciones, subidas y bajadas de pendientes. Actualmente la energía de carga está compuesta por: una energía constante (promedio) un valor constante, y una energía dinámica, la cual tiene un promedio de cero. En la estrategia de un vehículo híbrido, un tren de propulsión al que le favorece una operación en estado estacionario, como una celda de combustible de MCI, puede ser utilizada para entregar el promedio de energía. Por otro lado, otro tren de propulsión como un motor eléctrico puede ser utilizado para suministrar la energía dinámica. La energía total de salida del tren de propulsión dinámico será cero durante todo el ciclo. Esto implica que la fuente de energía del tren de propulsión dinámico no pierda capacidad de energía al final del ciclo, esto funciona únicamente como un amortiguador energético.

En un vehículo híbrido, la energía constante puede ser entregada por un MCI, una celda de combustible, un motor Stirling, etc. El MCI y las celdas de combustibles pueden ser mucho más pequeñas que un único diseño de tren de propulsión ya que la energía dinámica es tomada de la fuente de energía dinámica. La energía dinámica puede ser suministrada por un motor eléctrico con baterías electroquímicas, ultra capacitores, volantes (baterías mecánicas) y otras combinaciones.

La arquitectura del vehículo híbrido esta vagamente definido como la conexión entre los componentes que definen las rutas del flujo de energía y los puertos de control. Tradicionalmente los VHEs estaban clasificados en dos tipos básicos: serie y paralelo. Sin embargo los modelos nuevos de VHEs no pueden ser clasificados en ninguno de estos dos tipos. Es por eso que hoy en día los VEHS están clasificados en cuatro tipos: Híbrido en Serie, Híbrido en paralelo, Híbrido paralelo-serie e Híbrido complejo, cuyo funcionamiento se muestra en la siguiente figura:

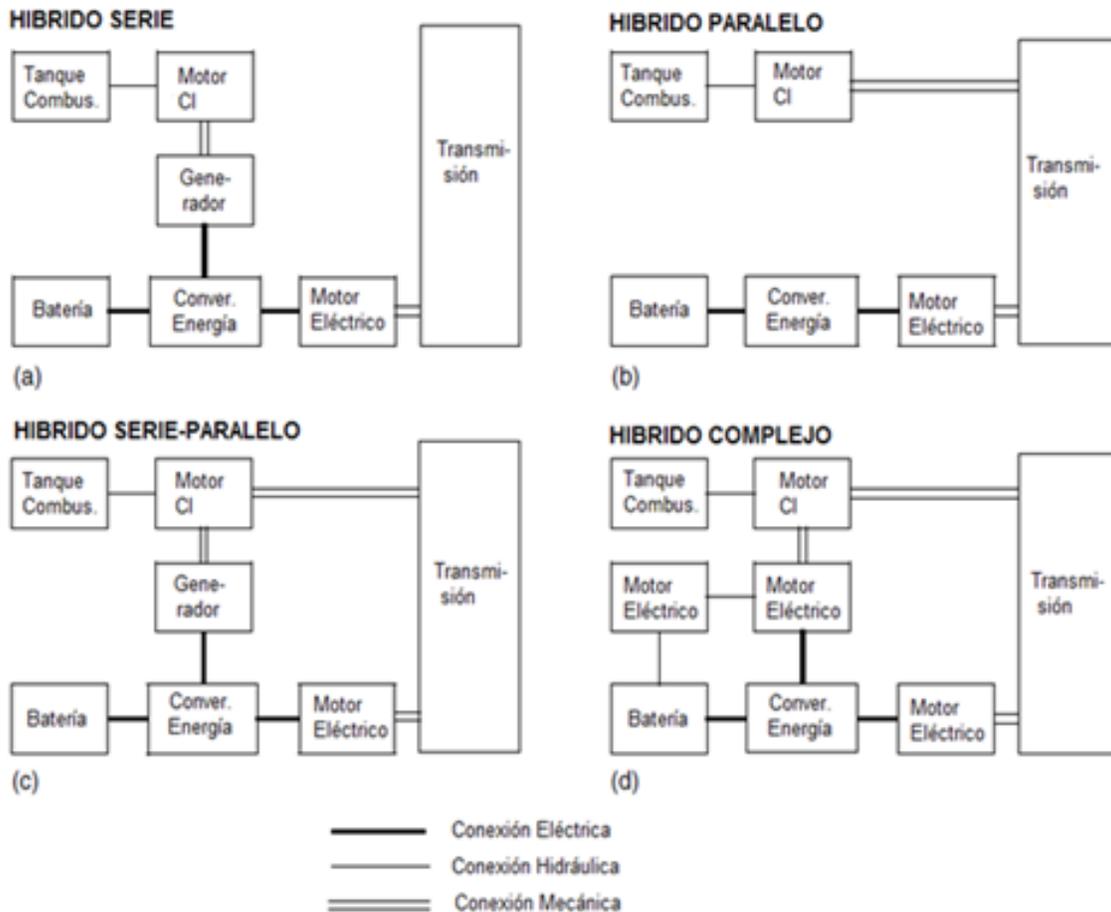


Figura 2.2 Clasificación del modo de conexión de vehículos híbridos²

En la figura 2.2 se muestra un tanque para el MCI y una batería para el motor eléctrico, los cuales representan un ejemplo, respectivamente, de la fuente de energía primaria (fuente de energía constante) y la fuente de energía secundaria (fuente de energía dinámica).

- **Híbridos en serie:**

Un tren de tracción híbrido en serie es en el cual dos fuentes de energía alimentan un solo motor (motor eléctrico) que impulsa el vehículo.

El más común de los trenes de tracción en serie es el tren de tracción híbrido en serie que se muestra en la figura 2.3:

² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 121 p.

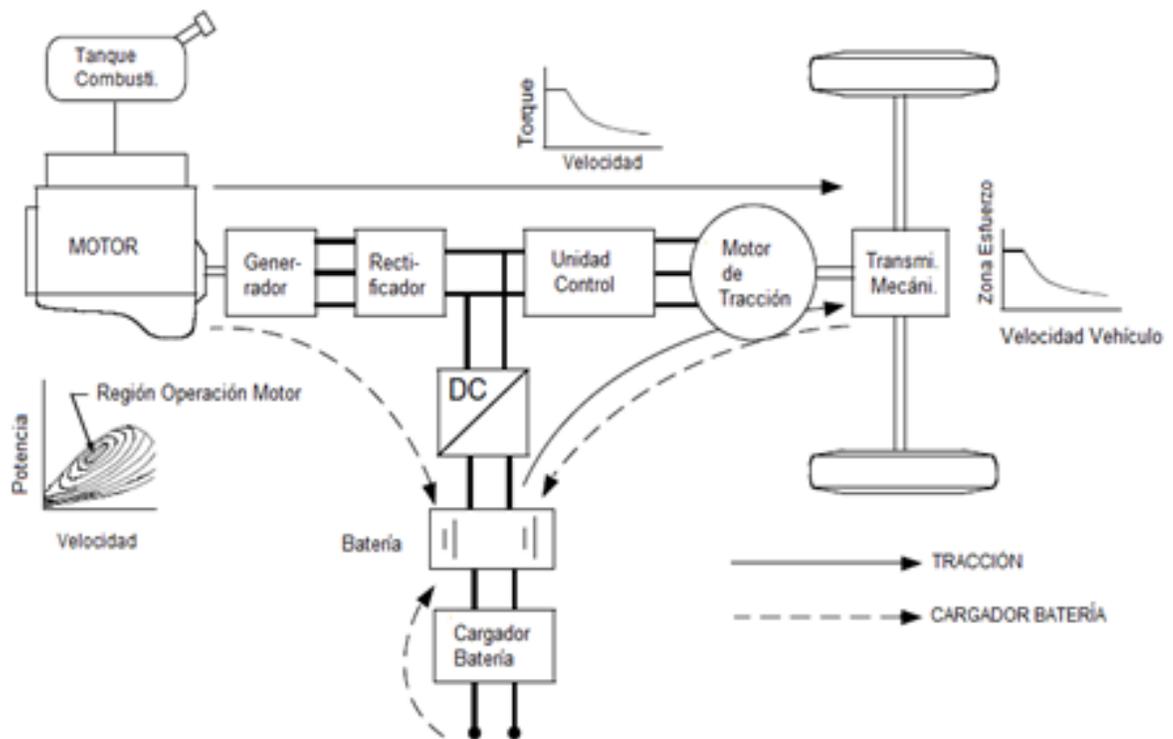


Figura 2.3 Configuración del tren de potencia híbrido – eléctrico en serie³

En este tipo de tren de tracción la fuente unidireccional de energía es el tanque de combustible y el encargado de convertir esta energía unidireccional es un motor conectado a un generador eléctrico. La salida del generador de energía eléctrica está conectada a un bus de energía eléctrica a través de un convertidor electrónico (rectificador).

La fuente de energía bidireccional es un paquete de baterías electroquímicas, conectados al bus por medio de un convertidor de electrónica de potencia (convertidor DC / DC).

El bus eléctrico también está conectado al controlador del motor eléctrico de tracción. El motor de tracción puede ser utilizado como motor o como generador, y en ambos sentidos, para adelante o en modo de reversa. Este tren de tracción puede necesitar un cargador de baterías para cargar las baterías a toma corrientes de pared de la red eléctrica.

³ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 122 p.

El tren de tracción en serie tiene potencialmente los siguientes modos de operación:

1. Modo solo eléctrico: El motor es apagado y el vehículo es impulsado únicamente por las baterías.
2. Modo solo motor: La energía para impulsar el motor proviene únicamente del motor generador, mientras que las baterías ni aportan ni demanda energía a la fuente. Las máquinas eléctricas sirven como una transmisión electrónica desde el motor hasta las ruedas.
3. Modo Híbrido: la energía utilizada para la propulsión del vehículo proviene de las dos fuentes del poder, tanto del MCI como del ME.
4. Modo de Tracción y carga de baterías por motor: El motor generador se encarga de proporcionar la energía para cargar las baterías y para impulsar el vehículo.
5. Modo de frenos regenerativos: El motor generador es apagado y el motor de tracción es operado como generador. La energía generada es ocupada para cargar las baterías.
6. Modo de carga de Baterías: El motor de tracción no recibe energía y el motor generador carga las baterías.
7. Modo Híbrido de carga de baterías: El motor generador y el motor de tracción operando como generador, cargan las baterías.

Ventajas del Tren de tracción híbrido en serie:

1. El motor es completamente mecánico cuando se lo desacopla de las ruedas impulsoras. Por lo tanto puede operar en cualquier punto de su mapa característico de Torque y Velocidad, y potencialmente la máxima eficiencia puede ser explotada exclusivamente dentro de su región. Como se muestra en la figura 2.3.

2. La eficiencia y las emisiones del motor pueden mejorar aún más, mediante un diseño óptimo y un control en esta pequeña región. Además, el desacoplar mecánicamente el motor de las ruedas impulsadoras nos permiten utilizar un motor de alta velocidad. Esto hace difícil poder impulsar las ruedas directamente a través de un enlace mecánico, tales como las turbinas de gas o motores eléctricos, con una dinámica lenta, como el motor Stirling.
3. Como el motor eléctrico tiene características casi ideales de Torque y Velocidad, no necesita una transmisión con velocidades. Por lo tanto su construcción es muy simple y el costo es reducido. Además, en vez de utilizar un motor con un diferencial de engranes, se puede utilizar dos motores, cada uno impulsando una sola rueda. Esto nos provee de velocidad en el desacople entre la ruedas como el diferencial, pero también actúa como un diferencial de deslizamiento limitado para fines de control de tracción. El refinamiento final sería utilizar cuatro motores, con eso se convertiría en un vehículo "all-wheel-drive" sin el costo y la complejidad del diferencial y los ejes de transmisión que atraviesan el cuadro.
4. Simples estrategias de control pueden ser usadas como resultados del desacople mecánico generado por la transmisión eléctrica.

Desventajas del Tren de tracción híbrido en serie:

1. La energía generada por el motor es convertida dos veces (de mecánica a eléctrica por el generador y de eléctrica a mecánica por el motor de tracción). Por lo que la ineficiencia del generador y del motor de tracción son sumadas y las pérdidas pueden ser significativas.
2. El generador incrementa el peso y el costo.
3. El motor de tracción debe ser del tamaño adecuado para alcanzar los máximos requerimientos ya que es el único motor que impulsa al vehículo.

- **Híbridos en paralelo:**

Un tren de tracción híbrido en paralelo es en el cual el motor proporciona energía mecánica a las ruedas como en un vehículo convencional con MCI, este es asistido por un motor eléctrico que es mecánicamente acoplado a la transmisión. La energía generada por el MCI y el ME se une mediante un acople mecánico como se muestra en la figura 2.4.

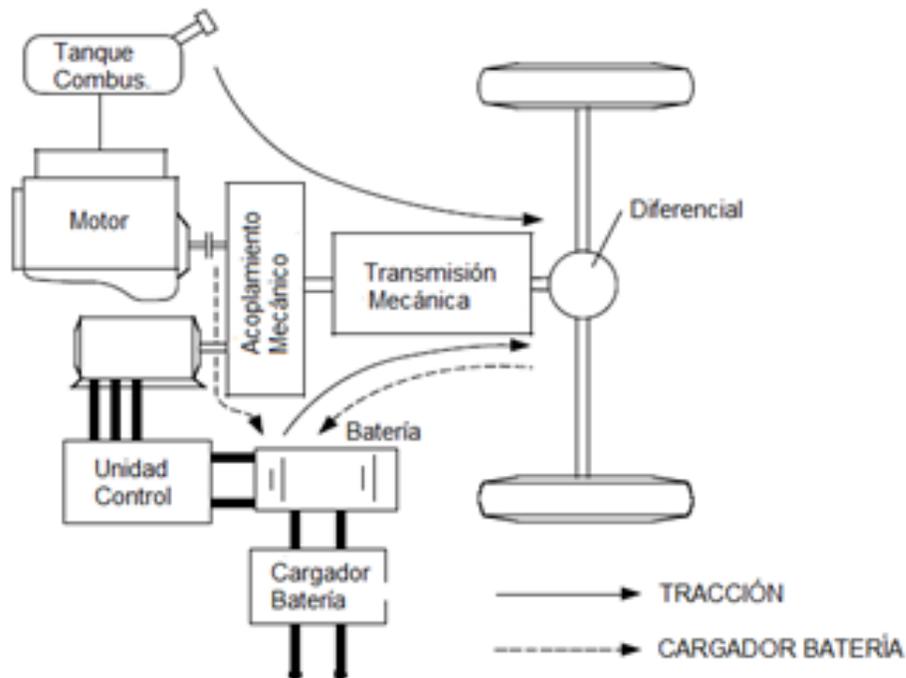


Figura 2.4 Configuración del tren de tracción en paralelo⁴

La combinación mecánica de los dos motores deja espacio para varias configuraciones diferentes las cuales se detallan a continuación:

⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 124 p.

Combinación de torque en el Tren de Tracción Híbrido en Paralelo

El acople mecánico que se muestra en la figura 2.4 es un acople de torque o de velocidad. En el acople de torque se suman los torques del MCI y del ME, o se divide el torque en dos partes: una para cargar las baterías y otra para impulsar el vehículo.

En la figura 2.5 que se muestra un acople mecánico, el cual tiene dos entradas. Una que proviene del MCI y la otra del ME. La salida de la suma de los torques en el acople mecánico se conecta a la transmisión.

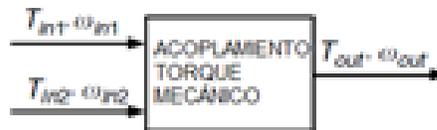


Figura 2.5 Esquema de acoplamiento de torque⁵

Si las pérdidas son ignoradas, el torque y la velocidad de salida pueden ser descritos por las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente:

$$T_{out} = k_1 T_{in1} + k_2 T_{in2} \quad (2.1)$$

$$\omega_{out} = \frac{\omega_{in1}}{k_1} + \frac{\omega_{in2}}{k_2} \quad (2.2)$$

Donde k_1 y k_2 son constantes determinadas por los parámetros del acople mecánico.

⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 125 p.

En la figura 2.6 se puede observar algunos de los elementos típicamente usados.

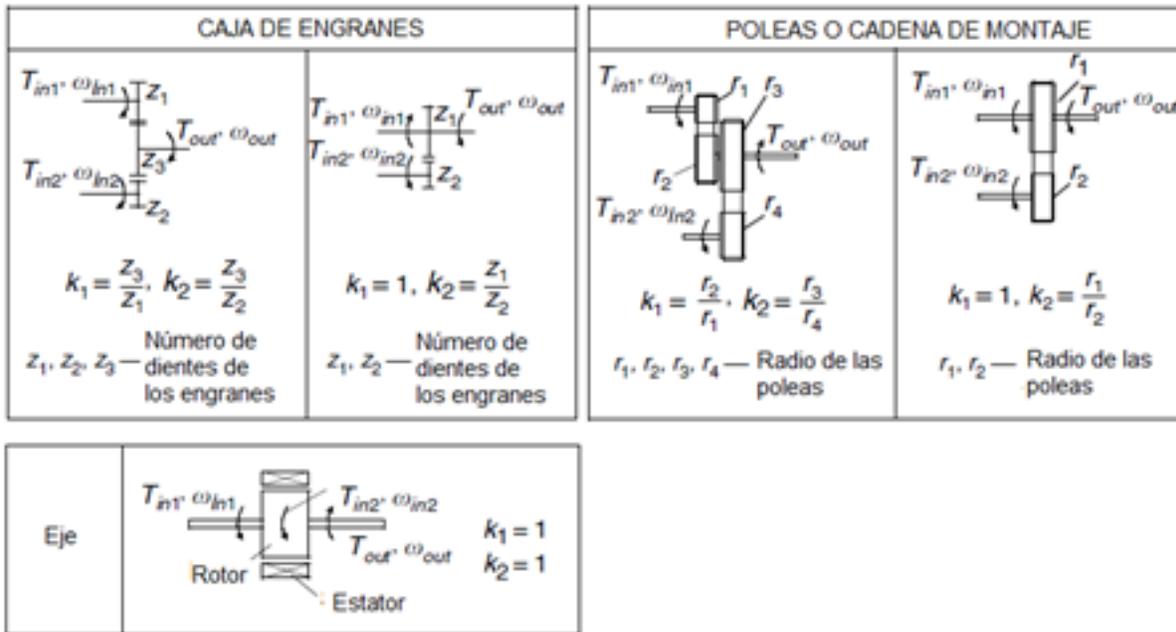


Figura 2.6 Esquema comúnmente usado para el acoplamiento mecánico⁶

Hay una variedad de configuraciones en el acople mecánico en trenes de tracción híbridos.

Estos están clasificados en diseños de uno y dos ejes. En cada categoría, la transmisión puede ser colocada en diferentes posiciones y diseñada con diferentes engranes, lo que da por resultado diferentes características de tracción. El diseño óptimo dependerá en su mayoría de los requerimientos de tracción, del tamaño y las características de los motores, etc.

En la figura 2.7 se muestra un diseño con una configuración de dos ejes, en el cual dos transmisiones son usadas: una es colocada entre el MCI y el acople mecánico mientras que la otra es colocada entre el ME y el acople mecánico. Ambas transmisiones pueden ser simples o de múltiples engranes.

⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 125 p.

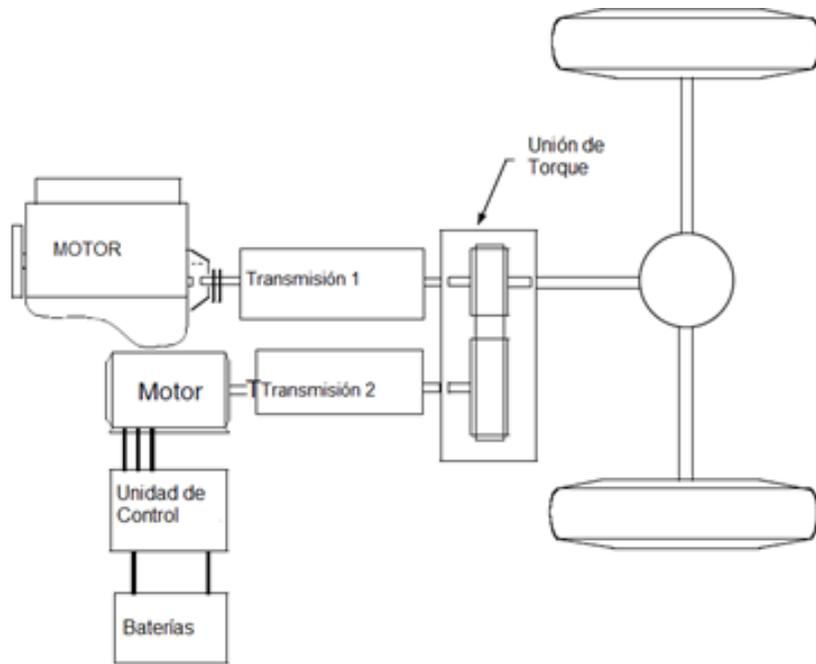


Figura 2.7 Configuración de doble eje 1⁷

Los perfiles de los esfuerzos de tracción y velocidad del vehículo con diferentes parámetros de transmisión los podemos apreciar en la figura 2.8. Está claro que dos transmisiones con múltiples engranes producen muchos perfiles de esfuerzo de tracción.

⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 126 p.

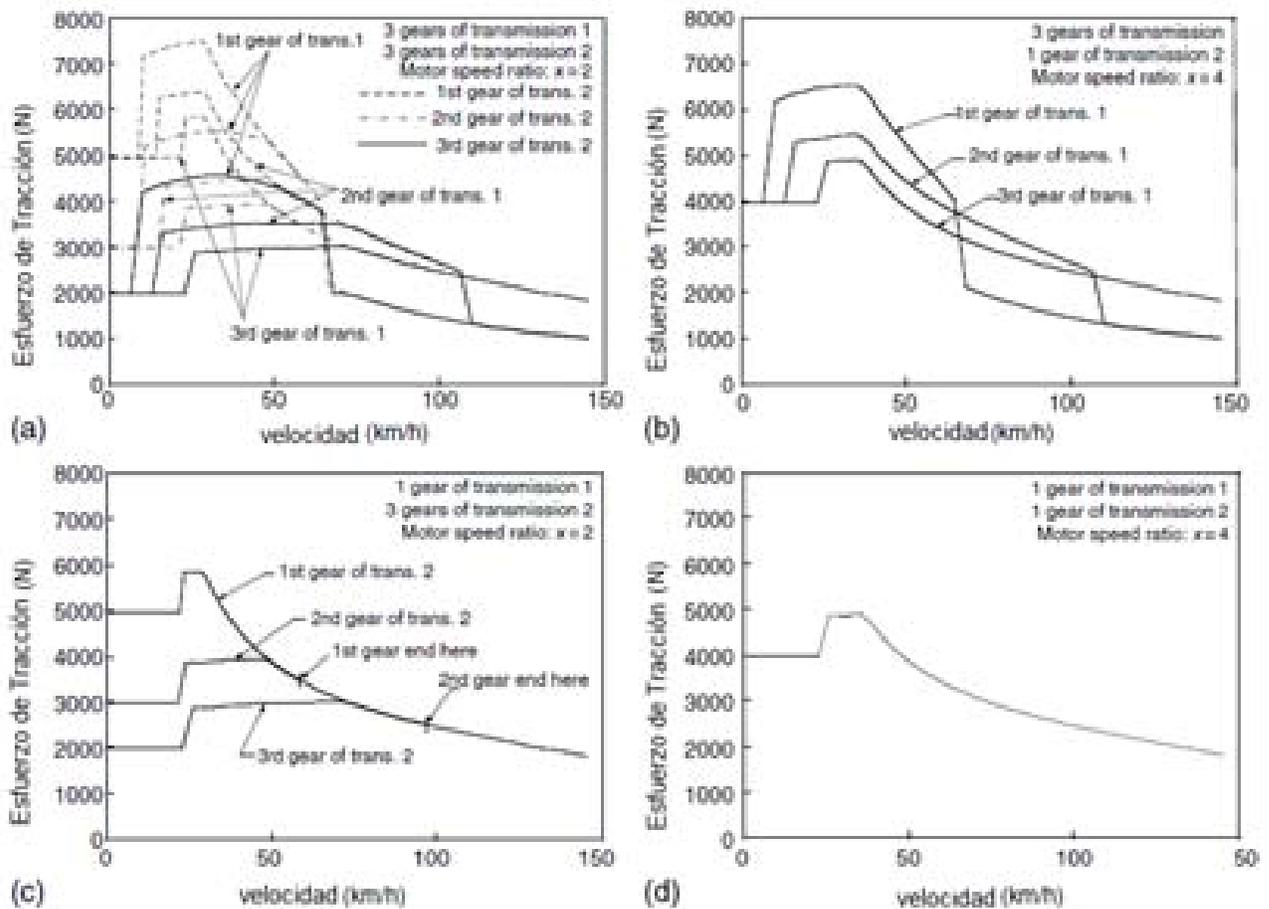


Figura 2.8 Esfuerzo de Tracción vs Velocidad de vehículo con diferentes juegos de engranes de transmisión⁸

El rendimiento y la eficiencia total del tren de tracción puede ser superior a otros diseños, ya que dos transmisiones con múltiples engranes dan mayor oportunidad para ambos motores de operar en su región óptima. Este diseño también da mayor flexibilidad para el diseño de las características del MCI y del ME.

Sin embargo, dos transmisiones con múltiples engranes complicará notablemente la transmisión.

⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 126 p.

En la figura 2.8, se puede usar la transmisión 1 con un solo engrane y la transmisión 2 con múltiples engranes. El perfil de los esfuerzos de tracción y velocidad del vehículo los podemos apreciar en el literal b) de figura 2.8.

En este diseño del tren de tracción híbrido, el esfuerzo de tracción máximo que permite esta configuración de las transmisiones sería suficiente para un buen rendimiento en la subida de pendientes; no necesitamos mayor esfuerzo de tracción debido a la limitación de la adherencia en el contacto del neumático con el suelo. El uso de una transmisión con un solo engrane aprovecha las características inherentes del alto torque de las máquinas eléctricas a bajas velocidades.

La transmisión 2 con múltiples engranes es usada para cubrir las desventajas de las características de torque y velocidad de los ME (disminución de torque de salida según la velocidad). Las múltiples velocidades de la transmisión 2 también tienden a mejorar del motor y reducir el rango de velocidad del vehículo, en el que solo una máquina eléctrica debe propulsar el vehículo, consecuentemente reduce la descarga de las baterías en un 50 por ciento.

En contraste con el anterior diseño, en el literal c) de la figura 2.8 se muestra el perfil de los esfuerzos de tracción y velocidad del vehículo con dos transmisiones de un solo engrane, en donde la transmisión 1 va para el MCI y la transmisión 2 para el ME. Este diseño es considerado no favorable, ya que no se utiliza la ventaja de los dos motores.

En el literal d) de la figura 2.8 muestra el perfil de los esfuerzos de tracción y velocidad del vehículo, el cual tiene dos transmisiones simples (un solo engrane). Este arreglo resulta en una simple configuración y control. La limitación para la aplicación de este tipo de configuración es el esfuerzo máximo de tracción. Cuando los parámetros de potencia del MCI, motor eléctrico, baterías y transmisión están diseñados apropiadamente, este tren de tracción le serviría al vehículo para tener un rendimiento y eficiencia satisfactorios.

Otra configuración de dos ejes en paralelo para un tren de tracción híbrido se muestra en la figura 2.9.

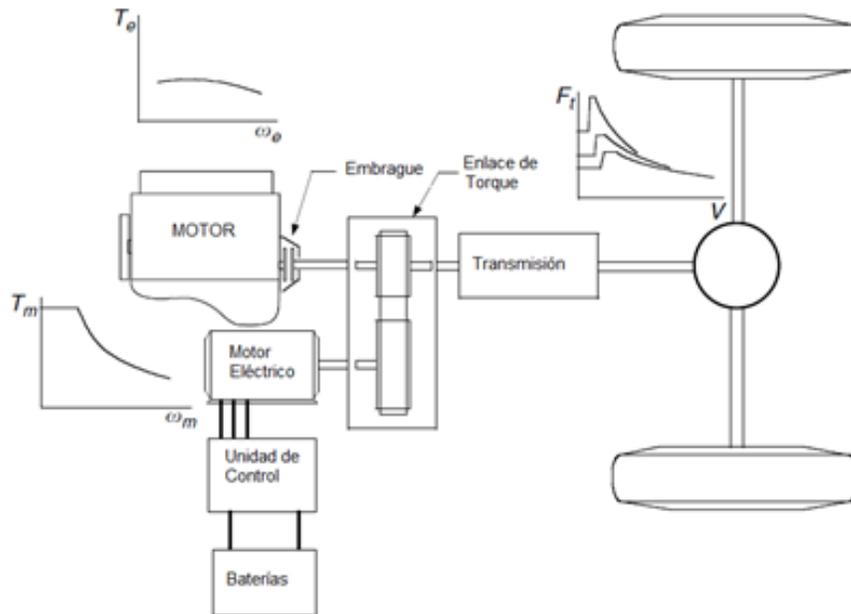


Figura 2.9 Configuración de doble eje 2^º

En esta configuración la transmisión está ubicada entre el acople de torque y el eje de movimiento. Las funciones de la transmisión mejoran el torque de ambos motores en la misma escala. Diseñar las constantes k_1 y k_2 en el acople de torque le permite al motor eléctrico tener un rango de velocidad diferente que el del MCI, por lo tanto un motor de alta velocidad puede ser usado.

Esta configuración podría ser usada en el caso que se utilicen motores relativamente pequeños y en el caso que se necesite una transmisión de múltiples engranes para mejorar el esfuerzo de tracción a bajas velocidades.

La simple y compacta estructura del acople de torque en el tren de tracción paralelo es un eje de simple configuración donde el rotor del motor eléctrico funciona como el acople de torque, como se muestra en las figuras 2.10 y 2.11.

⁹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 127 p.

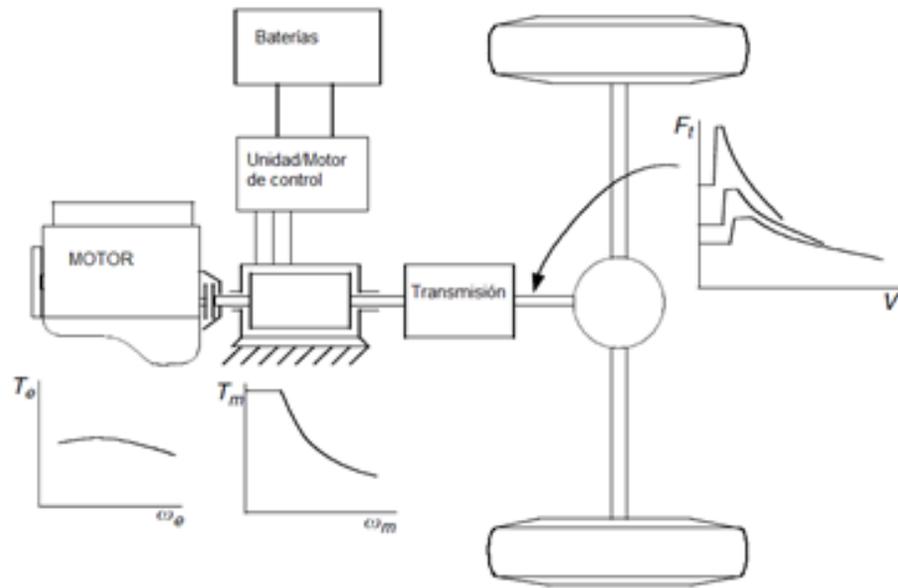


Figura 2.10 Pre transmisión de combinación en un solo eje (Paralelo)¹⁰

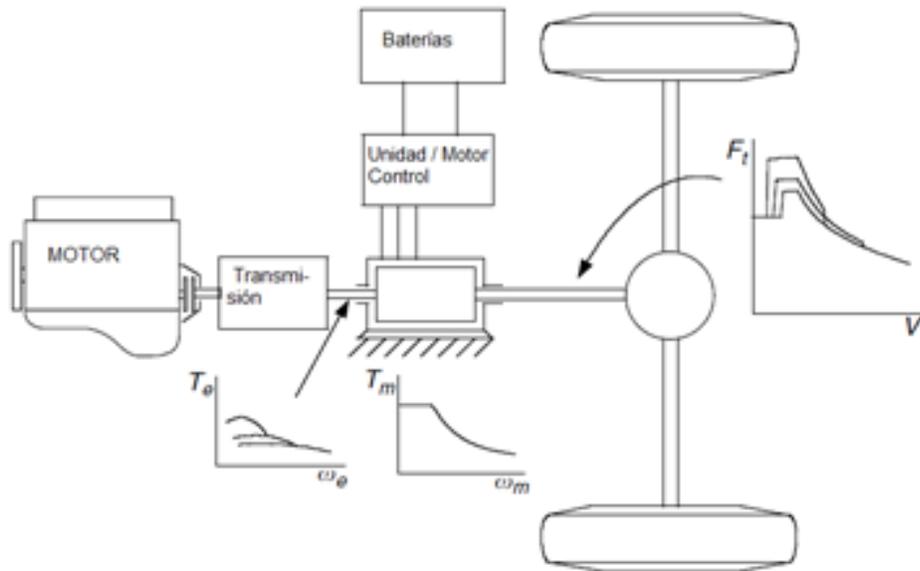


Figura 2.11 Post transmisión de combinación en un solo eje (Paralelo)¹¹

¹⁰ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 128 p.

¹¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 129 p.

La transmisión puede ser colocada, entre el motor eléctrico que está conectado MCI mediante el embrague, o entre el MCI y el motor eléctrico. La primera configuración es conocida como “pre-transmisión” y la segunda como “post-transmisión”.

En la pre-transmisión tanto el torque del ME como el del MCI son modificados por la transmisión. Ambos motores deben tener el mismo rango de velocidad. Esta configuración es usualmente usada en casos de un motor eléctrico pequeño, conocido como un tren de tracción híbrido ligero, en él el motor eléctrico funciona como motor de arranque, generador eléctrico, motor de asistencia de energía, y freno regenerativo.

Sin embargo, en la configuración de post-transmisión mostrada en la figura 2.11, la transmisión puede modificar únicamente el torque del MCI mientras el torque del ME es entregado directamente a las ruedas impulsoras. Esta configuración puede ser usada en trenes de tracción donde se tengan grandes motores eléctricos con largas y constantes regiones de energía. La transmisión es utilizada únicamente para cambiar los puntos de operación del MCI para mejorar el rendimiento y la eficiencia operativa del mismo. Se debe considerar que las baterías no pueden ser cargadas por el MCI ejecutando el motor eléctrico como generador cuando el vehículo está parado y el motor está rígidamente conectado a las ruedas motrices.

Otro acople de torque en tren de tracción híbrido paralelo es la arquitectura de ejes separados, en él el MCI mueve un eje y el ME mueve otro. Los esfuerzos de tracción de los dos trenes de potencia se añaden a través del chasis del vehículo y la carretera. El principio operativo es similar al de la configuración de dos ejes mostrado en la figura 2.8

Tanto la transmisión del ME como la del MCI pueden ser de un solo engrane o de múltiples engranes. Las características de los esfuerzos de tracción de esta configuración son similares a los mostrados en la figura 2.8

La arquitectura de ejes separados ofrece alguna de las ventajas de un vehículo convencional. Mantiene sin alterar el MCI original con su transmisión y se suma un sistema de tracción eléctrica en el otro eje. También tiene tracción en las cuatro ruedas, lo que optimiza la tracción en caminos resbalosos y reduce los esfuerzos de tracción por cada rueda.

Sin embargo, el motor eléctrico y el eventual sistema de diferencial de engranes ocupan un espacio considerable y puede reducir el espacio disponible para pasajeros y equipaje. Este problema puede ser resuelto si la transmisión del motor es de un solo engrane y el motor eléctrico es remplazado por dos motores eléctricos de menor tamaño colocados en la ruedas motrices. Se debe tomar en cuenta que las baterías no pueden ser recargadas por el MCI cuando el vehículo se encuentra parado.

Combinación de velocidad en el Tren de Tracción Híbrido en Paralelo

Las potencias generadas por dos fuentes de energía pueden ser combinadas acoplando sus velocidades como se muestra en la siguiente figura.

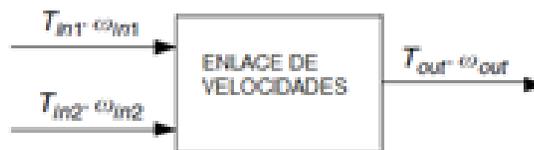


Figura 2.12 Enlace de velocidades¹²

Las características de la combinación de velocidad se pueden describir por:

$$\omega_{out} = k_1 \omega_{in1} + k_2 \omega_{in2} \quad (2.3)$$

$$T_{out} = \frac{T_{in1}}{k_1} + \frac{T_{in2}}{k_2} \quad (2.4)$$

Donde K1 y K2 son las constantes asociadas con este tipo de diseño.

En la figura 2.13 se muestran dos dispositivos típicos para la combinación de velocidades: uno es una unidad de engranes planetarios y el otro es un motor eléctrico con estator flotante, también conocido como transmotor. Una unidad de engranaje planetario es un sistema que consta del engranaje central o planeta, la corona dentada, y los engranajes satélites 1, 2 y 3, respectivamente.

¹² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 130 p.

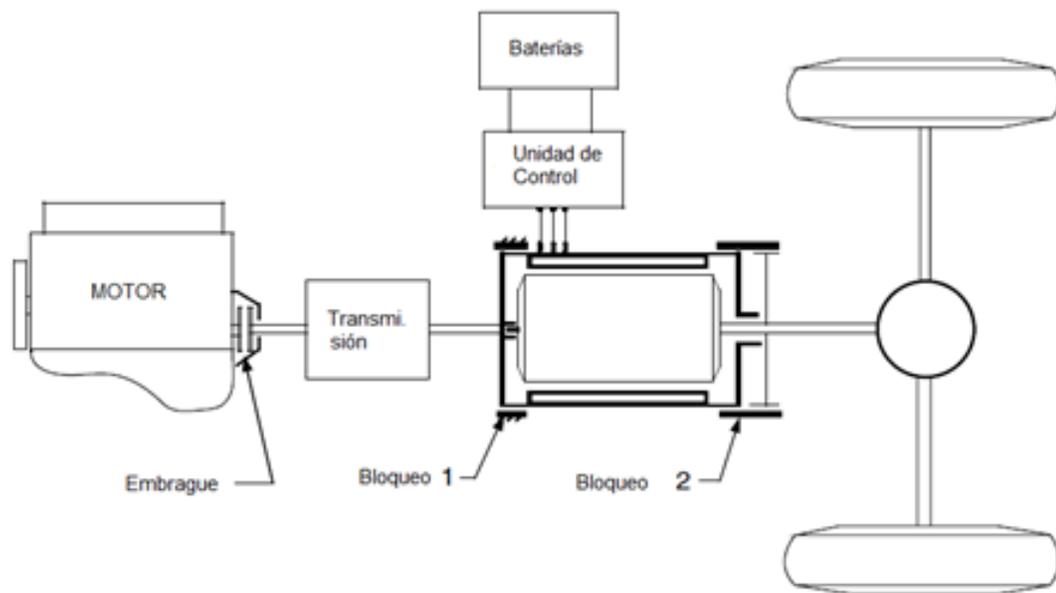


Figura 2.14 Tren de tracción Híbrido – Eléctrico con enlace de velocidad mediante transmisor eléctrico¹⁴

En el primer ejemplo, la energía entregada por el MCI va al engranaje central o planeta a través del embrague y de la transmisión. La transmisión es usada para modificar las características de torque y velocidad del MCI para que cumpla con los requerimientos de tracción. El motor eléctrico entrega su energía a la corona dentada a través de un par de engranes. Los seguros 1 y 2 son utilizados para asegurar el engranaje central, y la corona dentada para un supuesto que el motor este en reposo y así satisfacer los requerimientos de los distintos modos de operación.

Los modos de operación que se pueden dar son los siguientes:

1. Tracción Híbrida: Cuando los seguros 1 y 2 son liberados y el engrane central y la corona dentada pueden girar y ambos motores (MCI y ME) entregan velocidad y torque positivo al tren de tracción.
2. Tracción por MCI: Cuando el seguro 2 asegura a la corona dentada al marco del vehículo y el seguro 1 es liberado para que solamente el MCI entregue energía a las ruedas motrices.

¹⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 132 p.

3. Tracción por ME: Cuando el seguro 1 asegura al engranaje central al marco del vehículo (cuando se apaga el MCI o el embrague esta desacoplado) y seguro 2 es liberado para que solamente él ME entregue energía a las ruedas motrices.
4. Frenos Regenerativos: El seguro uno está puesto en su posición de bloqueo, el MCI está apagado o el embrague se encuentra desacoplado, y el motor eléctrico se opera en modo regenerativo (torque negativo). La energía cinética o potencial del vehículo pueden ser absorbidas por el sistema eléctrico.
5. Carga de baterías desde el MCI: Cuando se hace operar al motor eléctrico a velocidad negativa, este absorbe la energía desde el MCI.

La opción 2 es una configuración pero con un transmisor. Los seguros 1 y 2 son utilizados para asegurar al estrato al marco del vehículo, y al estator al rotor respectivamente. Este tren de tracción puede cumplir todos los modos de operación mencionado en el párrafo anterior.

La principal ventaja de un tren de tracción híbrido con combinación de velocidades de las dos fuentes de energía están desconectadas, por lo tanto las velocidades de ambas pueden ser elegidas libremente. Esta ventaja es muy importante para fuentes de energía como el motor Stirling o la turbina de gas, en los cuales las eficiencias son más sensibles a la velocidad que al torque.

Tren de Tracción Híbrido en Paralelo con Combinación de torque y combinación de velocidad

Mediante la combinación de torque y la combinación de velocidad en conjunto, uno puede constituir un sistema de tracción híbrido en la que la combinación de torque y la combinación velocidad pueden ser elegidas alternativamente. En la siguiente figura se ve un ejemplo. Cuando el modo de operación de combinación de torque es elegido, el seguro 2 asegura a la corona dentada de sistema de engranajes planetarios al marco del vehículo, mientras que el embrague 1 y 3 están conectados y el embrague dos esta desconectado. La energía entrega por el MCI y el ME se suman al combinar los torques, y esta energía es

entregada las ruedas motrices. En el caso de que el torque del MCI y el torque del ME estén desconectados, pero sus velocidades estén relacionadas.

En el caso de que el modo de operación de combinación de velocidades sea elegido, el embrague 1 está conectado considerando que el embrague 2 y 3 están desconectados, y los seguros 1 y 2 liberan el engranaje central y la corona dentada. La velocidad del porta satélites, conectado a las ruedas motrices, es la combinación de la velocidad del MCI y del ME. Pero el torque del MCI, el torque del ME y el torque del eje motriz se mantienen en su relación fijada.

Con la opción de elegir entre combinación de torque o combinación de velocidad, las fuentes de energía tienen más oportunidad de elegir su modo de operación y su rango operativo, así como optimizar su rendimiento. En el momento de bajas velocidades del vehículo, el modo de combinación de torque sería adecuado para altas aceleraciones o subidas de pendientes. Por otro lado, a altas velocidades del vehículo, el modo de combinación de velocidad sería el adecuado para mantener la velocidad del MCI en su región óptima.

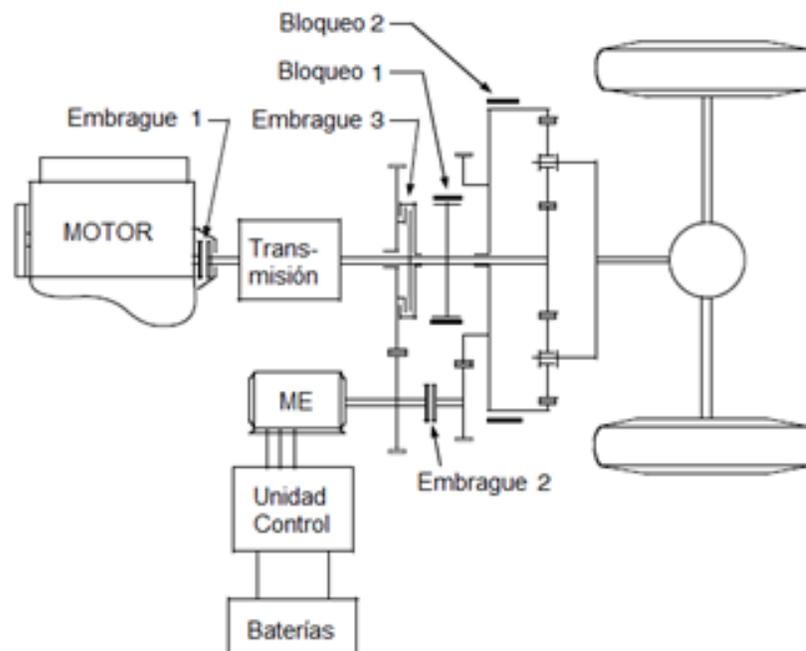


Figura 2.15 Torque y velocidad alternados en tren de potencia de híbrido eléctrico con unidad de engranes planetarios¹⁵

¹⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 133 p.

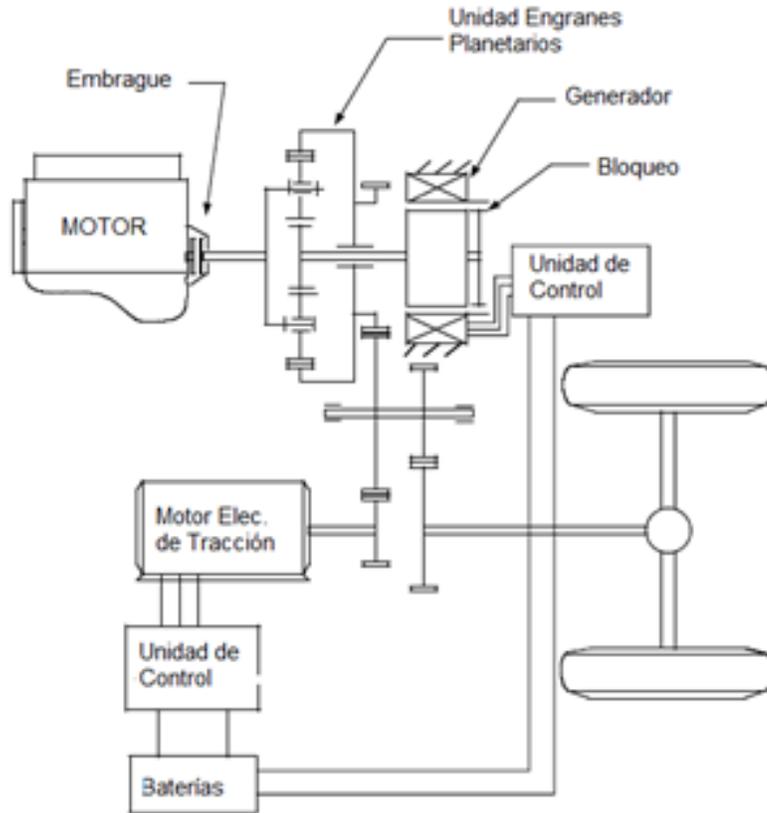


Figura 2.17 Integración de velocidad y torque (Tren de Tracción Híbrido)¹⁷

Un pequeño motor eléctrico o generador (de pocos kilovatios) es conectado por medio de un sistema de engranaje planetario (combinación de velocidad), el cual divide la velocidad del MCI en dos velocidades. Una es enviada por medio del engranaje central hacia el pequeño ME y la otra es enviada hacia las ruedas motrices por medio de la corona dentada y arreglo de un eje con un solo engrane (combinación de torque). Un motor de tracción largo (menos de 10 kilovatios) es también conectado a este eje de un solo engrane conformando una línea de conducción de la combinación de torque en paralelo. Abajas velocidades el ME gira a velocidades positivas y absorbe parte de la energía del MCI. Cuando la velocidad del vehículo aumenta, a medida que aumenta la velocidad del vehículo y la velocidad del MCI se fija en un valor determinado, la velocidad del ME disminuye a cero, esto es conocido como sincronización de velocidad.

¹⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 135 p.

A esta velocidad el seguro se activara para bloquear al rotor y al estator. En ese momento el tren de tracción es paralelo. Cuando el vehículo está girando a altas velocidades, a fin de evitar una velocidad muy alta del MCI, lo que significaría un alto consumo de combustible, el pequeño motor puede funcionar con una velocidad negativa para que suministrar potencia al tren de tracción.

Una alta economía de combustible se puede lograr cuando el engranaje planetario y el motor pequeños se utilizan para ajustar la velocidad del motor con el fin de operar en el rango de velocidad óptima.

2.3. Elementos Constitutivos

2.3.1. Sistema Convencional

Tren de Potencia

Un tren de potencia del automotor, como se muestra en la figura 2.18 consta de una planta de energía, un embrague de la transmisión manual o un par de convertidor en la transmisión automática, una caja de cambios (transmisión), último disco , el eje diferencial, y las ruedas motoras.

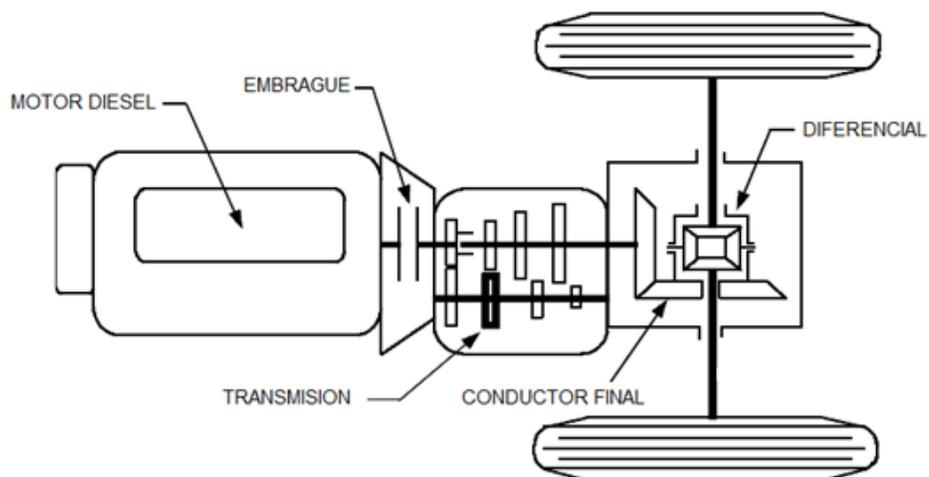


Figura 2.18 Tren de tracción de un vehículo¹⁸

¹⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 32 p.

Funcionamiento.- El par y la velocidad de rotación de la planta de potencia en el eje de salida se transmiten a las ruedas de tracción a través del embrague o el convertidor de par, caja de cambios, transmisión final, diferencial y eje de accionamiento.

El embrague

Se utiliza el disco seco en la transmisión manual de la caja de cambios para acoplar o desacoplar la desde la planta de energía. El convertidor de par en la transmisión automática es un dispositivo hidrodinámico, que funciona como el disco seco de la transmisión manual con una relación de transmisión variable continua.

Caja de velocidades

La principal función de este elemento es variar el torque entre las ruedas y el motor por lo tanto se puede considerar como un convertidor de fuerza.

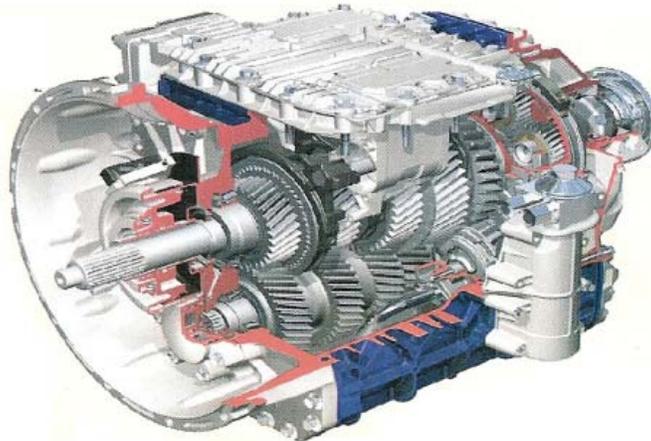


Figura 2.19 Caja de Velocidades¹⁹

Se pueden clasificar en dos tipos Automática y mecánica:

Mecánica.- la caja mecánica necesita de embrague, controlado por medio de un pedal que sirve para separar al motor de la transmisión y que modula la transferencia de fuerza entre los dos subsistemas.

¹⁹ <http://colbuses.wordpress.com/2008/04/05/nueva-caja-de-cambios-volvo-i-shift/>

Cuando el pedal no se presiona el torque del motor pasa a la transmisión. Si se presiona por completo se desconecta, para que no pase la fuerza del motor a la transmisión.

Más allá del embrague la transmisión se vale de varios diferenciales, seleccionados por el conductor, para convertir la fuerza del motor en un toque útil y así poder mover al vehículo.

Automática.- La caja automática es un sistema que, de manera autónoma, determina la mejor relación entre los diferentes elementos, como la potencia del motor, la velocidad del vehículo, la presión sobre el acelerador y la resistencia a la marcha, entre otros. Se trata de un dispositivo electro hidráulico que determina los cambios de velocidad; en el caso de las cajas de última generación, el control lo realiza un calculador electrónico. Mientras que la caja de cambios manual se compone de pares de engranajes cilíndricos, la caja automática funciona con trenes epicicloidales en serie o paralelo que conforman las distintas relaciones de transmisión.

Árbol de transmisión

Es un mecanismo formado por un eje en el que se colocan distintas levas, que pueden tener distintas formas y tamaños y estar orientadas de diferente manera, siendo considerado como un programador mecánico este elemento traslada las revoluciones desde la caja de velocidades hacia el diferencial y es utilizado en el caso de motores delanteros y propulsión. Básicamente se trata de una pieza de acero cilíndrica que está unida por sus extremos al diferencial y a la caja de cambios.

Diferencial

Un diferencial es el elemento mecánico que permite que las ruedas, derecha e izquierda de un vehículo giren a revoluciones diferentes, según éste se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro.

Mediante el diferencial se consigue que cada rueda pueda girar correctamente en una curva, sin perder por ello la fijación de ambas sobre el eje, de manera que la tracción del motor actúa con la misma fuerza sobre cada una de las dos ruedas.

El diferencial consta de engranajes dispuestos en forma de "U" en el eje. Cuando ambas ruedas recorren el mismo camino, por ir el vehículo en línea recta, el engranaje se mantiene en situación neutra. Sin embargo, en una curva los engranajes se desplazan ligeramente, compensando con ello las diferentes velocidades de giro de las ruedas.

La diferencia de giro también se produce entre los dos ejes. Las ruedas directrices describen una circunferencia de radio mayor que las no directrices, por ello se utiliza el diferencial.

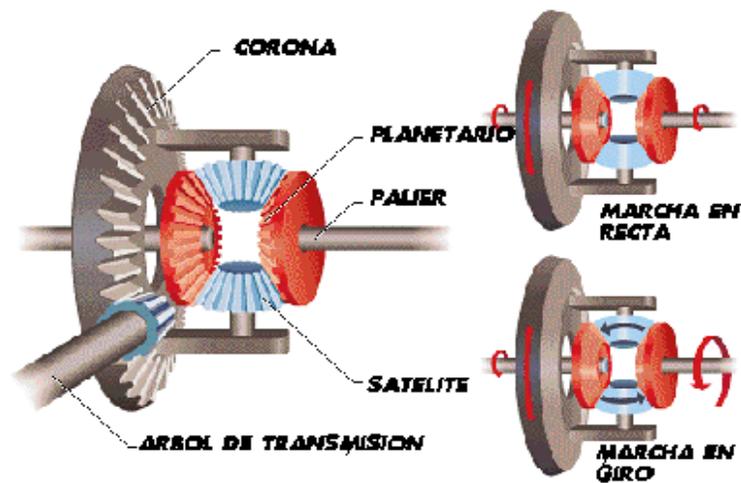


Figura 2.20 Esquema de un diferencial²⁰

Embrague

El movimiento de giro necesario para poner en movimiento el vehículo es transmitido a las ruedas por medio de un conjunto de mecanismos hasta el motor. Es imprescindible acoplar un mecanismo capaz de interrumpir o conectar suavemente la transmisión de movimiento entre el motor y las ruedas.

Cambiar de marcha o "velocidad" implica desconectar el motor del propio cambio durante un mínimo instante.

²⁰ <http://www.monografias.com/trabajos10/aplicac/aplicac.shtml>

El mecanismo que permite esto en las cajas manuales es el embrague, la función es síntesis es la transmisión o no del giro del motor según la acción determinada por el conductor.

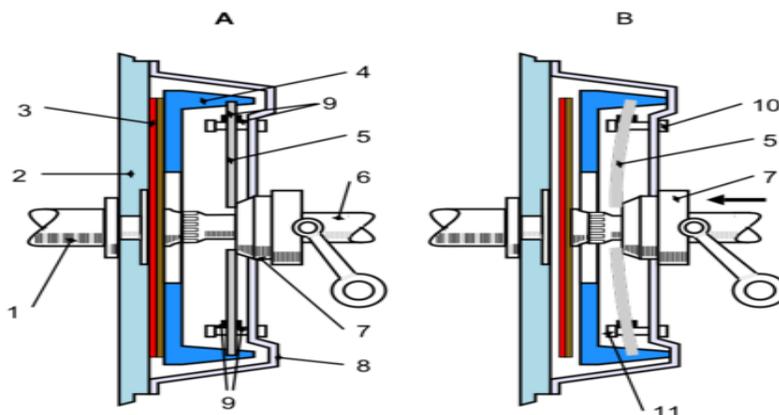


Figura 2.21 Esquema de un embrague²¹

2.3.2. Sistema Híbrido

Sistema de frenos regenerativo

Un freno regenerativo es un dispositivo que permite reducir la velocidad de un vehículo transformando parte de su energía cinética en energía eléctrica. En vehículos híbridos esta energía eléctrica es almacenada en un banco de baterías o en un banco de condensadores para un uso futuro.

Los frenos regenerativos se basan en el principio de que un motor eléctrico puede ser utilizado como generador. El motor eléctrico de tracción es reconectado como generador durante el frenado y las terminales de alimentación se convierten en suministradoras de energía la cual se conduce hacia una carga eléctrica, es esta carga, la que provee el efecto de frenado.

Entonces al desacelerar o frenar, el motor eléctrico actúa como generador, recuperando la energía cinética desde las ruedas, convirtiéndola en electricidad que puede ser guardada en la batería. Sin embargo el sistema de frenos de fricción tradicionales es requerido, así como un sistema de control electrónico que permita maximizar la recuperación de energía y pueda operar el sistema dual de frenos. Cuando se pisa el pedal de freno, el sistema controla la

²¹ <http://www.bmwfaq.com/f7/teoria-2-de-4-como-funcionan-las-cajas-de-cambio-tipos-temas-relacionados-189267/>

coordinación entre el freno hidráulico del ECB (Electronic Control Breaking) y el freno regenerativo y preferentemente usa el freno regenerativo, por consiguiente recobrando energía aun en las velocidades inferiores del vehículo.

En la figura 2.22 se puede observar que mientras más fuerza se aplique al freno, más entraran en funcionamiento los frenos hidráulicos perdiendo la energía cinética en calor. En cambio si se aplica poca fuerza al freno, se usará más la retención eléctrica. Se hace la frenada más larga pero esta frenada irá regenerando. Para aprovechar el freno regenerativo, es mejor anticiparse a las frenadas e ir decelerando pisando un poco el freno para que el sistema ECB aplique más porcentaje al freno regenerativo y menos al freno hidráulico.

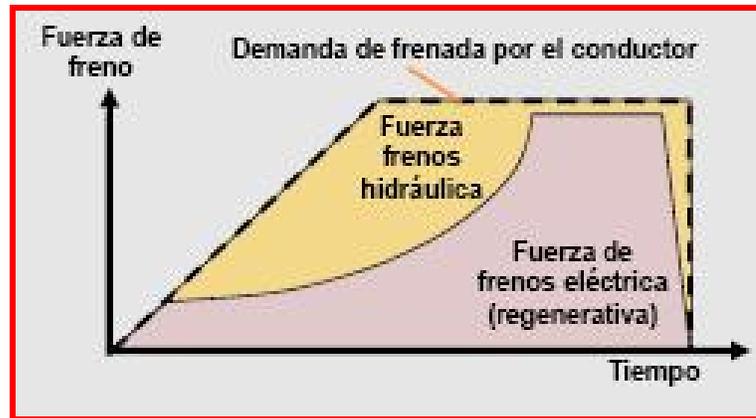


Figura 2.22 Fuerza de Frenado vs. Tiempo²²

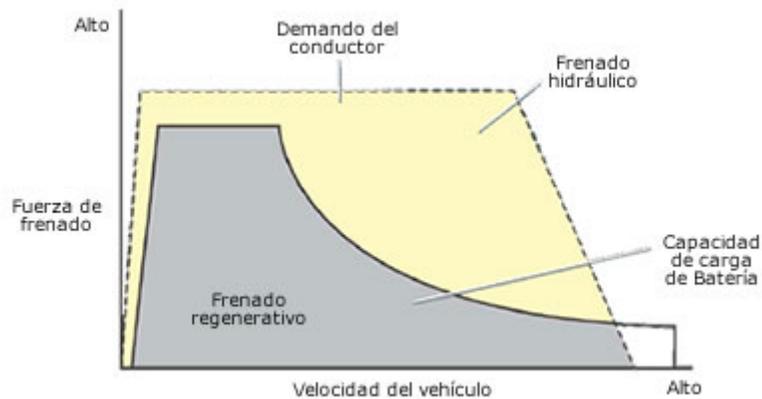


Figura 2.23 Freno Regenerativo vs. Freno Hidráulico²³

²² <http://mitoyotaprius.mforos.com/730079/7338642-algo-sobre-frenos-regenerativos/>

²³ <http://www.mecanicavirtual.org/hibridos-prius.htm>

El sistema de frenos regenerativos es particularmente efectivo en recobrar energía cuando se circula por ciudad, donde se producen aceleraciones y deceleraciones frecuentes, aun así en conducción en autopista el sistema de frenado regenerativo sigue funcionando esporádicamente, por ejemplo en bajadas prolongadas o al reducirse la velocidad después de una maniobra de adelantamiento.

En general, se estima que es posible recuperar hasta el 30 por ciento de la energía cinética, lo cual se traduce en un ahorro medio de cerca de un litro de gasolina por cada 100 km recorridos en ámbito urbano en donde se producen frecuentes frenadas, lo que representa una reducción del consumo energético del 15 por ciento. Además, el frenado regenerativo permite reducir en un 22 por ciento el peso del sistema de frenado convencional, alargándose también su vida útil.

Generador

Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos, llamados polos, terminales o bornes. Los generadores eléctricos son máquinas destinadas a transformar la energía mecánica en eléctrica. Esta transformación se consigue por la acción de un campo magnético sobre los conductores eléctricos dispuestos sobre una armadura (denominada también estator). Si mecánicamente se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo, se genera una fuerza electromotriz (FEM).

Se clasifican en dos tipos fundamentales:

- **Primarios:** Son generadores primarios los que convierten en energía eléctrica la energía de otra naturaleza que reciben o de la que disponen inicialmente.
- **Secundarios:** Son generadores secundarios aquellos que primero necesitan de cierta medida de energía eléctrica para poder comenzar su proceso, por tanto entregan algo de la energía eléctrica que han recibido previamente

En los automóviles híbridos el generador es el elemento que transforma en electricidad el trabajo del motor térmico para cargar las baterías, también funciona como motor de arranque del motor térmico. Es de corriente alterna síncrono y como máximo gira al doble de régimen que el motor térmico.

Motor eléctrico

Un motor eléctrico es el que transforma la energía eléctrica en mecánica pero también en ocasiones puede funcionar como generador es decir, transformando la energía mecánica en eléctrica, estos tipos de motores de doble acción son los utilizados en los vehículos híbridos para aprovechar sus propiedades.

Se pueden clasificar en motores de corriente alterna y continúa pero el funcionamiento es el mismo, es decir, que si un conductor eléctrico el cual funciona como un electroimán (debido a la corriente eléctrica) está dentro de un campo magnético este tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo, el conductor adquiere propiedades magnéticas debido a la interacción constante entre los polos del estator. Este fenómeno en el caso de motores de vehículos es utilizado para la propulsión de los mismos debido a que si se somete al conductor a un campo magnético fuerte o potente la interacción con los polos hace que el conductor se desplace produciendo así la energía mecánica.

Inversor

Un inversor es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.

En los híbridos el inversor cambia la corriente continua de la batería en corriente alterna para mover el motor eléctrico, y cambia la corriente alterna del generador en corriente continua para cargar la batería. También varía la frecuencia de la corriente, dependiendo de las revoluciones del motor eléctrico para maximizar la eficiencia. El inversor debe ser enfriado por agua.



Figura 2.24 Inversor Toyota Prius²⁴

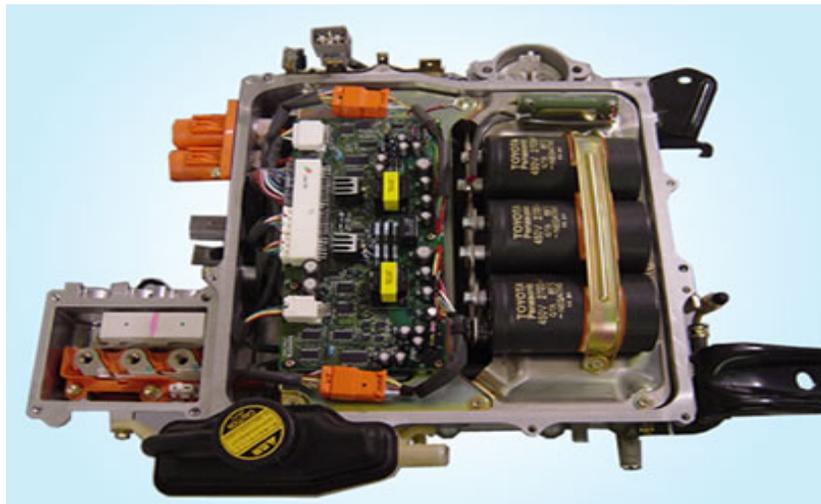


Figura 2.25 Interior inversor Toyota Prius²⁵

²⁴ <http://www.mecanicavirtual.org/hibridos-prius.htm>
²⁵ <http://www.mecanicavirtual.org/hibridos-prius.htm>

Divisor de potencia (híbridos en paralelo)

El sistema híbrido en paralelo necesita de un divisor de potencia, que utiliza un engrane planetario que distribuye el giro del MCI entre la tracción y el generador. Controlando las revoluciones del generador, el divisor funciona también como una transmisión continua y variable.

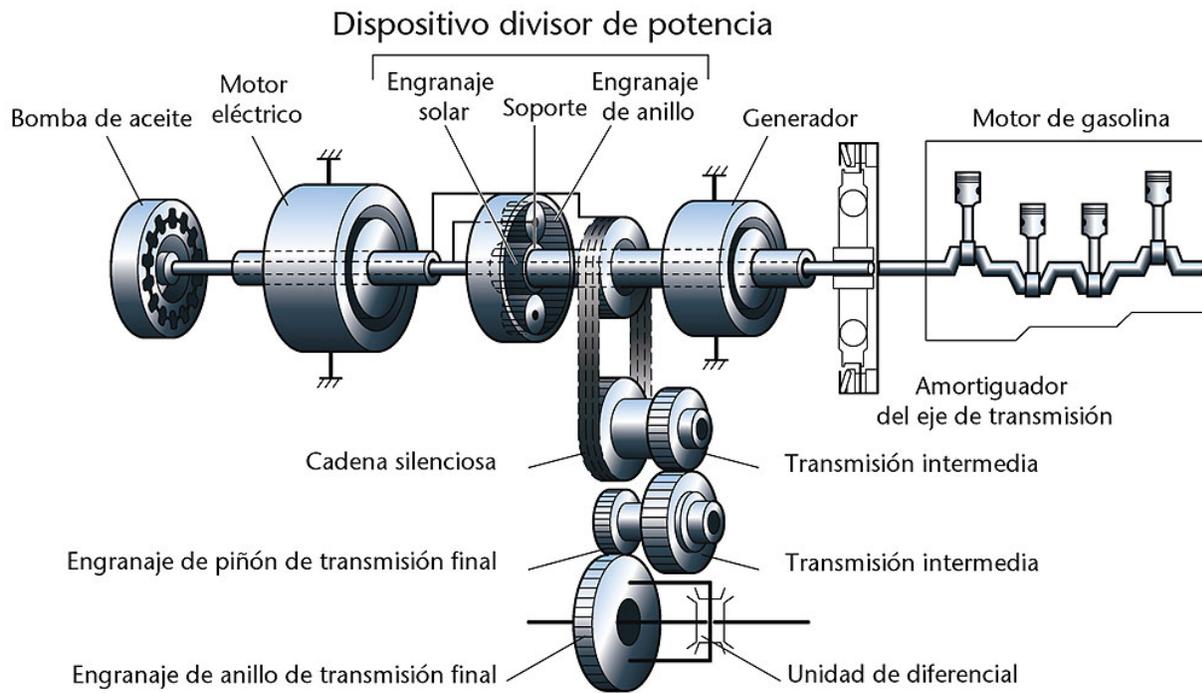


Figura 2.26 Divisor de potencia de Híbrido en paralelo²⁶

Dentro de dispositivo divisor de potencia encontramos un engranaje planetario o epicicloidal. El cual es un sistema que permite hacer varias desmultiplicaciones con un solo juego de engranajes. Se utiliza de muy diversas maneras: por ejemplo, es el diferencial de casi todos los automóviles de motor y cambio transversal; también es el engranaje común en las cajas de cambio automáticas con convertidor hidráulico de par.

²⁶ <http://www.mecanicavirtual.org/hibridos-prius.htm>

Está formado por cuatro elementos: planeta, satélites, porta satélites, y corona.

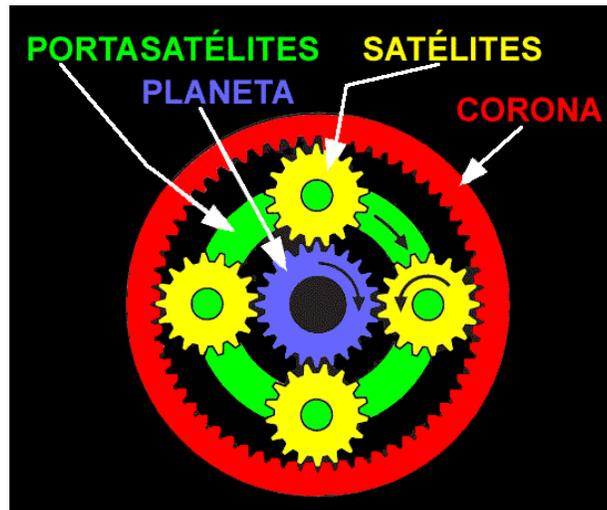


Figura 2.27 Disposición de engranes del divisor de potencia²⁷

El planeta es una rueda con dentado exterior. Constituye el engranaje interior del sistema.

Los satélites son varias ruedas con dentado exterior (generalmente tres o cuatro) que pueden estar fijas con relación al planeta y la corona, o bien pueden girar sobre ellos.

El porta satélite es una pieza que une los ejes de giro de los satélites. Si no hay movimiento relativo entre el planeta y del porta satélites (por ejemplo, cuando giran sincrónicamente), los satélites no se giran alrededor del planeta. Si hay giro relativo entre el planeta y el porta satélites, los satélites giran alrededor del planeta (el sentido de giro de los satélites es siempre inverso al del planeta). Si el planeta y porta satélites se mueven sincrónicamente (por tanto, sin giro de los satélites), puede haber transmisión de par entre el planeta y el porta satélites, o viceversa.

La corona es una rueda con dentado interior, engranada en los satélites. Si hay giro relativo entre la corona y el porta satélites, los satélites giran a lo largo de la corona. (El sentido de giro de los satélites es siempre inverso al de la corona). Si la corona y porta satélites se

²⁷ <http://www.km77.com/glosario/e/engrplan.asp>

mueven sincrónicamente (por tanto, sin giro de los satélites), puede haber transmisión de par entre la corona y el porta satélites, o viceversa.

En una transmisión, hay un semieje conectado al planeta, otro al portasatélites y otro a la corona. Estos tres elementos pueden impulsar, ser impulsados o girar solidariamente. Las distintas relaciones de transmisión dependen solo de los dientes que tengan el planeta y la corona, número de dientes de los satélites no influye en las relaciones de transmisión.

Entonces siempre que el coche está en movimiento, la corona del engranaje planetario también mueve. La fuerza para moverse proviene del motor eléctrico directamente o del empuje que le da el motor térmico. Cuanto más lenta es la velocidad del coche, mayor fuerza proviene del motor eléctrico. Cerca de la velocidad máxima, toda la fuerza proviene del motor térmico.

El engranaje central o «planeta» está unido al generador eléctrico. El porta satélites está unido al motor térmico.

Estos son algunos ejemplos del funcionamiento del sistema:

- Cuando el vehículo está parado, todos los elementos del engranaje planetario están parados.
- Cuando el vehículo se mueve sólo con la energía de la batería, un régimen del motor eléctrico distinto de cero indica que el coche está en marcha. El motor térmico está parado y el generador funciona en sentido inverso, sin producir corriente.
- Cuando el auto está parado y el motor térmico está recargando la batería, si el auto está parado y la batería llega al límite tolerado de carga, el motor térmico se pone en marcha. El generador ofrece par resistente y por eso genera una energía que se destina a recargar la batería.
- El vehículo está avanza a velocidad constante, en este caso, el vehículo se está desplazando porque el porta satélites (motor térmico) empuja a la corona (motor eléctrico) mientras el planeta está detenido (generador). En estas condiciones la

propulsión es enteramente mecánica, aunque se realice (también mecánicamente) a través del motor eléctrico.

- El coche acelera fuertemente, Cuando el coche está en marcha y el conductor pisa el acelerador, el generador se pone en marcha. En ese caso, la fuerza con que el motor eléctrico impulsa a las ruedas procede de tres fuentes simultáneamente: una, el motor térmico mueve al generador que, a su vez, alimenta al motor eléctrico. Dos, el motor térmico impulsa mecánicamente al motor eléctrico. Tres, la batería suministra electricidad al motor eléctrico.

Hay otras condiciones de funcionamiento posibles, pero en cualquiera de ellas el principio de funcionamiento es el mismo. La energía que suministra el generador no depende sólo de su giro. El sistema puede variar o eliminar completamente el par resistente del generador para adecuar la energía que genera a cada condición de funcionamiento

Baterías

La llegada de los vehículos eléctricos, micro computadoras, teléfonos móviles y otros dispositivos portátiles, han aumentado la necesidad de desarrollar baterías de alta densidad de energía, peso liviano y una larga vida.

Tipos de Baterías de Níquel

Baterías de Níquel - Cadmio (Ni-Cd)

Las baterías de níquel cadmio son baterías recargables de uso doméstico e industrial. Estas baterías se componen de electrodos de níquel y una aleación de cadmio.

Cada vez se usan menos, debido a su efecto memoria y al poder contaminante del cadmio, sin embargo, disponen de una elevada potencia de salida que en condiciones normales es de 1.3 V y admiten un gran número de ciclos de carga y descarga (1 ciclo = 1 carga y descarga) que oscilan entre los 1.000 y 1.500 ciclos.

Estas baterías son pequeñas, ligeras, robustas y debido a su estructura interna en acero y el electrolito alcalino, no se ven afectadas por la corrosión, por lo tanto son inmunes al riesgo de la "muerte súbita" que llevan asociadas las baterías de Plomo ácido.

La vida de una batería de Níquel-Cadmio es extraordinariamente larga. Suele indicarse bien en años o bien en el número de ciclos de carga/descarga que es capaz de suministrar. El ratio de envejecimiento está en el 20 por ciento de reducción de la vida útil por cada 10 grados de incremento de la temperatura. Mucho mejor si lo comparamos con una batería de Plomo ácido que reduce el 50 por ciento en la vida útil por cada 10 grados de incremento de la temperatura.

Al finalizar su vida útil estas baterías pueden y deben ser recicladas para recuperar los metales pesados que la componen, pero este reciclaje debe ser controlado debido a que estas son aleaciones tóxicas.

Por el bajo costo de mantenimiento y por su larga vida útil pueden ser una muy buena alternativa desde el punto de vista de costos.

Baterías de Níquel e Hidruro Metálico (Ni-MH)

Si bien el diseño de los sistemas basados en la batería convencional de níquel-cadmio y de plomo-ácido, se ha mejorado en los últimos años, adaptándolos para su uso en dispositivos portátiles, problemas con la eliminación de pilas que contengan cadmio y el plomo muestran la necesidad de desarrollo de nuevos sistemas de almacenamiento de energía.

Las baterías de níquel e hidruro metálico (Ni-MH) pueden considerarse como las sucesoras de las baterías de níquel-cadmio, con la ventaja de que no contienen metales pesados tóxicos en su composición, y tienen una mayor densidad de energía. Además, se consideran ecológicamente correctos, ya que puede reducir los problemas asociados con la eliminación de baterías recargables de níquel.

Una batería de níquel e hidruro metálico es una tecnología relativamente nueva que presenta características operativas similares a las baterías de níquel-cadmio, aunque estas por su propia estructura son siempre sistemas cerrados por lo tanto no necesitan mantenimiento.

Su principal diferencia es el uso del hidrógeno absorbido en una aleación en forma de hidruro de metal como material activo en el electrodo negativo en lugar de cadmio utilizado en las pilas de níquel-cadmio. El electrodo de metal hidruro muestra una mayor densidad de energía que un electrodo de cadmio, por lo que la masa de material activo utilizado para el electrodo negativo en una batería recargable de níquel e hidruro metálico podrá ser inferior a la utilizada en las baterías de níquel-cadmio.

Esto también le permite utilizar una mayor cantidad de material activo de electrodo positivo, resultando en una mayor capacidad o tiempo para la aprobación de esta batería.

La mayoría de las características operativas de las baterías de níquel-hidruro metálico son similares a las de níquel-cadmio. Las similitudes con respecto a la célula de tensión, la presión característica y métodos de control de la carga del sistema indican que Ni-MH debe seguir teniendo una buena fracción de las células de otros en el futuro próximo.

Poseen baja de tensión de solo 1.2 V, tienen una vida útil comprobada para cierto tipo de aplicaciones de hasta 10 años o 2.000 ciclos y tienen un efecto memoria moderado, el cual puede ser eliminado mediante un sistema eléctrico que no permite que la batería baje de un cierto nivel de carga.

Baterías de níquel-hidruro de metal de gran tamaño están siendo considerados para su uso en vehículos eléctricos, ya que pueden almacenar un 30 por ciento más de energía que una pila de Ni-Cd equivalente, y por tanto, la carga dura más tiempo. Se usan en el vehículo híbrido Prius de la marca Toyota donde la alta energía específica y el buen ciclo de vida son los requisitos para una buena desempeño.

Sistemas de Baterías de Litio

Los sistemas de Litio permiten unas densidades de energía de más de 100Wh/kg y unas densidades de potencia que superan los 300W/kg en baterías de tracción.

Se pueden utilizar a temperatura ambiente o a temperatura ligeramente más alta y presentan unos elevados valores de tensión de batería de 4 V.

A diferencia de las baterías de níquel – cadmio estas no presentan el efecto memoria, sin embargo tienen un costo más elevado debido a que por seguridad requiere mayor supervisión y cuidado.

Las baterías profesionales para vehículos eléctricos son de larga vida. Algunos fabricantes muestran datos de más de 3.000 ciclos de carga/descarga para una pérdida de capacidad del 20 por ciento.

Baterías de Ion de Litio

En estas baterías los iones de litio del electrodo negativo se depositan en una rejilla de grafito siguiendo un proceso reversible eléctricamente.

Como electrolito se emplea materia orgánica, ya que no se puede utilizar electrolitos acuosos debido a la intensa reacción química del litio con el agua.

Baterías de polímero de litio

Este tipo de baterías consiste en una delgada membrana de litio (grosor total aproximado de 0,1 mm), un electrolito de polímero y un electrodo de membrana positivo compuesto principalmente por óxido de vanadio. Esta lámina está enrollada o plegada formando elementos individuales. La temperatura de funcionamiento es de 60°C.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS Y PARTES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO

3.1. Selección del medio de transporte masivo más común y más contaminante

En el Distrito Metropolitano de Quito existen la red convencional de transporte público que está conformada por 2578 vehículos de transporte masivo divididos en:

División de Transporte	Cantidad
Buses Urbanos	2034
Interparroquiales	379
Escolares	156
Turismo	9
Total	2578

Tabla 3.1 División de transporte urbano

Por lo que el transporte urbano representa aproximadamente el 79 por ciento y por lo que se considera el más representativo del distrito. Además, si consideramos que un bus convencional de una línea de transporte urbano está en circulación cinco días a la semana, de diez a doce horas diarias, y que la capacidad de este medio de transporte va de 50 a 90 pasajeros, se puede concluir que es el medio de transporte más utilizado.

Por otro lado, el transporte urbano debe cumplir con ciertos reglamentos entre los cuales podemos mencionar el que rige según la EMMOP-Q que indica que todo transporte urbano debe tener un motor ecológico que cumpla con la norma EURO II por lo que presentamos un listado de chasises que circulan dentro del Distrito Metropolitano y que cumplen con este requisito.

Listado de chasises calificados para unidades de transporte urbano

Marca	Modelo	No. Pasa.	Cilin. cm3	Potencia Kw(Cv)@rpm	Torque Nm@rpm	Peso Bruto Kg	Poten. Real Kw	Norma 960 INEN Kw/ton
Hino	FG1JPUZ EURO II	70-90	7961	191,1(260)@2500	716@1500	14200	166,3	11,7
Hino	RK1JSTL EURO II	70-90	7961	191,1(260)@2500	716@1500	14200	166,3	11,7
Chevrolet	FTR 32M 6HE1	70-90	7127	170(227)@2500	667@1500	14200	147,9	10,4
Chevrolet	CHR 7.2 6HE1-TC	70-90	7127	151,1(205,5)@2800	600@2800	14500	131,5	9,1
Mercedez B.	OF 1721-59	70-90	5928	155(211)@2600	660@1400	17500	134,9	7,7
Volvo	B7R EURO III	70-90	7140	213(290)@2100	1200@1650	18600	185,3	10,0
Volkswagen	17.210 OD EURO II	70-90	6449	151,5(206)@2600	657@1700	16800	131,8	7,8
Scania	K380 6x2	70-90	11800	280(380)@2000	1800@1400	19500	243,6	12,5
Scania	K380 4x2	70-90	11800	280(380)@1900	1800@1400	19500	243,6	12,5
IVECO	F4AE0681 D tector	70-90	5880	175,2(235)@1900	680@1500	17000	152,4	9,0

Tabla 3.2 Lista de chasises calificados para transporte urbano

La CORPAIRE en su afán de mejorar y garantizar la calidad de aire asegurando el cumplimiento de normativas de circulación y de emisión de gases realiza revisiones técnicas al transporte público en general. Los vehículos son sometidos a varias pruebas entre las cuales está la medición de opacidad de los gases de escape basados en las normas INEN de Gestión Ambiental 2202:2000²⁸ y 2207:2002²⁹.

²⁸ NTE 2202:2000 Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Determinación de la opacidad de emisiones de escape de motores de diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre.

²⁹ NTE 2207:2002 Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel

Tabla de resultados de pruebas de control de opacidad.

Marca	Modelo	Cuenta	PPM			Desviación Estandar	Porcentaje		
			Promedio	Mínimo	Máximo				
CHEVROLET	CHR 7.2 CHASIS TORPE	85	27,01	6,00	49,00	10,75	0,04		
CHEVROLET	FB 9502	2	32,50	20,00	45,00	12,50	0,00		
CHEVROLET	FTR 32M	451	27,25	1,00	49,00	11,31	0,19		
HINO	FD166B	92	34,91	3,00	59,00	13,78	0,04		
HINO	FF1JP6Z	96	29,42	2,00	59,00	15,88	0,04		
HINO	GD1JLTA	76	20,84	3,00	47,00	11,52	0,03		
HINO	RK1JSTL	43	22,02	3,00	49,00	12,99	0,02		
HINO	FG1JPUZ	267	21,99	1,00	49,00	12,02	0,11		
HINO	XZU413L-HKMQR	21	34,67	17,00	49,00	9,06	0,01		
MERCEDES BENZ	ARTICULADO TROLEBUS	72	27,47	4,00	59,00	14,76	0,03		
MERCEDES BENZ	MBO 1417/60	1	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	O400 UPA BUS	1	7,00	7,00	7,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OF 1318/51	63	31,44	4,00	53,00	15,07	0,03		
MERCEDES BENZ	OF 1620/60	31	27,35	2,00	59,00	16,32	0,01		
MERCEDES BENZ	OF 1721/52	242	23,14	3,00	49,00	12,27	0,10		
MERCEDES BENZ	OF 1721/59	429	23,08	3,00	49,00	11,87	0,18		
MERCEDES BENZ	OF 318/51 OMNIBUS	1	21,00	21,00	21,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OMNIBUS L 1317	1	9,00	9,00	9,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OF 1722/59	27	24,85	6,00	46,00	10,77	0,01		
VOLKSWAGEN	16180 CO BUS	1	22,00	22,00	22,00	0,00	0,00		
VOLKSWAGEN	16210	6	26,00	9,00	40,00	14,22	0,00		
VOLKSWAGEN	17210 OD	377	28,56	4,00	49,00	12,07	0,16	más contaminante	
VOLKSWAGEN	9.150 OD	7	26,71	6,00	46,00	14,18	0,00		
	TOTAL	2392							

Tabla 3.3 Resultado de prueba de opacidad³⁰

3.2. Factibilidad Técnica

3.2.1. Selección de sistema híbrido

Antes de analizar las posibles configuraciones del Tren de Tracción Híbrido, se presentaran una serie de fundamentos básicos de vehículos que son necesarios para el análisis de las configuraciones de trenes de tracción.

³⁰ Datos obtenidos por la Corporación para el mejoramiento del aire de Quito (CORPAIRE).

Fundamentos de vehículos

Fundamentos de la operación de vehículos describen matemáticamente el comportamiento del vehículo basado en los principios generales de la mecánica. Un vehículo, que consta de miles de componentes, es un sistema complejo. Para describir su comportamiento, plenamente, se necesita conocimientos de mecánica y matemáticos sofisticados. Un gran aporte de la literatura de este tipo ya existe, por lo que se presentará a continuación la discusión de fundamentos limitados al movimiento tridimensional.

Descripción General del Movimiento de vehículos

La figura 3.1 muestra las fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento a un determinado grado de inclinación. El esfuerzo de tracción entre el área de contacto de las ruedas motrices con la superficie de la carretera, impulsa el vehículo hacia adelante y es producida por el motor y el torque que éste produce se transfiere a través de la transmisión y la transmisión final a las ruedas. Mientras el vehículo esté en movimiento, hay una resistencia que trata de poner fin a su movimiento. La resistencia usualmente incluye la resistencia del neumático rodando, arrastre aerodinámico y la resistencia hacia arriba. Según la segunda ley de Newton, los vehículos la aceleración puede ser escrito como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Sigma F_t - \Sigma F_{tr}}{\delta M_v}, \quad (3.1)$$

Donde V es la velocidad del vehículo, Ft es el esfuerzo de tracción total del vehículo, Ftr es la resistencia total, Mv es la masa total del vehículo, y δ es el factor de masa, que es un efecto de la rotación de los componentes del tren de potencia. La ecuación indica que la velocidad y la aceleración dependen del esfuerzo de tracción, resistencia, y la masa del vehículo.

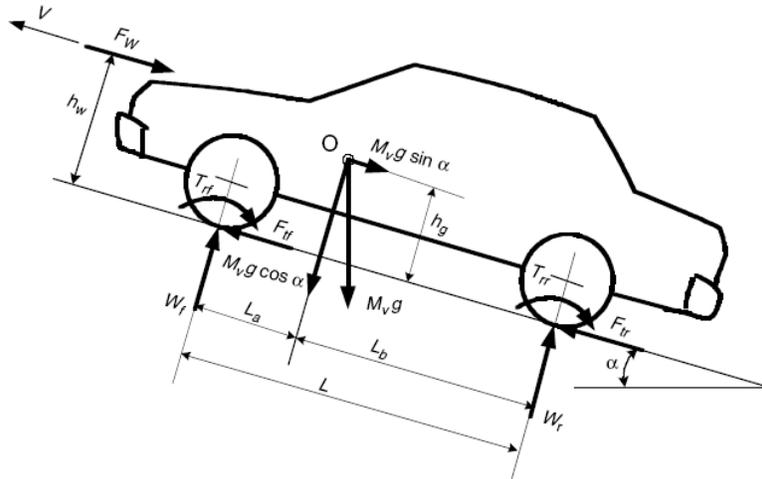


Figura 3.1 Resistencias que se oponen al movimiento de un vehículo³¹

Resistencia al Rodamiento

La resistencia a la rodadura de los neumáticos sobre superficies duras es causada principalmente por la histéresis de los materiales de los neumáticos. Esto se debe a la deformación de la carcasa, mientras que el neumático está en marcha. La histéresis provoca una distribución asimétrica de las fuerzas de reacción del suelo. La presión en la mitad delantera de la zona de contacto es mayor que en la mitad trasera, como se muestra en la Figura 3.2 a)

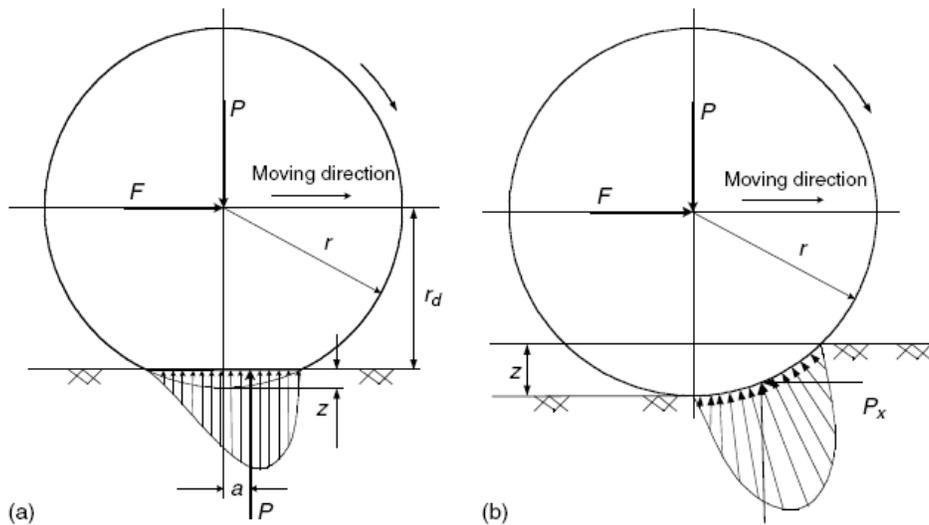


Figura 3.2 Variación de presión en un neumático³²

³¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 22 p.

Este fenómeno hace que las resultantes de la fuerza de reacción del suelo se desplacen hacia adelante, se crea un momento, que se opone a la rodadura de la rueda. Sobre superficies blandas, la resistencia a la rodadura es causada principalmente por la deformación de la superficie del suelo como se muestra en la Figura 3.2 (b). La fuerza de reacción del suelo casi por completo cambia a la mitad delantera.

El momento producido por el desplazamiento hacia delante de la reacción del suelo resultante de la fuerza se llama el momento resistente a rodar, como se muestra en la Figura 2.2 (a), y puede expresarse como:

$$T_r = Pa. \quad (3.2)$$

Para mantener la rueda en movimiento, una fuerza F, que actúa en el centro de las ruedas, es necesaria para equilibrar esta resistencia a la rodadura. Esta fuerza se expresa como:

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{Pa}{r_d} = Pf_r, \quad (3.3)$$

Donde r_d es el radio efectivo de la llanta y $f_r = a/r_d$ se llama coeficiente de resistencia a la rodadura. De esta manera, el momento de resistencia del material puede ser equivalente y se sustituye por una fuerza horizontal que actúa en el centro de la rueda en la dirección opuesta al movimiento de la rueda. Esta fuerza es equivalente y se llama resistencia a la rodadura:

$$F_r = Pf_r, \quad (3.4)$$

Donde P es la carga normal, actuando en el centro de la rueda de rodadura. Cuando un vehículo es operado por un camino de pendiente, la carga normal, P, debe ser sustituido por el componente, que es perpendicular a la superficie de la carretera. Es decir:

$$F_r = Pf_r \cos \alpha, \quad (3.5)$$

³² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 23 p.

Donde α es el ángulo de la carretera. El coeficiente de resistencia a la rodadura, f_r , es una función del material de llantas, estructura de los neumáticos, la temperatura de los neumáticos, presión de inflado de los neumáticos, la geometría de la banda de rodadura, la aspereza de la carretera, el material de carretera, y la presencia o ausencia de líquidos en la carretera. Los valores típicos de coeficientes de resistencia a la rodadura en diversas carreteras se dan en la Tabla 3.4 Para ahorro de combustible en los últimos años, los neumáticos de baja resistencia para coches de pasajeros han sido desarrollados. Su coeficiente de resistencia a la rodadura es inferior a 0,01.

Coeficientes de Resistencia a la Rodadura	
Condiciones	Coeficiente
Neumáticos del coche en concreto o asfalto	0.013
Neumáticos del coche en la grava laminados	0.02
Tar macadam (asfalto especial)	0.025
Carretera de pavimento	0.05
Campo	0.1-0.35
Neumáticos de camiones en el hormigón o el asfalto	0.006-0.01
Ruedas de ferrocarril	0.001-0.002

Tabla 3.4 Coeficientes de Resistencia a la Rodadura³³

Los valores indicados en la tabla 3.4 no consideran las variaciones de velocidad del vehículo. Basándose en los resultados experimentales, las fórmulas empíricas muchos han sido propuestos para el cálculo de la resistencia a la rodadura sobre una superficie dura. Por ejemplo, el coeficiente de resistencia a la rodadura de los vehículos de pasajeros en la carretera de hormigón puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2.5}, \quad (3.6)$$

En donde V es la velocidad del vehículo en km / h , y f_0 y f_s dependerá de la presión de inflado del neumático. En el cálculo del rendimiento del vehículo, es suficiente considerar el coeficiente de resistencia como una función lineal de la velocidad.

³³ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 24 p.

Para un vehículo en carretera de hormigón se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V}{100} \right). \quad (3.7)$$

Esta ecuación predice los valores de la Fr con una precisión aceptable para velocidades de hasta 128 km / h.

Arrastre aerodinámico

Un vehículo viajando a una velocidad en particular, el aire presenta una fuerza de resistencia a su movimiento. Esta fuerza se conoce como la resistencia aerodinámica. Sus principales componentes son: resistencia de la forma y la fricción.

Forma de arrastre: El avance del vehículo empuja el aire delante de él. Sin embargo, el aire no puede pasar instantáneamente del camino y su presión aumenta, resultando en alta presión de aire. Además, el aire, por detrás del vehículo de forma instantánea no puede llenar el espacio dejado por el movimiento del vehículo. Esto crea una zona de baja presión de aire. El movimiento por lo tanto ha creado dos zonas de presión que se oponen al movimiento de un vehículo de empujándola hacia delante (de alta presión en frente) y tirando de él hacia atrás (de baja la presión en la parte posterior) como se muestra en la Figura 3.3.

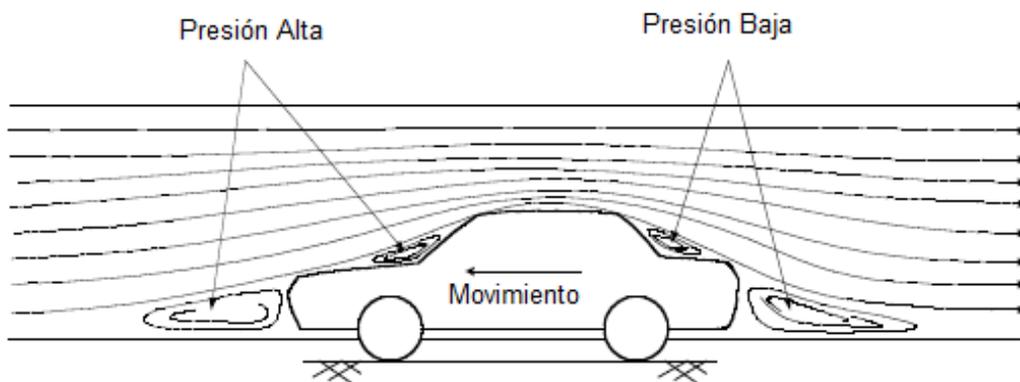


Figura 3.3 Zonas de presión de aire en un vehículo en movimiento³⁴

³⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 25 p.

La fricción: el aire cerca de la carrocería del vehículo se mueve casi a la velocidad de del vehículo, mientras que el aire lejos de ser el vehículo permanece inmóvil. En el medio, el aire las moléculas se mueven en una amplia gama de velocidades. La diferencia de velocidad entre dos moléculas de aire produce una fricción que los resultados son el segundo componente de la resistencia aerodinámica.

La resistencia aerodinámica es una función de la velocidad del vehículo V , área frontal del vehículo A_f , la forma del vehículo, y ρ la densidad del aire. La resistencia aerodinámica se expresa como:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V + V_w)^2, \quad (3.8)$$

Donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica que caracteriza por la forma del vehículo y V_w es el componente de la velocidad del viento en el vehículo se está moviendo dirección, que tiene un signo positivo cuando este componente es opuesto a la velocidad del vehículo y un signo negativo cuando se encuentra en la misma dirección que la velocidad del vehículo. Los coeficientes de resistencia aerodinámica de algunos tipos de carrocería del vehículo las formas se muestra en la Tabla 3.5.

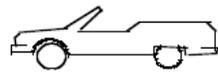
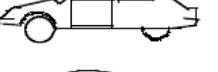
TIPO DE VEHÍCULO	Coefficiente de resistencia aerodinámica
 Convertible	0.5–0.7
 Van	0.5–0.7
 Sedan	0.4–0.55
 Cuerpo en forma de cuña; faros y los parachoques se integran en el cuerpo, cubierto debajo de la carrocería, optimizar el flujo de aire refrigeración	0.3–0.4
 Faro y las ruedas en todos el cuerpo, cubierto bajo la carrocería	0.2–0.25
 K-shaped	0.23
 Óptimo diseño aerodinámico	0.15–0.20
Camiones, trenes de carretera	0.8–1.5
Autobuses	0.6–0.7
Furgoneta	0.3–0.4
Motocicletas	0.6–0.7

Tabla 3.5 Coeficientes de resistencia aerodinámica de algunos tipos de carrocería³⁵

³⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 26 p.

Clasificación de la Resistencia

Cuando un vehículo sube o baja una pendiente, su peso produce una componente, que está siempre dirigida a la dirección hacia abajo, como se muestra en la Figura 3.4. Este componente o bien se opone al movimiento hacia adelante (grado de escalada) o de ayuda a que el movimiento hacia adelante (grado descendente). En el análisis de rendimiento del vehículo, sólo la operación cuesta arriba se considera. Esta fuerza suele llamarse Fuerza de Resistencia

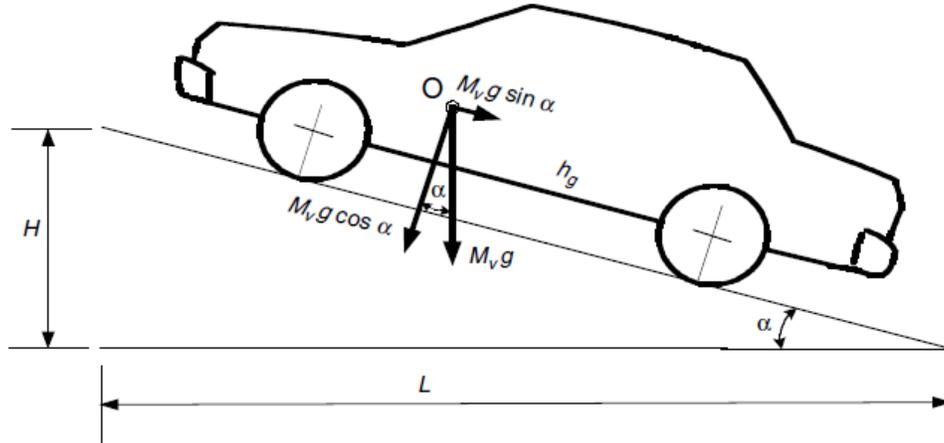


Figura 3.4 Componentes del peso de un vehículo³⁶

La Fuerza de Resistencia, en la figura 3.4, se puede expresar como:

$$F_g = M_v g \sin \alpha. \tag{3.9}$$

Para simplificar el cálculo, el ángulo de la carretera, α , suele ser sustituido por el valor de grado cuando el ángulo es pequeño. Como se muestra en la Figura 3.4, valor de grado se define como:

$$i = \frac{H}{L} = \tan \alpha \approx \sin \alpha. \tag{3.10}$$

En algunos textos, la resistencia del neumático a la rodadura y la clasificación de resistencia juntos se llama resistencia a la carretera, que se expresa como:

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g (f_r \cos \alpha + \sin \alpha). \tag{3.11}$$

³⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 27 p.

Cuando el ángulo de la carretera es pequeño, la resistencia a la rodadura se puede simplificar como:

$$F_{rd} = F_f + F_g = M_v g (f_r + i). \quad (3.12)$$

Análisis de Configuraciones de Tren de Tracción Híbrido Eléctrico

Se analizarán tres configuraciones posibles para el Tren de Tracción de un bus híbrido las cuales se presentan a continuación.

Diseño del Tren de Tracción Híbrido Eléctrico en Serie

El objetivo inicial de desarrollar un vehículo híbrido eléctrico en serie (VHE-S) fue ampliar la gama de la unidad mediante la adición de un motor/sistema de alternador para cargar las baterías a bordo.

Una típica configuración del tren de tracción de sistema híbrido eléctrico en serie se muestra en la figura 3.5.

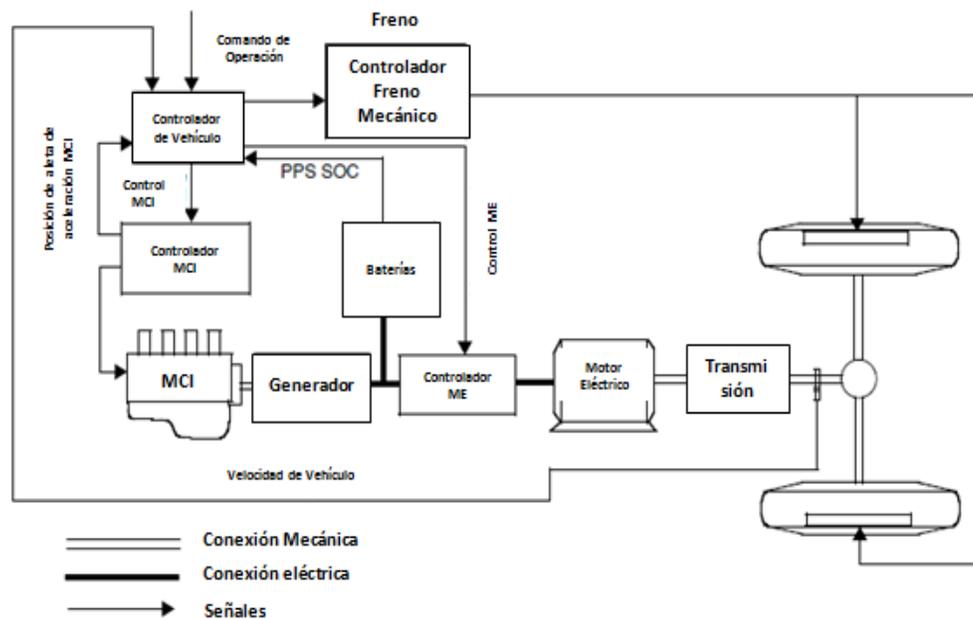


Figura 3.5 Configuración típica del tren de tracción sistema híbrido eléctrico en serie³⁷

³⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 240 p.

El vehículo está propulsado por un motor de tracción. El motor de tracción es alimentado por una batería y / o un motor / generador. El motor / generador o bien ayuda a las baterías para alimentar el motor de tracción cuando la demanda de potencia es grande o bien carga las baterías cuando la demanda de potencia es pequeña. El controlador del motor de tracción se encarga de que este produzca la energía requerida por el vehículo.

El rendimiento del vehículo (aceleración, la capacidad de ascenso, y la velocidad máxima) es totalmente determinado por el tamaño y las características de la unidad de motor de tracción. La determinación del tamaño de la unidad de motor y engranajes de transmisión es el mismo que en el diseño de vehículos eléctricos.

Sin embargo, el control del tren de tracción es esencialmente diferente de la tren de tracción de accionamiento puramente eléctrico, debido a la participación adicional de un motor / unidad generadora.

Esta parte del estudio se centrará en el diseño del motor / sistema de alternador, la estrategia de control de operación, diseño y tamaño de la batería. Además, el término "fuente de energía en horas pico" sustituirá a "batería", porque, en VHE, la función principal de las pilas, es suministrar energía en horas pico. Ellos pueden ser sustituidos por otros tipos de fuentes tales como ultracondensadores y volantes.

Patrones de Operación

En los trenes de tracción híbridos eléctricos en serie, el motor / generador es mecánicamente desacoplado de las ruedas motrices, como se muestra en la figura 3.5.

La velocidad y el torque del motor son independientes de la demanda de velocidad y par de tracción del vehículo, y pueden ser controlados en cualquier punto de funcionamiento de la gráfica velocidad – par de torsión. Generalmente, el motor debe ser controlado de tal manera que funcione siempre en su región de operación óptima, donde el consumo de combustible y las emisiones del motor se reducen al mínimo.

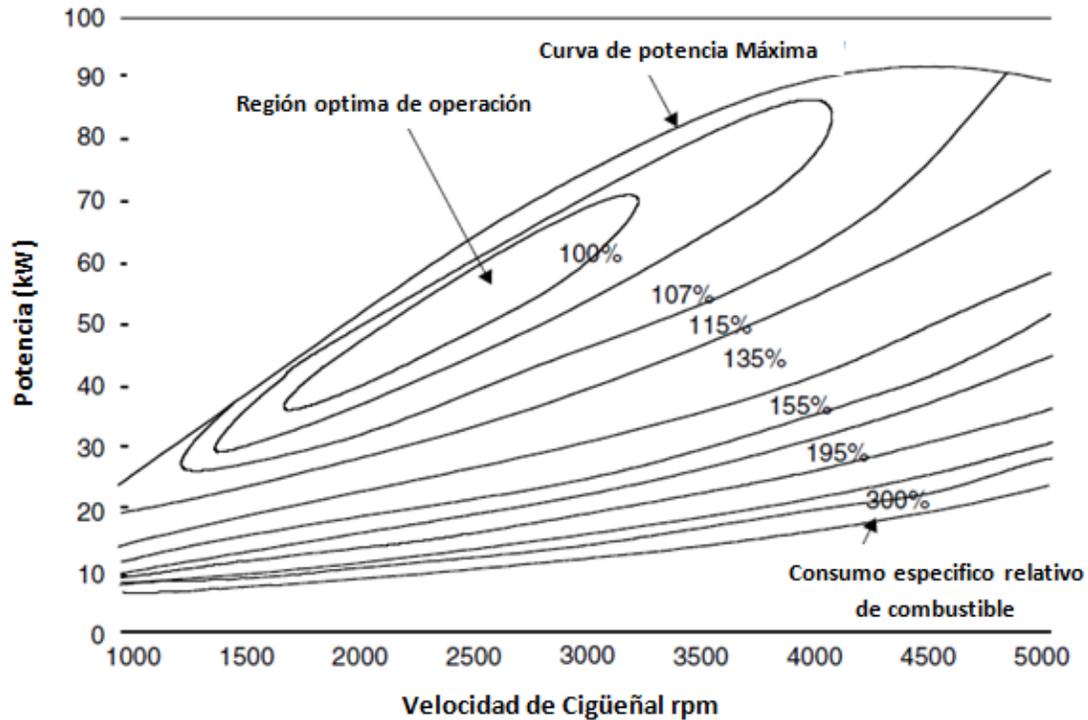


Figura 3.6 Ejemplo de las características del motor y de la región de funcionamiento óptimo³⁸

Debido al desacople mecánico del motor de las ruedas motrices, la operación óptima del motor es realizable. Sin embargo, dependen en gran medida los modos de funcionamiento y estrategias de control de la transmisión.

El tren de tracción tiene varios modos de operación, que puede ser usado de forma selectiva de acuerdo a la condición de conducción y el deseo del conductor. Estos modos de funcionamiento son:

1. Modo de tracción híbrido: Cuando se pide una gran cantidad de energía, es decir, el conductor pisa el pedal del acelerador profundamente, tanto de motor / generador y la fuente de energía en horas pico (FEHP) suministra la energía a la unidad de motor eléctrico. En este caso, el motor debe ser controlada para actuar en su región óptima para razones de eficiencia y de emisiones, como se muestra en la Figura 3.6. La FEHP proporciona la potencia adicional para satisfacer la demanda de energía de tracción.

³⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 241 p.

Este modo de funcionamiento puede ser expresado como:

$$P_{demand} = P_{e/g} + P_{ppst} \quad (3.13)$$

Donde:

P_{demand} es la energía demandada por el conductor.

$P_{e/g}$ es la energía del motor / generador.

P_{ppst} es la energía de la FEHP.

2. Modo de tracción alimentado únicamente por la Fuente de Energía en Horas Pico: En este modo de funcionamiento, solo la Fuente de Energía en Horas Pico suministra su energía para satisfacer la demanda de energía, es decir:

$$P_{demand} = P_{ppst} \quad (3.14)$$

3. Modo de tracción alimentado únicamente por el motor / generador: En este modo de funcionamiento, solo el motor / generador suministra su energía para satisfacer la demanda de energía, es decir:

$$P_{demand} = P_{e/g} \quad (3.15)$$

4. Modo de carga de FEHP por motor / generador: Cuando la energía de la FEHP se reduce a una línea de fondo, la FEHP debe ser cargada. Esto puede ser hecho por el frenado regenerativo o por el motor / generador. Por lo general, la carga del motor / generador es necesaria, ya que la carga de frenado regenerativo es insuficiente. En este caso, la potencia del motor se divide en dos partes: una se utiliza para propulsar el vehículo y la otra se utiliza para cargar la FEHP. Es decir:

$$P_{demand} = P_{e/g} - P_{ppst} \quad (3.16)$$

Cabe señalar que el modo de operación sólo es eficaz cuando la potencia del motor / generador es mayor que la demanda de potencia de carga.

5. Modo de frenado regenerativo: Cuando el vehículo es frenado, el motor de tracción puede ser utilizado como un generador, convirtiendo parte de la energía cinética de la masa del vehículo en energía eléctrica para cargar la FEHP.

Los objetivos de control son (1) satisfacer la demanda de energía del conductor, (2) operar cada componente con una eficacia óptima, (3) recuperar la energía de frenado tanto como sea posible, y (4) mantener el estado de carga (SOC) de la FEHP en una ventana predeterminada.

Estrategias de Control

Una estrategia de control es una regla preestablecida en el controlador del vehículo y en los comandos de operación de cada componente. El controlador del vehículo recibe los comandos de operación del conductor y la respuesta del tren de tracción y todos sus componentes y, a continuación, toma la decisión de usar el modo de funcionamiento adecuado. Obviamente, el rendimiento del tren de tracción se basa principalmente en el control de calidad, en el que la estrategia juega un papel crucial.

En la práctica, hay una serie de estrategias de control que pueden ser utilizados en un sistema de tracción para vehículos con diferentes requisitos de misión. Dos estrategias de control típicas son introducidas: (1) estado de máxima de carga de la fuente de energía en horas pico (máx. SOC-de-FEHP) y (2) estrategias de control de encendido y apagado de motor (motor on - off).

Estrategia de control de máx. SOC-de-FEHP

El objetivo de esta estrategia de control es satisfacer la demanda de energía a mando del conductor y, al mismo tiempo, mantener el SOC de la FEHP en su nivel alto. Esta estrategia de control se considera el adecuado diseño para vehículos en los que el rendimiento depende en gran medida de la fuente de energía en horas pico. Esto incluye los vehículos con conducción de paradas frecuente, y vehículos militares para los que llevar a cabo su misión es

lo más importante. Un nivel alto SOC garantiza el alto rendimiento de los vehículos en cualquier momento.

La estrategia de control del Max. SOC-de la FEHP se muestra en la figura 3.7, en la que los puntos A, B, C y D representan la demanda de energía que el conductor ordena en modo de tracción o en modo de frenado.

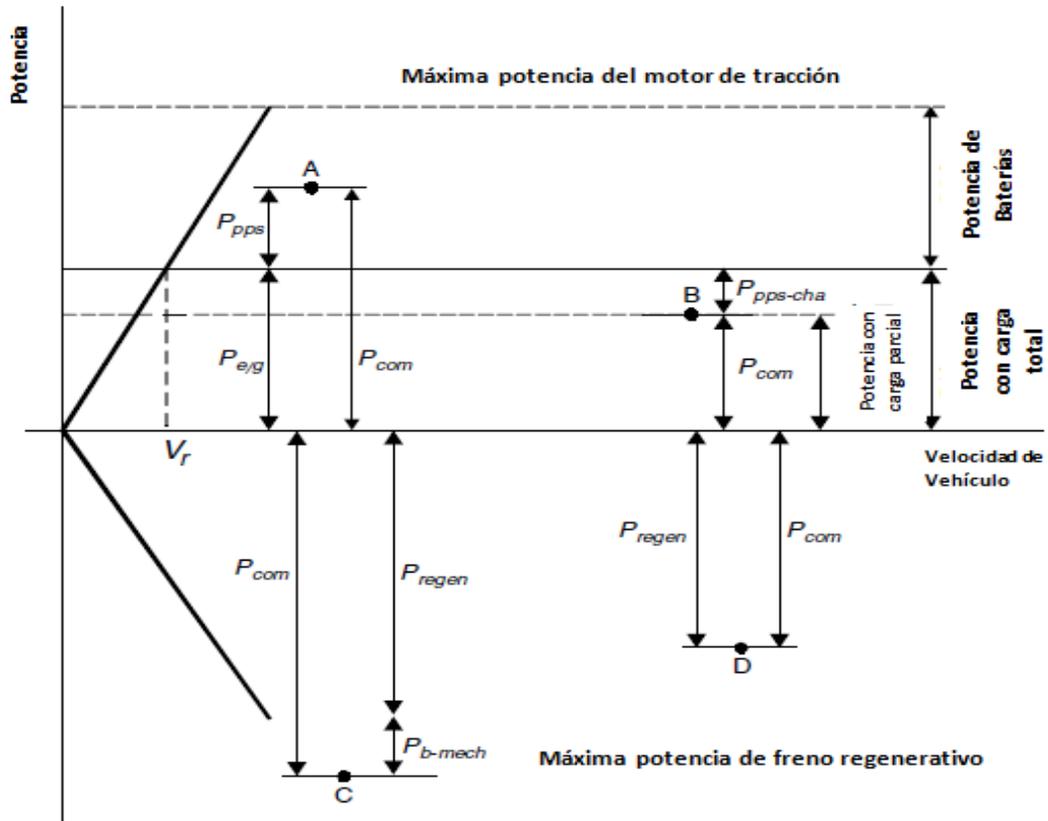


Figura 3.7 Ilustración de la estrategia de control para el Max. SOC-de-FEHP³⁹

El punto A representa que la potencia de tracción demandada es mayor que la potencia que el motor / generador puede producir. En este caso, la FEHP debe producir la potencia para compensar la escasez de potencia del motor / generador. El punto B representa que la potencia demanda es inferior a la potencia que el motor / generador produce cuando se opera en su región el funcionamiento óptima. En este caso, dos modos de funcionamiento podrán ser utilizados, dependiendo del nivel de SOC de la FEHP. Si el SOC de la FEHP es inferior a la

³⁹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 244 p.

línea superior, el modo de carga de FEHP se utiliza, es decir, el motor / generador funciona dentro de su región de operación óptima y parte de su potencia va a el motor de tracción para propulsar el vehículo y la otra parte se destina a la FEHP. Por otra parte, si el SOC de la FEHP ya ha alcanzado su límite superior, el modo de tracción alimentado únicamente por el motor / generador se utiliza, es decir, el motor / generador es controlado para producir la energía equivalente a la potencia demandada, y la FEHP es fijada en ralentí. El punto C representa que la potencia de frenado demandada es mayor que la potencia de frenado que el motor puede producir (la potencia máxima de frenado regenerativo). En este caso, el modo de frenado híbrido se utiliza, en la que el motor eléctrico produce su potencia máxima de frenado y el sistema de frenado mecánico produce la potencia de frenado restante. El punto D representa que la potencia de frenado demandada es inferior a la máxima potencia de frenado que el motor puede producir. En este caso, sólo se utiliza el frenado regenerativo. El diagrama de flujo de control de Max. SOC-de-PPS se ilustra a continuación.

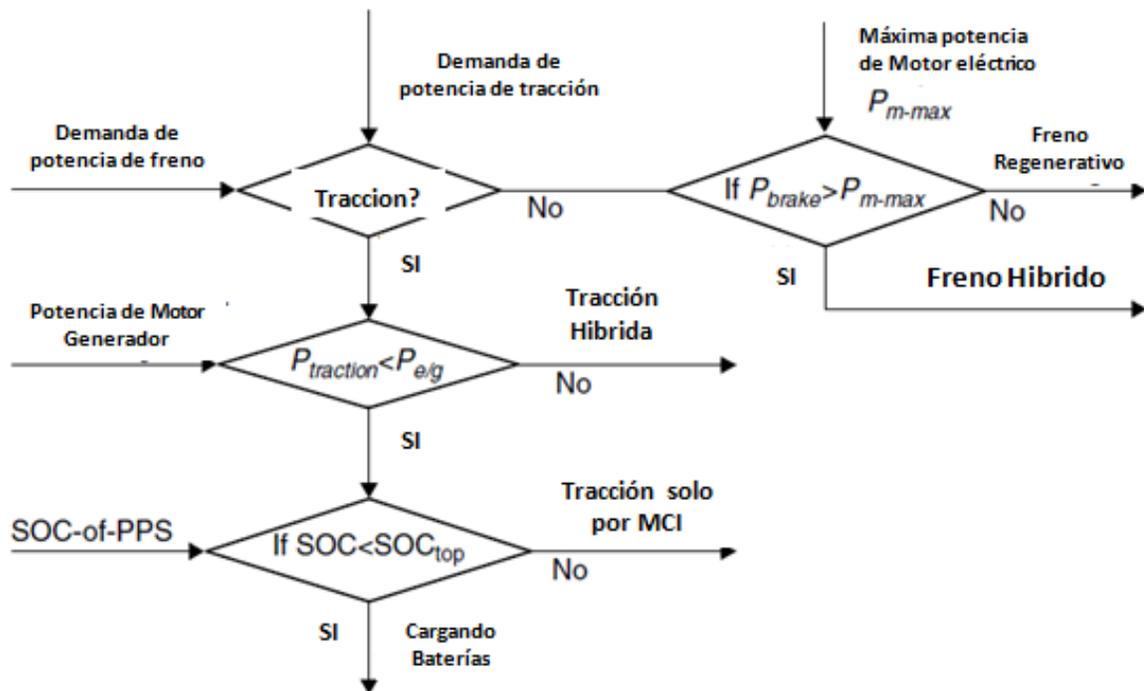


Figura 3.8 Diagrama de flujo de la estrategia de control del Max. SOC-de-FEHP⁴⁰

⁴⁰ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 245 p.

Estrategia de control de termostato

La estrategia de control del Max. SOC-de la de FEHP hace hincapié en el mantener el SOC de la FEHP en un nivel alto. Sin embargo, en algunas condiciones de manejo, tales como tiempo de conducción con baja carga en una autopista a una velocidad constante, la FEHP puede ser fácilmente cargada a su nivel máximo, y el motor / generador está obligado a operar con una potencia inferior a su nivel óptimo. Por lo tanto, se reduce la eficiencia de la transmisión. En este caso, el motor on-off o el control del termostatos del motor / generador sería apropiado. Esta estrategia de control se ilustra en la figura 3.8.

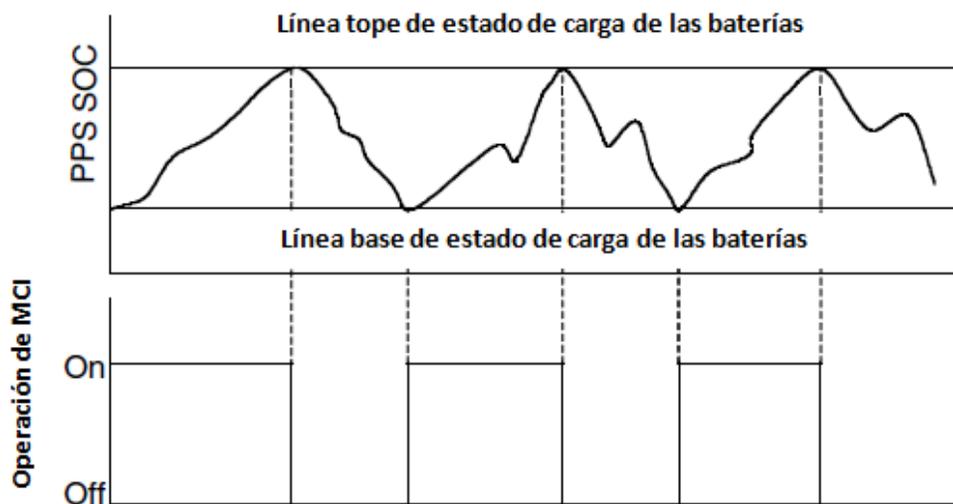


Figura 3.8 Ilustración de control del termostato⁴¹

La operación del motor / generador está totalmente controlado por el SOC de la FEHP. Cuando el SOC de la FEHP llega a su línea superior preestablecida, el motor / generador es apagado y el vehículo es propulsado sólo por la FEHP. Por otra parte, cuando el SOC del FEHP llega a su línea de fondo, el motor / generador está encendido. El FEHP obtiene la carga del motor / generador. De esta manera, el motor siempre se puede operar dentro de su región de eficiencia óptima.

⁴¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 245 p.

Dimensionamiento de los componentes principales

Los componentes principales en un tren de tracción de un híbrido en serie incluyen motor de tracción, el motor / generador, y el FEHP. El diseño de las potencias nominales de estos componentes es el primero y más importante paso en el diseño del sistema. En el diseño de estos parámetros, algunas restricciones en el diseño deben ser consideradas, esto incluye (1) desempeño de aceleración, (2) conducción en carretera y la conducción urbana, y (3) balance de energía en el FEHP.

Diseño de la Potencia nominal del motor de tracción

Similar a la del vehículo eléctrico puro, la potencia del motor eléctrico del VHE en serie está totalmente determinada por los requisitos de rendimiento de aceleración del vehículo, características del motor, y las características de transmisión.

Al principio del diseño, la potencia del motor de tracción se puede estimar, de acuerdo con el desempeño de aceleración (tiempo empleado para acelerar el vehículo de velocidad cero a una determinada velocidad), con la siguiente ecuación:

$$P_t = \frac{\delta M_v}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M_v g f_r V_f + \frac{1}{5} \rho_a C_D A_f V_f^3 \quad (3.17)$$

Donde:

- M_v es la masa total del vehículo en kg,
- t_a es el tiempo de aceleración se espera en segundos,
- V_b es la velocidad en m / s, correspondiente al motor de velocidad de base
- V_f es la velocidad final del vehículo aceleración en m / s,
- g es la aceleración de la gravedad en $9,80 \text{ m/s}^2$,
- f_r es el coeficiente de resistencia a rodar del neumático,
- ρ_a es la densidad del aire en $1,202 \text{ kg/m}^3$,
- A_f es el área frontal del vehículo en m^2 , y
- C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámico.

El primer término de esta ecuación representa la potencia utilizada para acelerar la masa del vehículo, y el segundo y tercer término representan la potencia media para superar la resistencia a rodar del neumático y la resistencia aerodinámica.

En la figura 3.9 se muestra el esfuerzo de tracción y potencia de tracción vs la velocidad del vehículo con dos velocidades. Durante la aceleración, a partir de una baja velocidad, el esfuerzo de tracción, sigue la secuencia a-b-d-e y $V_b = V_{b1}$. Sin embargo, cuando solo una velocidad es utilizada, es decir, sólo cuando velocidad alta está disponible, el esfuerzo de tracción, sigue la secuencia c-d-e y $V_b = V_{b2}$.

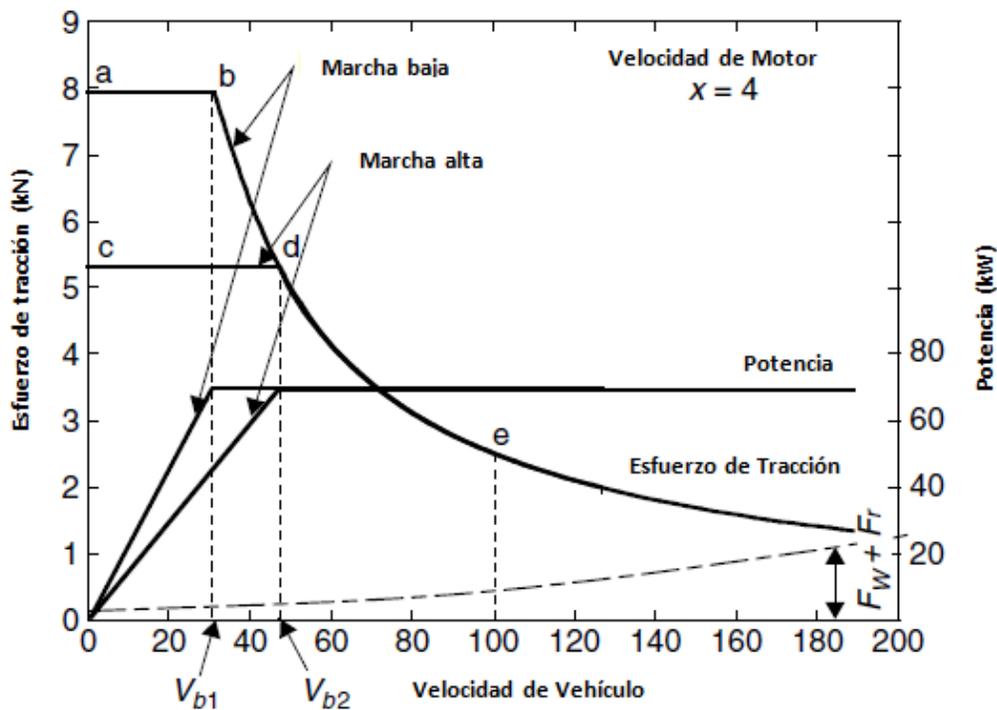


Figura 3.9 Velocidad - torque (Potencia) característicos de un motor eléctrico⁴²

La figura 3.10 muestra un ejemplo de la potencia del motor vs el cociente de la velocidad, que se define como el cociente entre la velocidad máxima a la velocidad de base, como se muestra en la figura 3.9.

⁴² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 247 p.

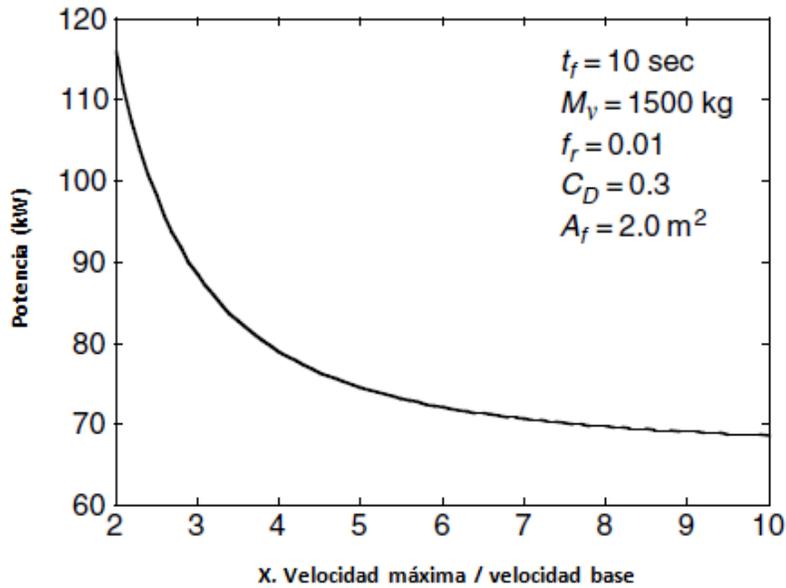


Figura 3.10 Rango de la potencia de tracción vs. la velocidad promedio de la velocidad de tracción⁴³

Cabe señalar que la potencia nominal del motor determinado por la ecuación anterior es sólo una estimación para encontrar el rendimiento de aceleración. Con el fin de determinar con precisión la potencia nominal del motor, la verificación sería necesaria. El cálculo de las prestaciones del vehículo, tales como el tiempo de aceleración, la distancia de aceleración, y separabilidad de pendiente, es exactamente la misma que la de un vehículo eléctrico puro.

Diseño de la Potencia nominal del motor / generador

Como se ya se mencionó anteriormente, el motor / generador en un tren de tracción híbrido en serie se utiliza para suministrar energía en estado de equilibrio, a fin de evitar que la FEHP se descargue completamente. En el diseño del motor / generador, dos condiciones de manejo deben ser consideradas: la conducción durante mucho tiempo con velocidad constante, como conducir en la carretera entre ciudades, y conducir con un patrón de conducción de paradas frecuentes, como la conducción en las ciudades.

⁴³ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 247 p.

Con el patrón de conducción anterior (mucho tiempo a una velocidad constante), el motor / generador y la transmisión no debe depender de la FEHP para apoyar la operación a alta velocidad, por ejemplo, a 130 km / h ó 80 mph. El motor / generador debe ser capaz de producir energía suficiente para soportar esta velocidad. Para un patrón de conducción de paradas frecuentes, el motor / generador debe producir energía suficiente para mantener el almacenamiento de energía de la FEHP en un determinado nivel, de modo que suficiente energía se pueda extraer para apoyar la aceleración del vehículo. Como se mencionó anteriormente, el consumo de energía de la FEHP está estrechamente relacionado con la estrategia de control.

A una velocidad constante y en un camino plano, la salida de energía de la fuente de energía (motor / generador y / o de la FEHP) se puede expresar como:

$$P_{e/a} = \frac{V}{1000 \eta_t \eta_m} \left(M_{veh} g f_r + \frac{1}{2} \rho_n C_D A_f V^2 \right) \text{ (KW)} \quad (3.18)$$

Donde:

η_t y η_m son las eficiencias de la transmisión y motor de tracción, respectivamente.

La figura 3.11 muestra un ejemplo de la potencia de la carga (no incluye η_t y η_m , vs la curva de velocidad del vehículo) para los vehículos de pasajeros de 1500 kg. Se indica que la demanda de energía a una velocidad constante es mucho menor que la aceleración (véase la Figura 3.11). En este ejemplo, alrededor de 35 kW son necesarios a 130 km / h de conducción a velocidad constante.

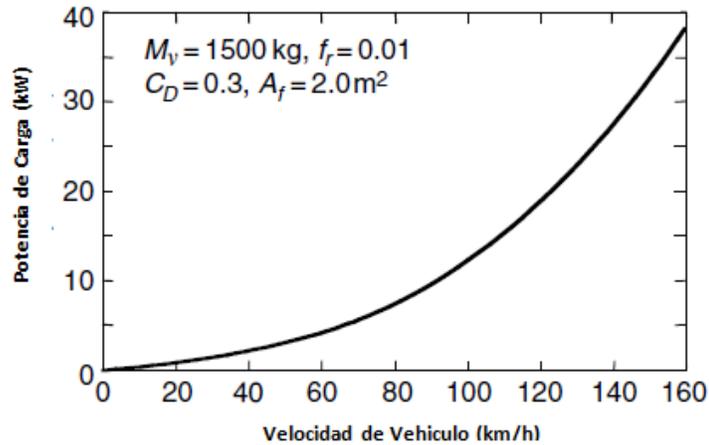


Figura 3.11 Carga de energía de un coche de pasajeros 1500 kg a una velocidad constante⁴⁴

Teniendo en cuenta la ineficacia del motor de tracción y transmisión (η_t y η_m , la ecuación 3.18), la potencia del motor / sistema de generación es de un 20 a 25 por ciento más del que se muestra en figura 3.18.

Cuando el vehículo es manejado con un patrón de paradas frecuentes en las zonas urbanas, la potencia que el motor / generador produce debe ser igual o ligeramente mayor que la potencia de la carga promedio a fin de mantener un equilibrio de almacenamiento de energía en la FEHP. La potencia de la carga media se puede expresar como:

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(M_v g f_r + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 \right) V dt + \frac{1}{T} \int_0^T \delta M_v \frac{dV}{dt} dt \quad (3.19)$$

Donde:

δ es el factor de la masa del vehículo

$\frac{dV}{dt}$ es la aceleración del vehículo.

El primer término en la ecuación es la potencia media que se consume para superar la resistencia a la rodadura de neumáticos y la resistencia aerodinámica. El segundo término es la potencia media consumida en la aceleración y desaceleración. Cuando el vehículo tiene la

⁴⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 248 p.

capacidad de recuperar toda la energía cinética del vehículo, la potencia media consumida en la aceleración y la desaceleración es cero. De lo contrario, será mayor que cero, como se muestra en la figura 3.12.

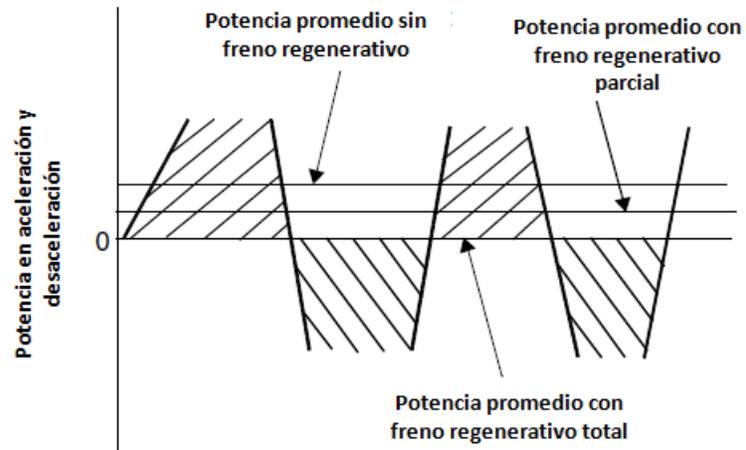


Figura 3.12 La potencia media consumida en la aceleración y desaceleración con pleno, parcial y cero frenado regenerativo⁴⁵

En el diseño de un motor / generador, la capacidad de potencia debe ser mayor, o al menos no menor, que la energía que se necesita para sostener el vehículo de conducción a una velocidad constante (conducción en carretera) y que la energía promedio cuando se conduce en zonas urbanas. En el diseño actual, algunos ciclos típicos en conducción urbana pueden ser utilizados para predecir la energía media del vehículo, como se muestra en la figura 3.13.

⁴⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 249 p.

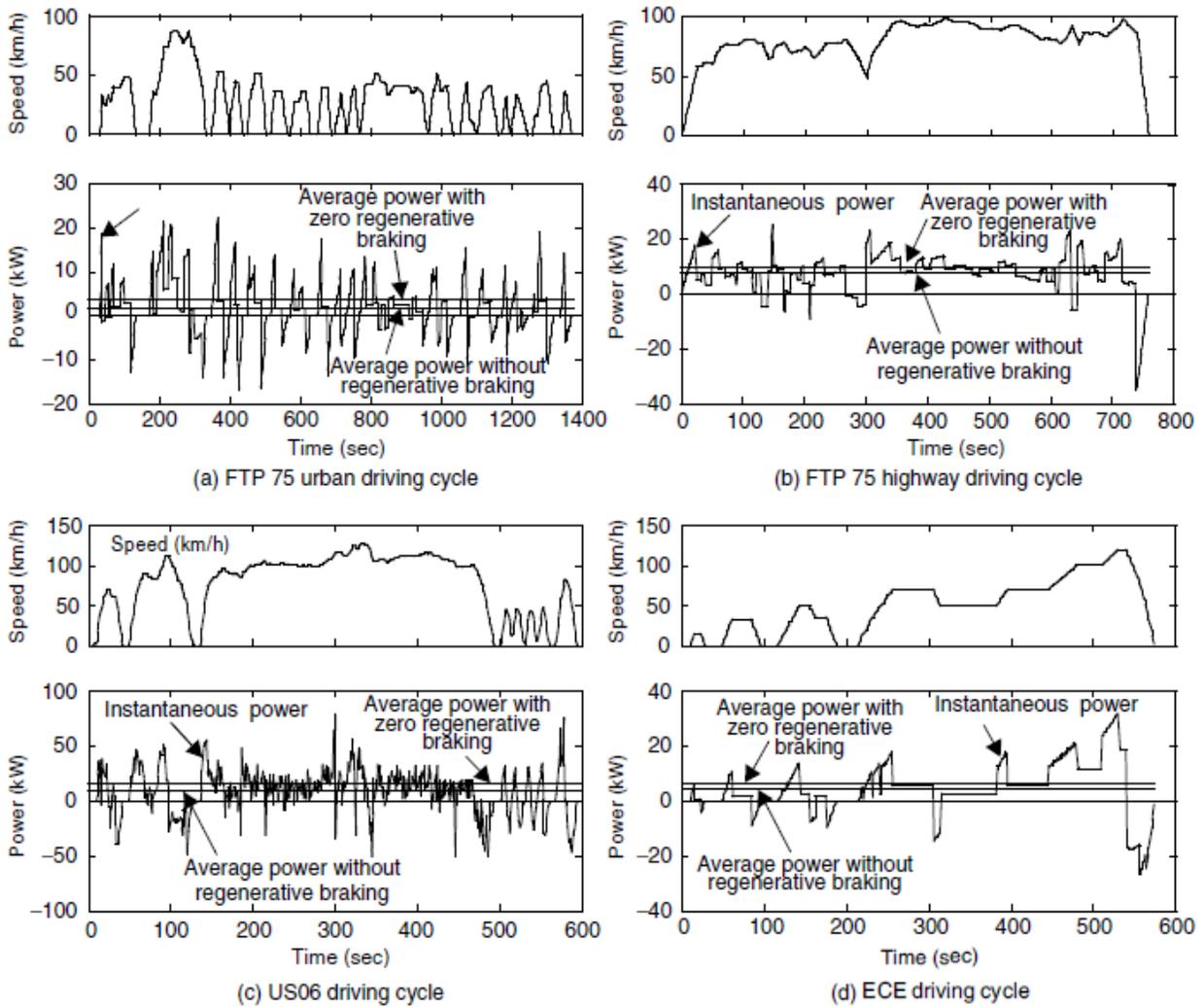


Figura 3.13 La potencia instantánea y la potencia media, con pleno y cero frenado regenerativo en los típicos ciclos de manejo⁴⁶

⁴⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 250 p.

Diseño de la FEHP

La FEHP tiene que ser capaz de suministrar suficiente energía para el motor de tracción en cualquier momento. Al mismo tiempo, la FEHP debe almacenar la energía suficiente para evitar el fracaso de la entrega de energía debido a una descarga demasiado profunda.

Capacidad de Carga de la FEHP

Para aprovechar plenamente la capacidad de energía eléctrica del motor, la potencia total del motor / generador y la FEHP debe ser mayor, o por lo menos igual a la potencia máxima del motor eléctrico. Así, la capacidad de potencia de la FEHP se puede expresar como:

$$P_{FEHP} \geq \frac{P_{m,max}}{\eta_m} - P_{e/g} \quad (3.20)$$

Donde:

$P_{m,max}$ es la potencia nominal máxima del motor,

η_m es la eficiencia del motor,

$P_{e/g}$ es la potencia del motor / generador.

Capacidad de Energía de la FEHP

En algunas condiciones de manejo, un patrón de conducción de frecuentes aceleraciones / desaceleraciones se traduciría en un SOC bajo en la FEHP, perdiendo así su poder de entrega.

Con el fin de determinar correctamente la capacidad de energía de la FEHP, los cambios de energía en la FEHP, en algunos ciclos de marcha típica deben ser conocidos. Los cambios de energía en la FEHP puede ser expresado como:

$$\Delta E = \int_0^T P_{FEHP} dt \quad (3.21)$$

Donde:

P_{FEHP} es la energía de la FEHP, una FEHP positiva representa energía de carga, una FEHP de negativa representa energía de descarga.

La figura 3.14 muestra un ejemplo en el cual los picos de energía varían en el tiempo de conducción. También muestra la cantidad máxima de cambio de energía ΔE_{max} , en todo el ciclo de conducción, si el SOC de la FEHP está dentro del rango de operación entre SOC_{top} y SOC_{bott} .

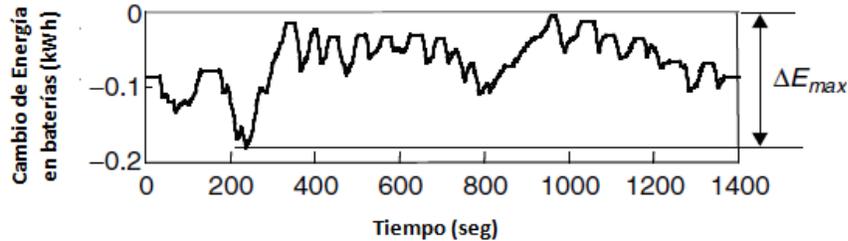


Figura 3.14 Cambios de energía en un ciclo de manejo urbano típico con estrategia de control de Max.SOC⁴⁷

La capacidad de la energía total de los picos de energía se puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$E_{top} = \frac{\Delta E_{max}}{SOC_{top} - SOC_{bott}} \quad (3.22)$$

El rango de operación de la SOC de la FEHP depende de las características de funcionamiento de la FEHP. Por ejemplo, por razones de eficiencia de las baterías químicas tendrían un rango de funcionamiento óptimo en la mitad (0.4-0.7), y por razones de la variación limitada de voltaje, los ultra capacitores sólo tendrían un rango muy limitado de cambio de energía (0,8-1,0).

Diseño del Tren de Tracción Híbrido Eléctrico en Paralelo

A diferencia del tren de propulsión híbrida en serie, el tren de propulsión híbrida en paralelo tiene características que permiten que el motor de combustión interna y el motor de tracción entreguen su energía mecánica en paralelo directamente a las ruedas motrices.

⁴⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 251 p.

Las principales ventajas de configuración en paralelo sobre una configuración en serie son:

1. El Generador no es necesario.
2. El motor de tracción es más pequeño.
3. La multi-conversión de la potencia del motor a las ruedas motrices no es necesaria.

Por lo tanto, la eficiencia global puede ser mayor. Sin embargo, el control del tren de propulsión híbrido en paralelo es más complejo que el de un tren de propulsión híbrido en serie, debido a la conexión mecánica entre el motor y las ruedas motrices.

Hay varias posibilidades para configuraciones en un tren de propulsión híbrida en paralelo, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, la metodología de diseño para una configuración en particular puede ser no aplicable a las demás configuraciones y el resultado del diseño de una configuración en particular, puede ser aplicable sólo a un entorno determinado de operación y a la exigencia requerida.

Este diseño se centrará en la metodología de diseño de los trenes de propulsión en paralelo con acoplamiento de torque, que funcionan según el principio de electricidad en horas pico, es decir, el motor de combustión suministra de energía para satisfacer la carga de base (que funcionan a una velocidad constante en las carreteras de grado plano y suave , o en la media de la carga de un patrón de conducción de “stop-and-go”) y la tracción eléctrica suministrada por el motor sirve para satisfacer los requisitos de carga en horas pico.

La carga base es mucho menor que la carga en horas pico en condiciones normales urbanas y en carretera, como se mencionó anteriormente. Esto sugiere que el rango de potencia del motor de combustión es menor que el rango de potencia de la tracción eléctrica. Debido a las mejores características de torque-velocidad del motor de tracción en comparación con el motor de combustión, la transmisión de un solo engranaje para el motor de tracción puede ser la opción correcta. Así, el diseño del tren de transmisión será como se muestra en la figura 3.15.

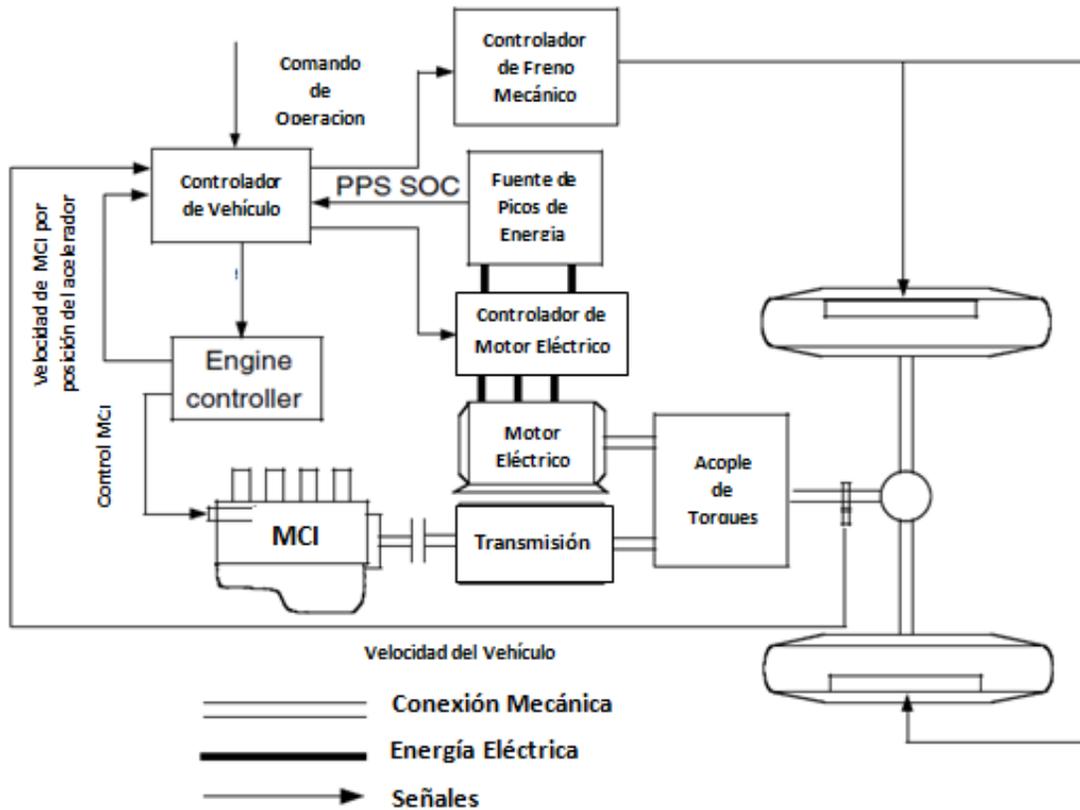


Figura 3.15 Configuración del tren de tracción híbrido con acople de torques⁴⁸

Estrategias de control del tren de tracción híbrido en paralelo

Los modos de operación disponible en un tren de propulsión híbrida en paralelo, como se mencionó anteriormente, incluyen principalmente:

1. Tracción únicamente del motor de combustión.
2. Tracción eléctrica independiente.
3. Tracción híbrida (motor de combustión más el motor eléctrico).
4. De frenado regenerativo.
5. Carga de baterías por motor de combustión.

⁴⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 260 p.

Durante el funcionamiento, los modos de funcionamiento se deben utilizar con el fin de cumplir con el torque de tracción requerido, lograr la eficiencia global más alta, mantener un nivel razonable de SOC FEHP, y recuperar la energía de frenado tanto como sea posible.

El esquema general de control consta de dos niveles. El sistema de control del vehículo (un regulador de alto nivel), que funciona como un comandante y da órdenes a los controladores de torque de bajo nivel (los reguladores locales o de componente) sobre la base de comando del operador, las características de los componentes, y la retroalimentación de información de los componentes. Los controladores de bajo nivel (los reguladores locales o de componentes), como los controladores de motor de combustión, motor eléctrico, y el de la transmisión multimarcha, el de los componentes correspondientes para hacerlas funcionar correctamente.

El esquema de control global de la cadena cinemática híbrida en paralelo se muestra en la figura 3.16.

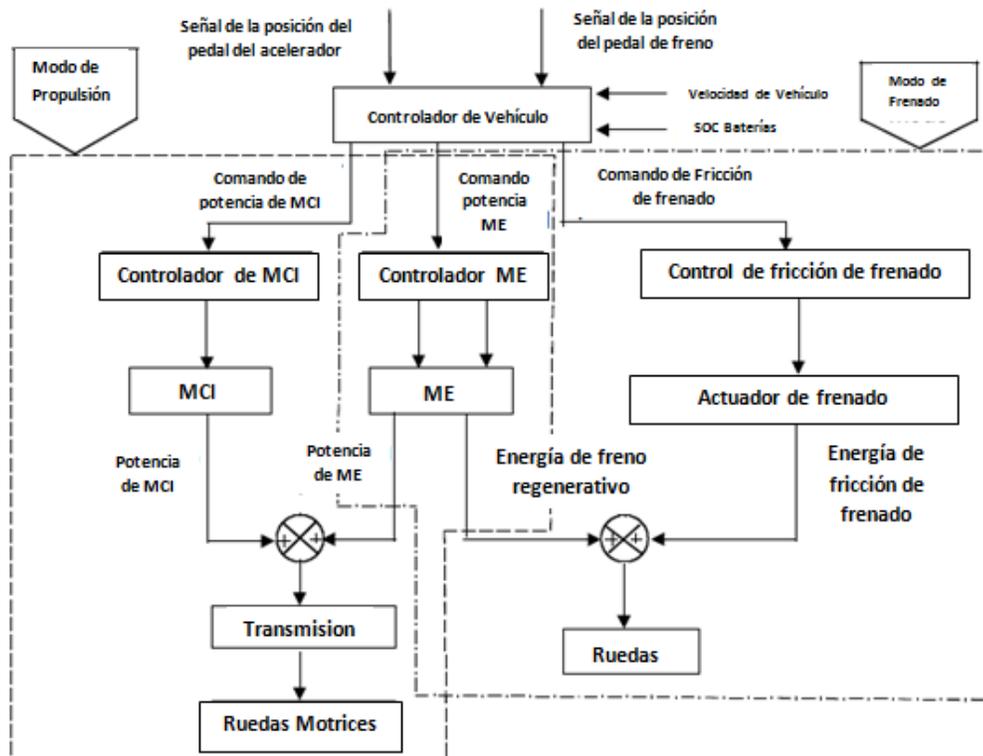


Figura 3.16 Esquema de control global de la cadena cinemática híbrida en paralelo⁴⁹

⁴⁹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 261 p.

Se compone de un controlador de vehículo, control del motor de combustión, controlador del motor eléctrico, y el controlador del freno mecánico. El responsable del vehículo está en la posición más alta. Recoge los datos del conductor y todos los componentes, tanto como se desee de torque, de velocidad del vehículo, PPS SOC, la velocidad del motor eléctrico y la posición del acelerador, la velocidad el motor eléctrico, etc. En base a estos datos, características de los componentes, y la estrategia de control prefijadas, el responsable del vehículo da señales de control a cada controlador de componente / controlador local. Cada controlador local controla el funcionamiento del componente que corresponde para cumplir los requisitos de la transmisión.

El controlador del vehículo desempeña un papel central en el funcionamiento de la transmisión. El controlador del vehículo debe cumplir con varios modos de funcionamiento, de acuerdo a la condición de manejo y los datos recogidos por los controladores de los componentes, y debe dar el comando de control correcto para cada controlador de componentes. Por lo tanto, la estrategia de control predeterminada es la clave para el éxito de la operación óptima de la transmisión.

Estrategia de control de estado máximo de carga de las Baterías (máx. SOC-de-PPS)

Cuando un vehículo está funcionando en un patrón de conducción stop-and-go, la FEHP deberá entregar su potencia al tren motriz con frecuencia. En consecuencia, el FEHP tiende a ser dados de alta rápidamente. En ese caso, un alto mantenimiento de SOC PPS es necesario para garantizar el funcionamiento del vehículo. Por lo tanto, la estrategia de control del estado máximo de carga de las baterías (max. SOC-de-PPS) puede ser la opción correcta.

La estrategia de control máxima puede ser explicada por la figura 3.17.

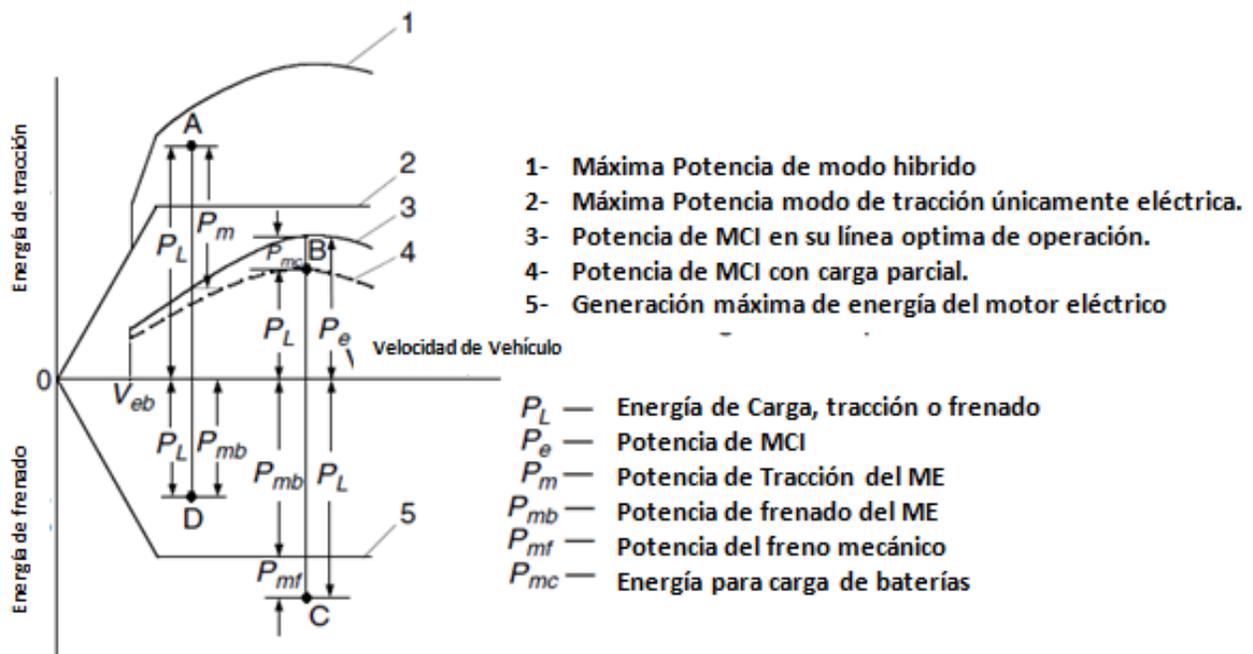


Figura 3.17 Demostración de varios modos de operación basados en la demanda de energía⁵⁰

En la figura 3.17, las curvas de potencia máxima de tracción híbrida (motor de combustión más el motor eléctrico), tracción únicamente por motor de combustión, tracción por motor eléctrico independiente, y de frenado regenerativo, se trazan contra la velocidad del vehículo. La demanda de energía en diferentes condiciones también está trazada, representadas por las letras A, B, C y D.

Los modos de operación del tren de tracción son explicados a continuación:

Modo de propulsión únicamente por motor eléctrico: La velocidad del vehículo es inferior a un valor preestablecido V_{eb} , que se considera la línea inferior de la velocidad del vehículo por debajo de la cual el motor no puede funcionar de forma constante. En este caso, el motor eléctrico sólo entrega su potencia a las ruedas impulsadas, mientras que

⁵⁰ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 262 p.

el motor de combustión se apaga o queda en ralentí. La potencia del motor, potencia de tracción eléctrica, y el poder de descarga PPS se puede escribir como:

$$P_g = 0, \quad (3.23)$$

$$P_m = \frac{P_L}{\eta_{L,m}}, \quad (3.24)$$

$$P_{pps-d} = \frac{P_m}{\eta_m} \quad (3.25)$$

Donde:

P_g es la potencia del motor,

P_L es la demanda de potencia de carga en las ruedas motrices,

$\eta_{L,m}$ es la eficiencia de transmisión del motor a las ruedas motrices,

P_m es la potencia del motor eléctrico,

P_{pps-d} es la energía de descarga de la FEHP,

η_m es la eficiencia del motor.

Modo de tracción híbrida: La demanda de energía, representada por el punto A de la figura 3.17, es mayor que lo que el motor puede producir, tanto el motor de combustión y el motor eléctrico deben entregar su poder a las ruedas motrices al mismo tiempo. Esto se conoce como modo de propulsión híbrido. En este caso, el funcionamiento del motor se encuentra en su línea de funcionamiento óptimo mediante el control del acelerador del motor para producir energía P_g . La demanda de energía restante es suministrada por el motor eléctrico. La potencia del motor y la potencia de descarga de las baterías son:

$$P_m = \frac{P_L - P_g \eta_{L,g}}{\eta_{L,m}}, \quad (3.26)$$

$$P_{pps-d} = \frac{P_m}{\eta_m} \quad (3.27)$$

Donde:

$\eta_{L,g}$ es la eficiencia de transmisión del motor a las ruedas motrices.

Modo de carga de las baterías: Cuando la demanda de carga, representada por el punto B en la figura 3.17, es menor que la potencia que el motor puede producir durante el funcionamiento en su línea de funcionamiento óptimo, y el estado de carga de las baterías está por debajo de su línea superior, el motor de combustión funciona en su línea óptimo, produciendo su energía P_g . En este caso, el motor eléctrico está controlado por su controlador para funcionar como un generador, alimentado con la energía restante del motor de combustión. La potencia de salida del motor eléctrico y la carga de energía de las baterías son:

$$P_m = \left(P_g - \frac{P_L}{\eta_{LSE}} \right) \eta_{LSE} \eta_m \quad (3.28)$$

$$P_{pps-c} = P_m \quad (3.29)$$

Donde:

η_{LSE} es la eficiencia de transmisión del motor de combustión al motor eléctrico.

Modo de propulsión únicamente por motor de combustión: Cuando la demanda de carga (representada por el punto B en la Figura 3.17) es menor que la potencia que el motor puede producir durante el funcionamiento en su línea de funcionamiento óptimo, y el SOC PPS ha llegado a su línea superior, se usa el modo de propulsión únicamente por motor de combustión. En este caso, el sistema eléctrico está apagado, y el motor funciona para suministrar la energía que satisface la demanda de potencia de carga. La curva de potencia del motor a carga parcial es representada por la línea punteada de la figura 3.17. La potencia mecánica, la potencia eléctrica, y la potencia de la batería pueden ser expresados por:

$$P_g = \frac{P_L}{\eta_{LSE}} \quad (3.30)$$

$$P_m = 0, \quad (3.31)$$

$$P_{pps} = 0 \quad (3.32)$$

Modo de frenado regenerativo: Cuando el vehículo está frenando y la energía requerida de frenado es inferior a la máxima potencia de frenado regenerativo que el sistema electrónico puede dar (como se muestra en la Figura 3.17 representada por la letra D), el motor eléctrico está controlado para funcionar como un generador para producir una potencia de frenado que iguale a el poder demandado de frenado. En este caso, el motor se apaga o entra a ralentí. La potencia del motor y la carga de la batería son:

$$P_{mb} = P_L \eta_{em} \eta_{gm} \quad (3.33)$$

$$P_{pps-c} = P_{mb} \quad (3.34)$$

Modo de frenado híbrido: Cuando la energía demandada para frenar es mayor que la máxima energía de frenado regenerativo puede generar (como se muestra en la figura 3.17 con la letra C), se debe aplicar el freno mecánico. En este caso, el motor eléctrico debe ser controlado para generar la máxima energía de frenado regenerativo, y el sistema de freno mecánico debe manejar la parte restante. La potencia de salida del motor, la potencia de carga de las baterías y la potencia del freno mecánico son:

$$P_{mb} = P_{mb,max} \eta_{gm} \quad (3.35)$$

$$P_{pps-c} = P_{mb} \quad (3.36)$$

Se debe aclarar que para un mejor rendimiento de frenado las fuerzas frontales en las llantas delanteras y traseras deben ser proporcionales a la carga normal de las llantas. Por lo tanto, el control de la potencia de frenado no debe ser exactamente el mencionado anteriormente. El diagrama de control del Max. SOC de PPS se representa a continuación:

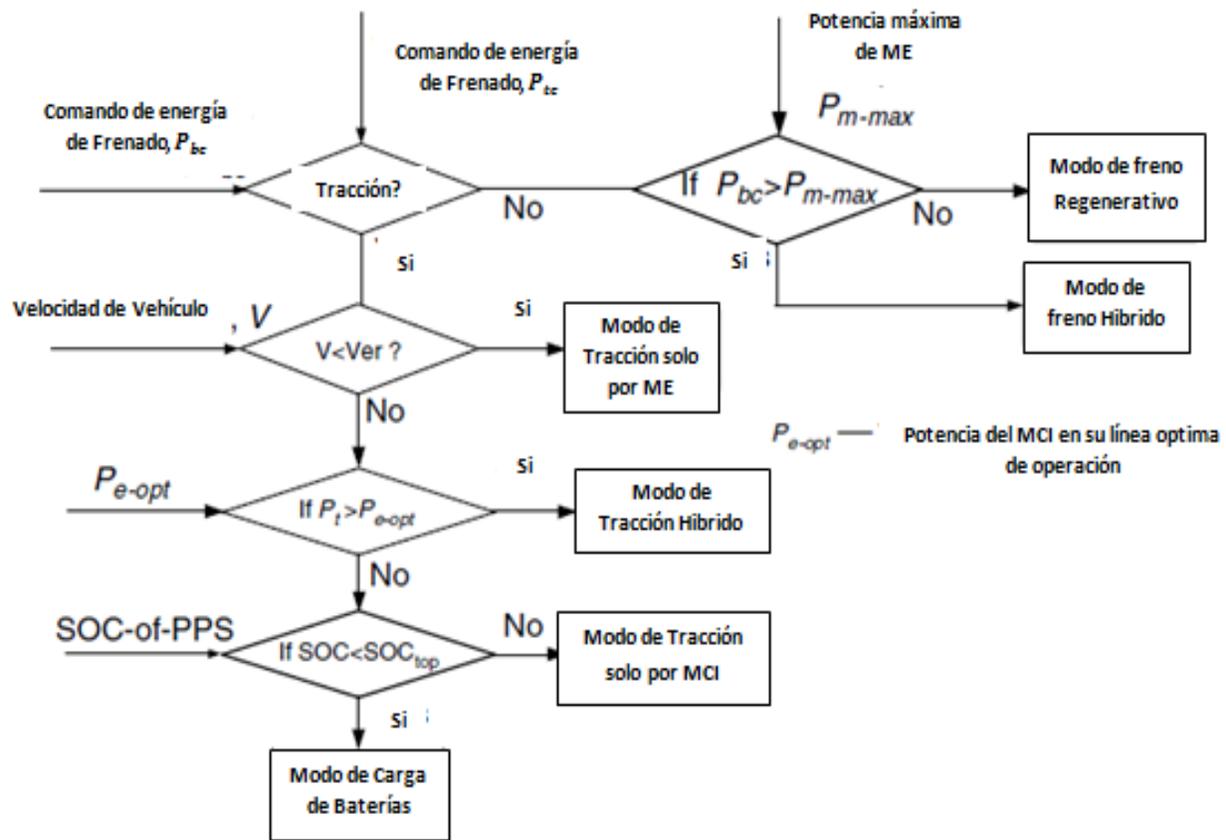


Figura 3.18 Diagrama de flujo de la estrategia de control para un Max SOC de las PPS⁵¹

Estrategia de control del encendido y apagado del Motor de Combustión

Similar al utilizado en el tren de tracción híbrido en serie, la estrategia de control del encendido y apagado del MCI puede ser utilizado en algunas condiciones de operación con baja velocidad y baja aceleración. En esta estrategia de control el MCI es regulado por la SOC de la PPS como muestra la figura 3.19.

⁵¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 265 p.

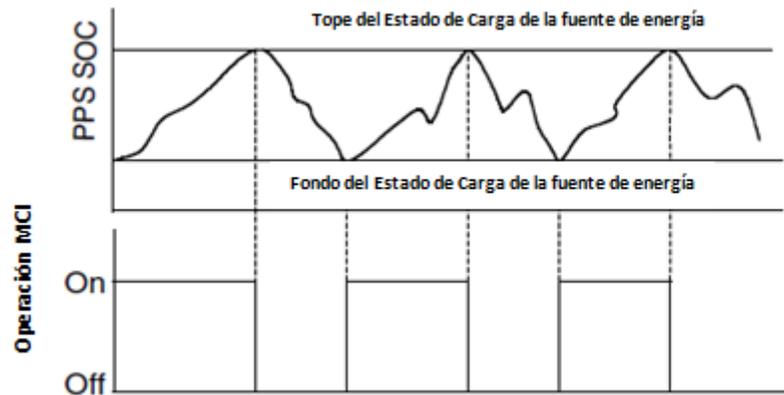


Figura 3.19 Estrategia de Control del MCI⁵²

En el periodo de encendido la estrategia de control es del Max SOC de las PPS. Cuando el SOC de las PPS llega a su línea tope el MCI se apaga y el vehículo es propulsado únicamente por el motor eléctrico. Cuando el SOC de las PPS alcanza su línea base el MCI se enciende y el control cambia a MAX. SOC de las PPS.

Diseño de los Parámetros del Tren de Tracción

Los parámetros del tren de tracción como las potencias del MCI y del ME, la relación de transmisión de las marchas, y la potencia y la capacidad de energía de la fuente de las baterías son parámetros claves y ejercen una influencia considerable sobre la eficiencia de operación y rendimiento del vehículo. Sin embargo, como primer paso en el diseño, estos parámetros deben ser estimados en base a los requerimientos de funcionamiento. Cada parámetro debe ser redefinido en base a simulaciones.

Diseño de la capacidad de potencia del MCI

El MCI debe ser capaz de suministrar energía suficiente para apoyar el funcionamiento del vehículo a velocidad constante en un camino plano y un camino de inclinación leve, sin la ayuda de las baterías. Al mismo tiempo, el MCI debe ser capaz de producir una potencia media que sea mayor que la potencia media de carga, cuando el vehículo funciona con un patrón de funcionamiento de “stop-and-go”.

⁵² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 265 p.

Como requisito para una normal conducción en una carretera a velocidad constante sobre una superficie plana o en una superficie con una leve inclinación, la potencia necesaria se expresa como:

$$P_e = \frac{V}{1000n_{t,e}} \left(M_v g f_r + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M_v g i \right) (KW). \quad (3.37)$$

El diseño anterior de la potencia del MCI debe ser evaluada para cumplir con la demanda de carga promedio en un patrón de conducción "Stop-and-go".

En un ciclo de manejo, la demanda de carga promedio de un vehículo puede ser calculada por:

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(M_v g f_r V + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^3 + \delta M_v V \frac{dV}{dt} \right) dt. \quad (3.38)$$

La potencia promedio varía dependiendo del grado de frenado regenerativo. Los dos casos extremos son el frenado regenerativo total y el frenado regenerativo igual a cero. El frenado regenerativo total recupera toda la energía consumida en el frenado y el promedio puede ser calculado con la ecuación anterior. No obstante, cuando el vehículo no tiene frenado regenerativo, la potencia media es mayor que la potencia con freno regenerativo total, de tal manera que cuando la potencia instantánea es menor que cero, se la toma como cero.

En el diseño de la potencia del MCI, la potencia media producida debe ser mayor que la demanda de carga promedio. En un tren de tracción en paralelo el MCI es acoplado mecánicamente a las ruedas motrices. Por lo tanto, la velocidad de rotación del MCI varía con la velocidad del vehículo. Por otro lado, la potencia del MCI con aceleración total, varía según la velocidad de rotación del MCI. En consecuencia, determinar la potencia necesaria para alcanzar la demanda de carga promedio en ciclo de manejo no es tan sencillo como en híbrido en serie, en el cual la energía de operación del MCI se puede fijar. La energía promedio que el MCI puede generar con máxima aceleración se la puede calcular por:

$$P_e = \frac{1}{T} \int_0^T P_e(v) dt \quad (3.39)$$

Donde:

T es el tiempo total de un ciclo de manejo.

$P_e(v)$ es energía del MCI con aceleración total; la cual es función de la velocidad del vehículo cuando la relación de transmisión está dada.

Diseño de la Capacidad de potencia del motor eléctrico de propulsión

En un vehículo híbrido eléctrico, la principal función del motor eléctrico es suministrar los picos potencia al tren de tracción. En el diseño de la potencia del ME, el rendimiento de la aceleración y los picos de carga máxima en un ciclo típico de conducción son las principales preocupaciones.

Es difícil diseñar directamente la potencia del motor en base a un comportamiento de aceleración específico. Es necesario hacer una buena estimación basada en los requisitos de aceleración, y posteriormente hacer un diseño final a través de una simulación correcta.

Como una primera estimación, se puede asumir que la carga en estado estacionario (resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica) es manejado por el MCI y la carga dinámica (carga de inercia en la aceleración) es manejado por el ME. Con este supuesto, la aceleración está directamente relacionado con la salida del par del motor eléctrico por:

$$\frac{T_m \eta_m \eta_{gm}}{r} = \delta_m M_v \frac{dV}{dt} \quad (3.40)$$

Donde:

T_m es el torque del ME.

δ_m es el factor de masa asociado al ME.

Usando las características de salida del motor eléctrico mostradas en la figura 3.19 y un tiempo de aceleración específico (t_a), desde una velocidad cero a una velocidad final alta (V_f), la potencia del motor se expresa como:

$$P_m = \frac{\delta_m M_v}{2\eta_{t,m} t_a} (V_f^2 + V_b^2), \quad (3.41)$$

Cabe señalar que la potencia del motor obtenida esta fórmula es algo sobreestimada. En realidad, el MCI tiene algo de energía sobrante para ayudar al motor eléctrico a acelerar el vehículo.

Este hecho se muestra en la figura 3.20, en donde la velocidad del vehículo, la potencia del motor con el acelerador a fondo, el poder de resistencia (resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica, y las pérdidas de energía en la transmisión), y la transición de una transmisión simple se trazan a lo largo del tiempo de aceleración.

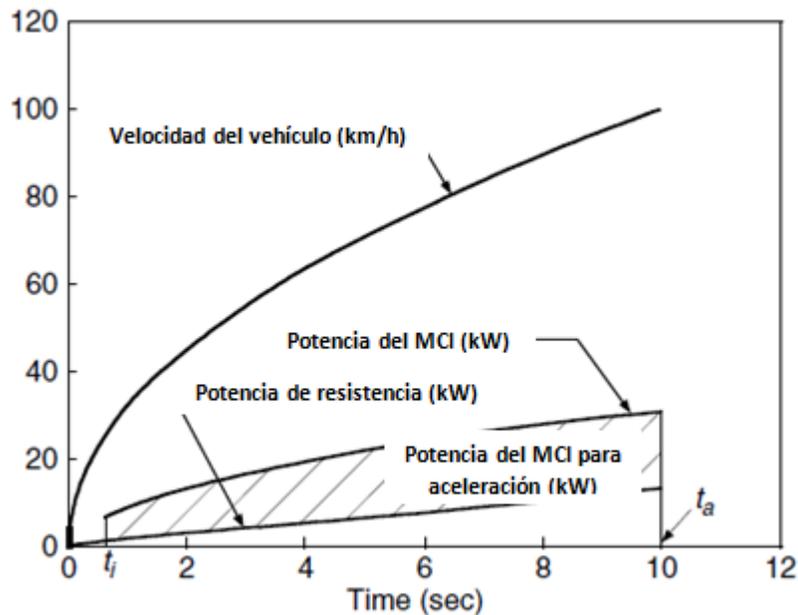


Figura 3.20 Velocidad del vehículo, potencia del MCI con el acelerador a fondo, el poder de resistencia, vs. Tiempo de aceleración⁵³

⁵³ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 270 p.

La energía restante promedio del MCI, utilizada para acelerar el vehículo, puede expresarse como:

$$E_{e,a} = \frac{1}{t_a - t_i} \int_{t_i}^{t_a} (P_g - P_r) dt_i \quad (3.42)$$

Donde:

P_g es la potencia del MCI.

P_r es el poder de resistencia.

Se debe recalcar que la potencia del MCI transmitida a las ruedas motrices está asociada con la transmisión, es decir, el número de engranajes y las relaciones de transmisión.

Una transmisión multimarcha efectivamente aumentará la energía restante en las ruedas motrices, lo que reduce la potencia necesaria del ME para la aceleración.

Cuando las potencias del MCI y el ME estén diseñadas, se necesita revisar el cálculo una vez más para evaluar el rendimiento del vehículo, sobre todo la velocidad, la capacidad de ascenso y la aceleración.

Diseño de la Transmisión

Puesto que el motor eléctrico provee de picos de energía y tiene un alto torque a baja velocidad, una transmisión simple entre el motor eléctrico y las ruedas motrices puede generar suficiente torque para subir montañas y acelerar. Sin embargo, una transmisión multimarcha puede mejorar el rendimiento del vehículo.

EL uso de una transmisión multimarcha puede efectivamente incrementar la energía restante del MCI. Como resultado el rendimiento del vehículo (en aceleración y capacidad de ascenso) mejora. Por otro lado, el almacenamiento de energía se puede cargar mayormente con energía del MCI. El consumo de combustible del vehículo también puede mejorar, ya que el uso adecuado de una transmisión multimarcha permite al MCI operar más cerca de su rango óptimo de velocidad. Además, la gran potencia restante del MCI puede cargar el almacenamiento de energía pasando rápidamente de un bajo SOC a un alto SOC.

Sin embargo, la transmisión multimarcha es mucho más compleja, más pesada y más grande que una transmisión simple. Por otra parte, también necesita una complicada estrategia de control. Así, en el diseño del híbrido eléctrico en paralelo algunas compensaciones deben ser hechas.

Diseño del almacenamiento de energía

El diseño de almacenamiento de energía incluye principalmente la potencia y la capacidad de energía. El diseño de la capacidad de energía es algo sencillo. El poder de la terminal de almacenamiento de energía debe ser mayor que la energía eléctrica de entrada del motor eléctrico, es decir:

$$P_s \geq \frac{P_m}{\eta_{em}} \quad (3.43)$$

Donde:

P_m es la potencia del motor eléctrico.

η_{em} es la eficiencia del motor eléctrico.

El diseño de la capacidad de almacenamiento de la terminal de almacenamiento de energía está estrechamente asociado con el consumo de energía en diversas condiciones de conducción sobre todo la de aceleración a fondo y la de ciclos típicos de conducción.

Durante el período de aceleración, las energías extraídas de la terminal de almacenamiento de energía y del motor eléctrico se pueden calcular, junto con el cálculo del tiempo de aceleración y la distancia por:

$$E_s = \int_0^{t_a} \frac{P_m}{\eta_{em}} dt \quad (3.44)$$

$$E_{eng} = \int_0^{t_a} P_e dt \quad (3.45)$$

Donde:

E_s es la energía entregada por la terminal de almacenamiento de energía.

E_{eng} es la energía entregada por el MCI.

P_m es la potencia entregada por el ME.

P_e es la potencia entregada por el MCI.

La capacidad de almacenamiento de energía de la terminal de almacenamiento debe también cubrir los requerimientos para un patrón de conducción de “stop and go”.

Los cambios de energía de la terminal de almacenamiento se pueden obtener por:

$$E_c = \int_0^t (P_{sc} - P_{sd}) dt \quad (3.46)$$

Donde:

P_{sc} es la potencia de carga de la terminal de almacenamiento.

P_{sd} es la potencia de descarga de la terminal de almacenamiento.

Con una estrategia de control dada, la carga y descarga de la energía de la terminal de almacenamiento se puede obtener mediante la simulación del tren de mando.

En realidad, no toda la energía almacenada en la terminal de almacenamiento puede ser plenamente utilizada para entregar suficiente potencia al tren de tracción. En el caso de baterías usadas como terminal de almacenamiento de energía, un bajo SOC limita su potencia de salida, y, al mismo tiempo da lugar a una baja eficiencia, debido a un aumento de la resistencia interna. En el caso de los supercapacitores utilizados como terminal de almacenamiento de energía, un bajo SOC se traducirá en baja tensión en los terminales que afectan al rendimiento del motor de tracción. Del mismo modo, cuando se utiliza un volante de inercia, un bajo SOC significa baja velocidad en el volante de inercia al igual que la tensión en los bornes del motor eléctrico, que funciona como el puerto de intercambio de energía. Por lo tanto, sólo una parte de la energía almacenada en la terminal de almacenamiento puede estar disponible para uso, que puede ser presentado por el porcentaje de su SOC. Así, la capacidad de energía de la acumulación de energía puede ser obtenida como:

$$E_{cs} = \frac{E_D}{SOC_t - SOC_b} \quad (3.47)$$

Donde:

E_D es la energía descargada de la terminal de almacenamiento.

SOC_t es la línea tope del SOC de la terminal de almacenamiento.

SOC_b es la línea base del SOC de la terminal de almacenamiento.

Diseño del Tren de Tracción Pseudo Híbrido

Los vehículos híbridos eléctricos con configuraciones en serie o paralelo pueden reducir significativamente el consumo de combustible por el funcionamiento óptimo del motor y el eficaz uso del frenado regenerativo.

Sin embargo, la alta demanda de energía eléctrica requiere de un paquete de almacenamiento de energía voluminoso y pesado. Esto significa que la pérdida de energía en rodadura de los neumáticos se incrementará, y la capacidad de carga del vehículo se reduce.

Los trenes de tracción totalmente híbridos cuentan con estructuras totalmente diferentes de los trenes de transmisión convencional. Para cambiar completamente la unidad de los trenes convencionales a un tren totalmente híbrido, se necesita una enorme inversión de tiempo y dinero.

El compromiso es desarrollar un producto intermedio que sea más fácil de convertir de los productos actuales, y que sea más eficiente que esos productos. Una solución es colocar un pequeño motor eléctrico detrás del motor, que constituyen el llamado tren de propulsión pseudo híbrido. Este pequeño motor eléctrico puede funcionar como un motor de arranque del motor, así como de un generador eléctrico. Este puede también añadir potencia adicional al tren de propulsión cuando una alta energía es demandada y puede convertir una parte de la energía de frenado en energía eléctrica. Este pequeño motor potencialmente puede reemplazar el embrague o el convertidor de torque, que es ineficiente cuando se opera con una alta relación de deslizamiento.

Un tren propulsión pseudo híbrido no necesita de gran almacenamiento de energía debido al pequeño rango de potencia del motor eléctrico. Un sistema eléctrico de 42 V puede

ser capaz de cumplir los requisitos. Otros subsistemas de los vehículos convencionales, como el motor, la transmisión (caja de cambios), y el freno no necesitan muchos cambios.

Tren de pseudo híbrido en paralelo

Configuración

Un motor eléctrico pequeño, que puede funcionar como un motor de arranque, generador y motor de tracción, se coloca entre el motor y la transmisión automática (caja de cambios). El embrague se utiliza para desconectar la caja de cambios del motor cuando sea necesario, como por ejemplo durante los cambios de velocidades y a bajas velocidades del vehículo. La potencia del motor eléctrico puede estar en el rango de alrededor del 10 por ciento del rango de potencia del motor. El motor eléctrico puede ser controlado sin problemas para funcionar a cualquier velocidad y torque, por lo que el aislamiento entre el motor eléctrico y la transmisión no es necesario. El funcionamiento del tren de propulsión y cada componente individual es controlado por el controlador de tracción y los controladores de los componentes.

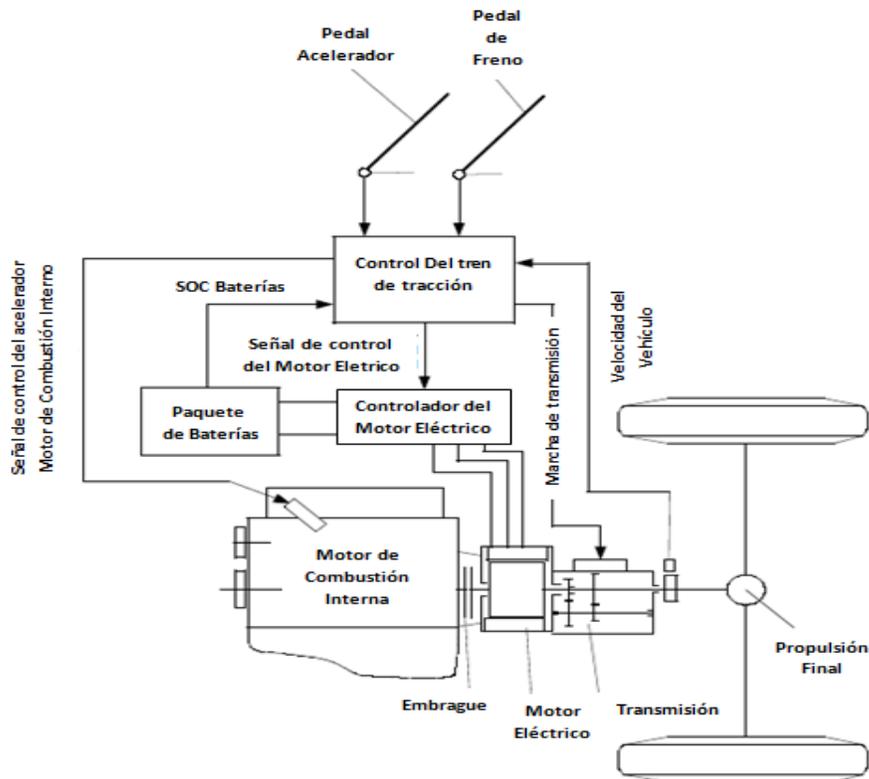


Figura 3.21 Configuración en paralelo del tren de tracción pseudo híbrido⁵⁴

⁵⁴ M. Ehsani and others. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 280 p.

Modos de Operación y Estrategias de Control

El tren de tracción tiene varios modos de funcionamiento, dependiendo de la operación del motor y del motor eléctrico.

Tracción únicamente por motor: En este modo de funcionamiento, el motor eléctrico se desactiva, y el vehículo es propulsado solamente por el motor. Este modo puede utilizarse cuando el estado de carga de las baterías (SOC) está en la parte alta, y el motor por sí solo puede manejar la demanda de energía.

Tracción únicamente por motor eléctrico: En este modo de operación, el motor se apaga y el embrague se desacopla. El vehículo es propulsado solamente por el motor eléctrico. Este modo de funcionamiento se puede utilizar en vehículos de baja velocidad (menos de 10 km / h, por ejemplo).

Modo de carga de la batería: En este modo de operación, el motor eléctrico funciona como un generador y es accionado por el motor para cargar las baterías.

Modo de frenos regenerativos: En este modo de operación, el motor se apaga y el embrague se desacopla. El motor eléctrico es operado para producir un par de frenado al tren motriz. Parte de la energía cinética de la masa del vehículo se convierte en energía eléctrica y se almacena en las baterías.

Modo de tracción Híbrida. En este modo de operación, tanto el motor como el motor eléctrico entregan potencia al tren motriz.

El modo de funcionamiento que se utilice en la operación real depende de la demanda de energía, que es controlado por el conductor a través del acelerador o el pedal del freno, el SOC de las baterías, y la velocidad del vehículo.

La estrategia de control es el control lógico preestablecido en la unidad de control del tren de tracción. La unidad de control del tren de tracción recibe señales en tiempo real del conductor y cada uno de sus componentes, y luego comanda la operación de cada

componente, de acuerdo con la lógica preestablecida de control. Una estrategia lógica de control es propuesta en la tabla 3.6 y figura 3.22.

Ilustración de la lógica de control	
Ralentí	Ambos motores están apagados
Baja Velocidad (<10 km/h)	Tracción únicamente por motor eléctrico
Frenado	Modo de frenos regenerativos
Alta demanda de energía (mayor a la energía que el motor puede producir)	Modo de tracción Híbrida
Media y baja demanda de energía	Modo de carga de la batería o Tracción únicamente por motor, dependiendo del SOC de la batería.

Tabla 3.6 Estrategia Lógica de control⁵⁵

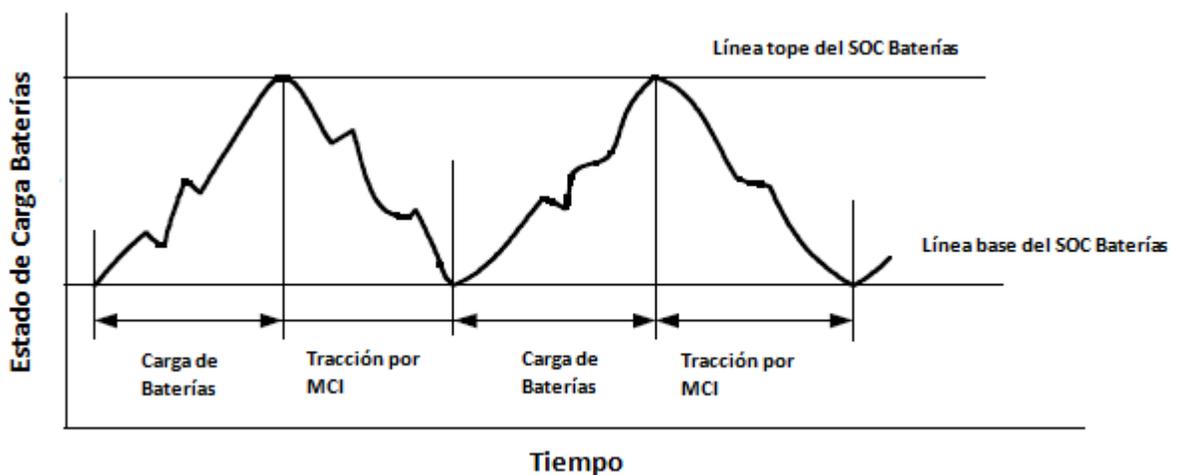


Figura 3.22 Modo de carga de la batería o Tracción únicamente por motor, dependiendo del SOC de la batería⁵⁶

⁵⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 281 p.

⁵⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 282 p.

Rendimiento del motor:

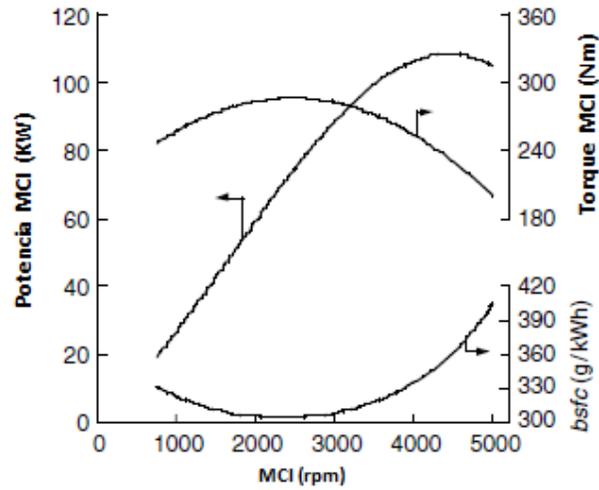


Figura 3.23 Rendimiento con acelerador a fondo⁵⁷

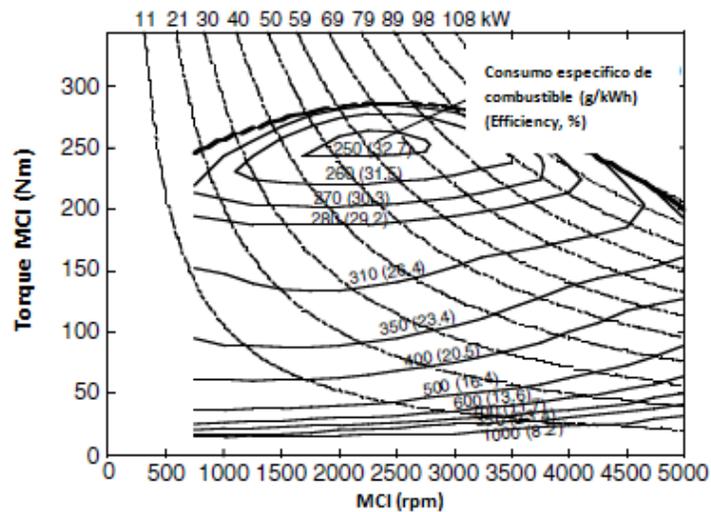


Figura 3.24 Mapa de consumo de energía⁵⁸

Rendimiento

Debido a que hay pocas diferencias con el tren de tracción convencional (motor, transmisión, etc.), se espera que el tren de propulsión pseudo híbrido tenga un rendimiento de aceleración y de capacidad de ascenso similar. La figura 3.25 muestra el rendimiento de un coche de 1500 kg de pasajeros pseudo híbrido.

⁵⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 282 p.

⁵⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 282 p.

Rendimiento del tren de tracción híbrido eléctrico:

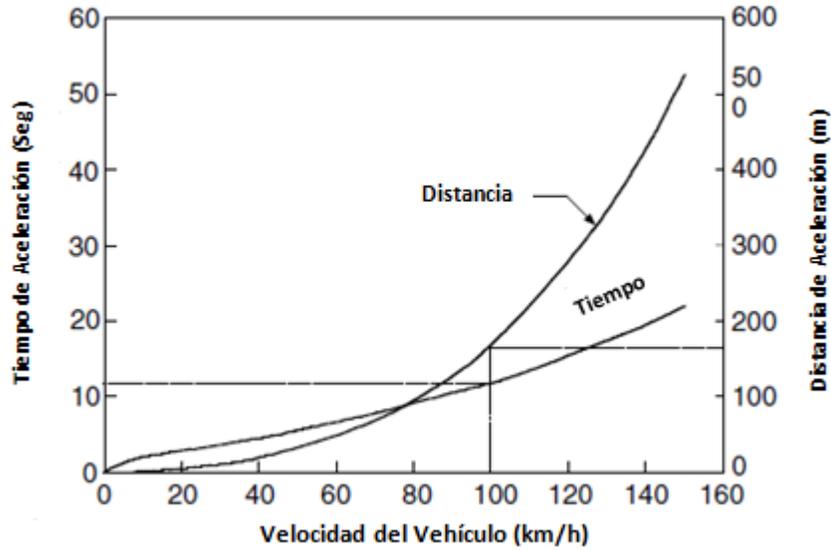


Figura 3.25 Aceleración⁵⁹

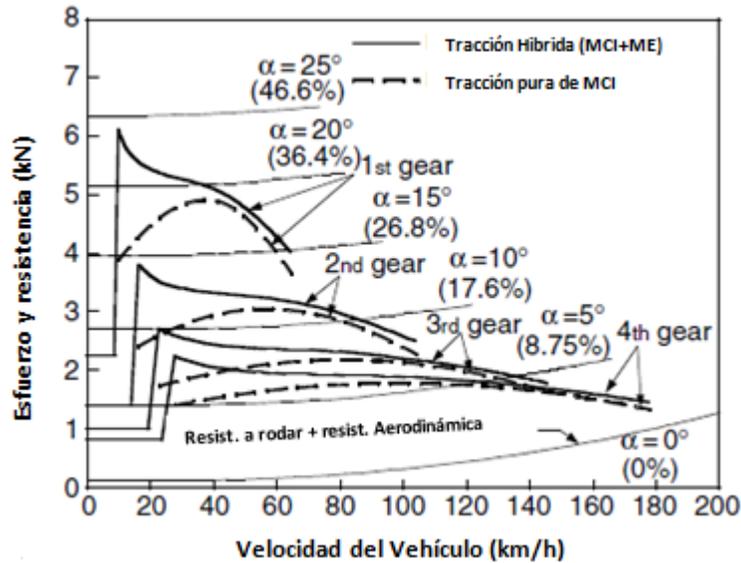


Figura 3.26 Esfuerzo de tracción vs. Velocidad del vehículo⁶⁰

⁵⁹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 287 p.

⁶⁰ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 287 p.

El tren de tracción de un pseudo híbrido con un motor eléctrico pequeño no puede mejorar significativamente la eficiencia del funcionamiento del motor ya que la mayoría de las veces el motor sigue funcionando en una región de baja carga.

Sin embargo, debido a la eliminación del ralentí del motor y del ineficiente convertidor de torque, y a la utilización de un sistema de frenado de recuperación de energía, el consumo de combustible en conducción urbana se ha mejorado considerablemente.

Las figuras 3.27 y 3.28 muestran los resultados de la simulación de un vehículo híbrido de 1500 kg en un ciclo de manejo FTP 75 urbano.

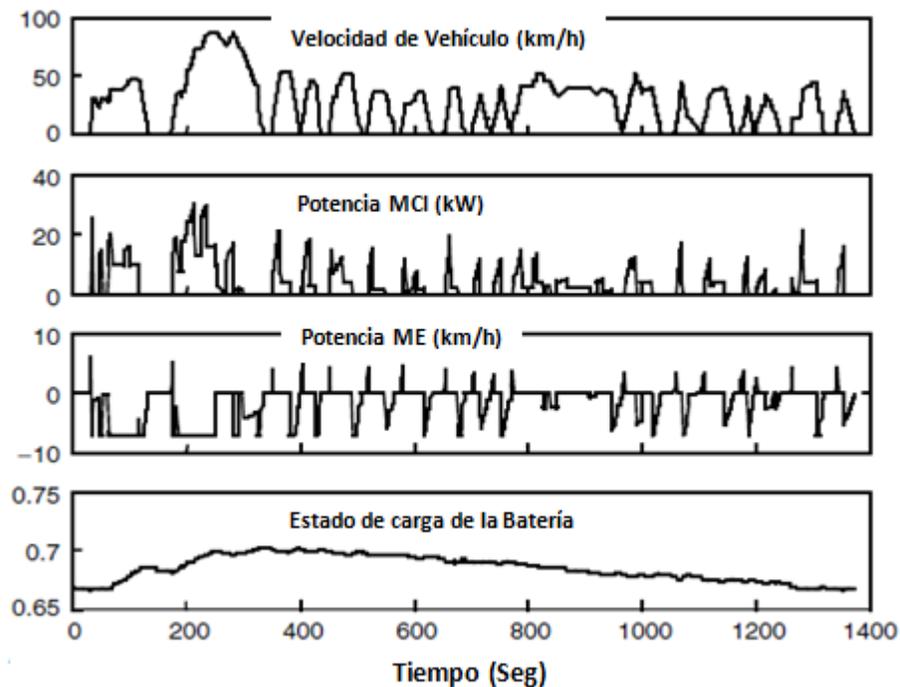


Figura 3.27 Velocidad de vehículo, potencia de motor, potencia de motor eléctrico y SOC de batería⁶¹

⁶¹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 288 p.

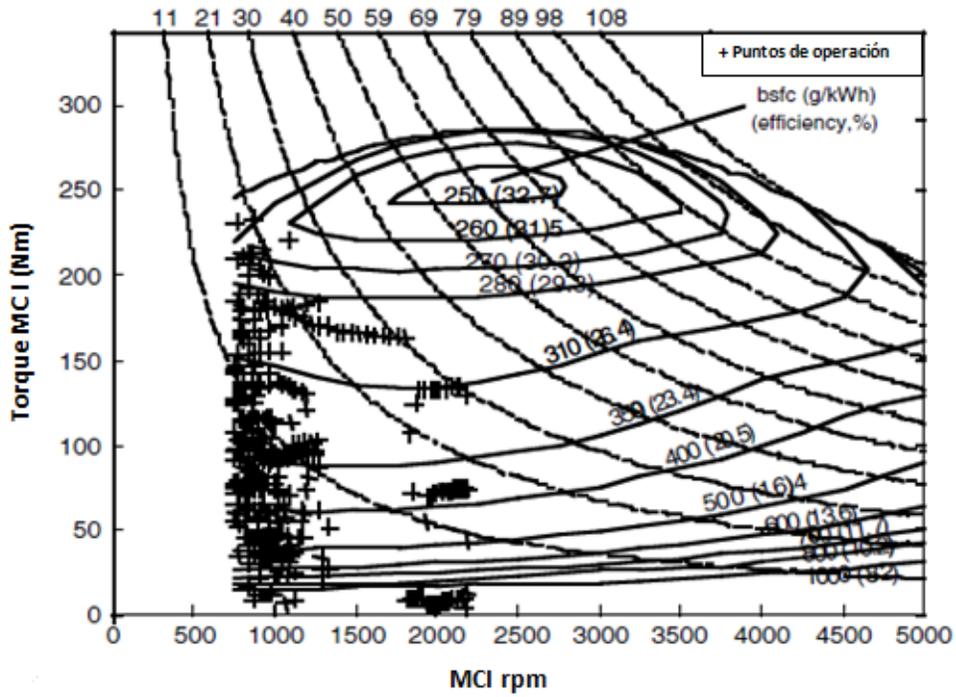


Figura 3.28 Mapa de consumo de combustible y puntos de funcionamiento⁶²

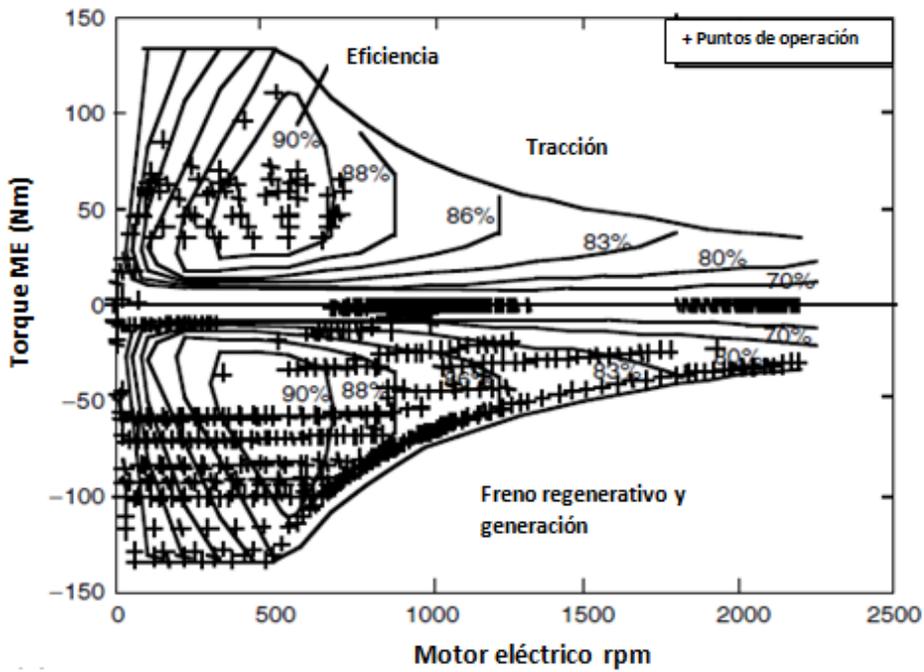


Figura 3.29 Mapa de eficiencia del motor y puntos de funcionamiento⁶³

⁶² M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 288 p.

La simulación muestra que para el coche de pasajeros de 1500kg mencionado anteriormente, el consumo de combustible es de 14,2 km/l (33,2 millas por galón [mpg]). El consumo de combustible simulado de un vehículo convencional similares es de 9,3 km/l (22 mpg), mientras que el Toyota Camry (1445 kg peso en vacío, cuatro cilindros, 2.4 l, 157 CV o 117 kW de potencia máxima del motor, transmisión automática) tiene una economía de combustible de alrededor de 9,7 km/l (23 mpg). Con la tecnología pseudo híbrida, el consumo de combustible puede reducirse en más del 30 por ciento.

En la figura 3.29 donde se muestra el mapa de la eficiencia del motor y los puntos de funcionamiento. Indican que el motor eléctrico funciona más como un generador que como un motor de tracción, para soportar la carga eléctrica de los auxiliares y mantener el equilibrio de la batería del SOC.

En comparación con la conducción urbana los resultados de la simulación del mismo vehículo en un ciclo de manejo FTP 75 de carreteras, las velocidades de ambos motores son más altas, debido a una velocidad mayor del vehículo. El consumo de combustible es de 13,1 km/l (31 mpg) (Toyota Camry: 13,5 km/l ó 32 mpg). El consume de combustible en comparación con el de los vehículos convencionales no ha mejorado. La razón es que el vehículo se enfrenta en la autopista a menos pérdidas de energía por ralentí, por frenado y por la transmisión, que durante la conducción en un ciclo de manejo urbano, y no existe mucho margen de mejora de ahorro de combustible mediante el uso de la tecnología pseudo híbrida.

Tren de tracción pseudo híbrido en paralelo-serie

Configuración del tren de tracción con una unidad de engranes planetarios

La figura 3.30 muestra la configuración de un tren de tracción pseudo híbrido en paralelo-serie, que utiliza una unidad de engranaje planetarios que conecta a el motor, a el motor eléctrico y a la transmisión (caja de cambios).

⁶³ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 288 p.

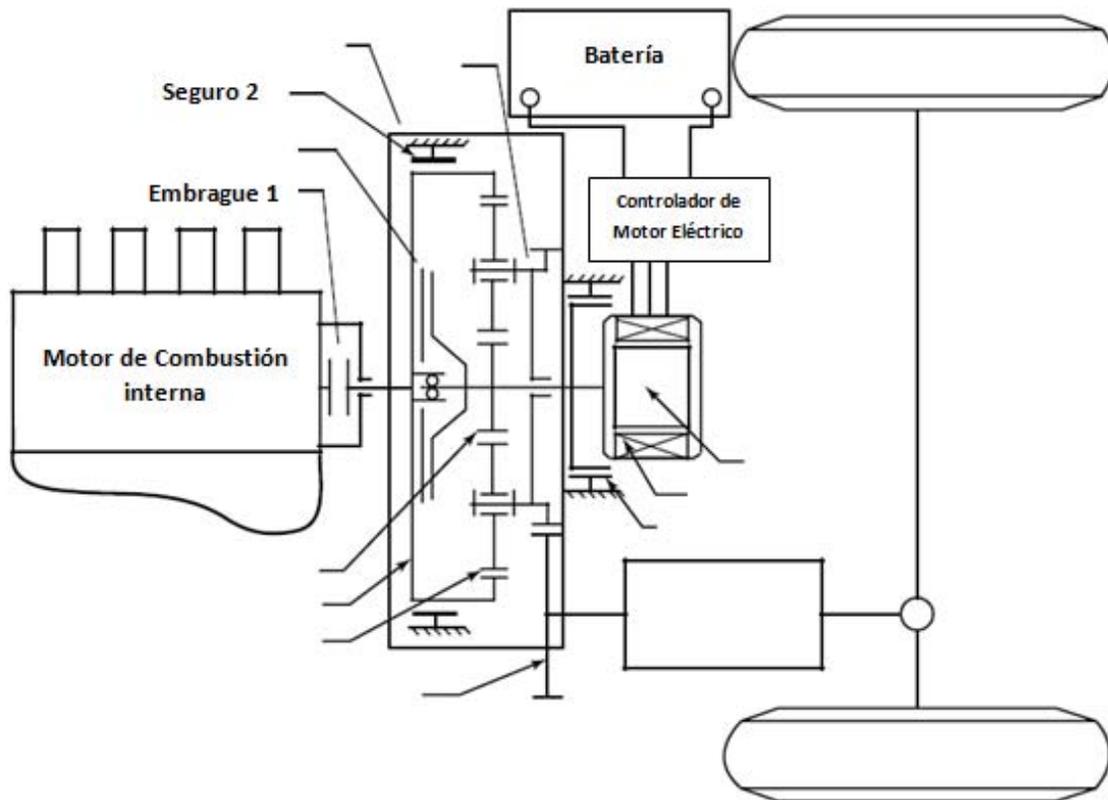


Figura 3.30 Tren de tracción pseudo híbrido en paralelo-serie con una unidad de engranaje planetario⁶⁴

El motor se conecta a la corona de la unidad de engranaje planetario a través del embrague 1, el cual se utiliza para acoplar o desacoplar el motor de la corona. El motor eléctrico se conecta al engranaje planeta. El seguro 1 se utiliza para bloquear el engranaje planeta y al rotor del motor eléctrico al chasis del vehículo. El seguro 2 se utiliza para bloquear la corona al chasis del vehículo. El embrague 2 se utiliza para acoplar o desacoplar el engranaje planeta del o la engranaje corona. La transmisión (caja de cambios) es controlada por el portasatélites de la unidad de engranaje planetario a través de un engranaje.

El engranaje planetario es una unidad de tres puertos multiplicadora de velocidad. Estos tres puertos son el engranaje planeta, la corona, y el portasatélites. Las velocidades angulares de estos tres elementos están relacionados como:

⁶⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 290 p.

$$\omega_c = \frac{\omega_s}{(1+R)} + \frac{R\omega_r}{(1+R)}, \quad (3.48)$$

Donde $R = r_r/r_s > 1$ y se define como la relación de transmisión y ω_s , ω_r , y ω_c son las velocidades angulares del planeta, la corona y el portasatélites respectivamente. Al ignorar las pérdidas de la unidad de engranaje planetario, los momentos que actúan sobre el planeta, la corona y el portasatélites tiene la siguiente relación:

$$T_c = (1 + R)T_s = \frac{1+R}{R} T_r, \quad (3.49)$$

Donde T_s , T_r y T_c son los torques que actúan sobre el planeta, la corona, y el portasatélites, respectivamente, como se muestra en la figura 3.31.

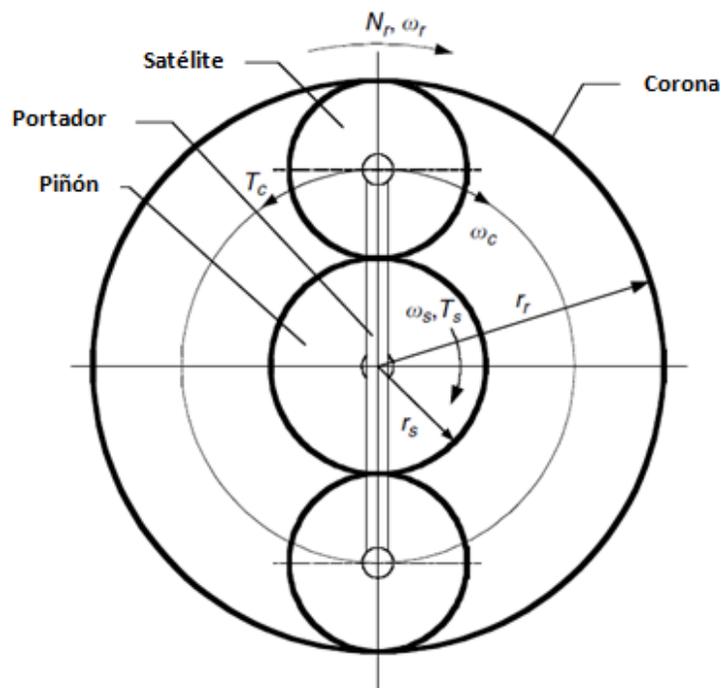


Figura 3.31 Unidad de Engranaje Planetario⁶⁵

⁶⁵ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 291 p.

Como se indica en la fórmula 3.49, la velocidad angular del portasatélites es la suma de las velocidades angulares de los engranajes planeta y corona. La ecuación indica que el torque en el engranaje planeta es el más pequeño, el torque del portasatélites es el mayor, y el torque de la corona está en medio, ya que $R > 1$. En el tren de tracción pseudo híbrido mostrado en la figura 3.30, el motor eléctrico lleva el mínimo esfuerzo de torsión, y el mayor torque es transmitido a la transmisión. Para un torque de motor eléctrico dado, la relación de transmisión más grande resultará en el mayor torque a la transmisión, al mismo tiempo que se necesita un mayor torque del motor, como se muestra en la figura 3.32.

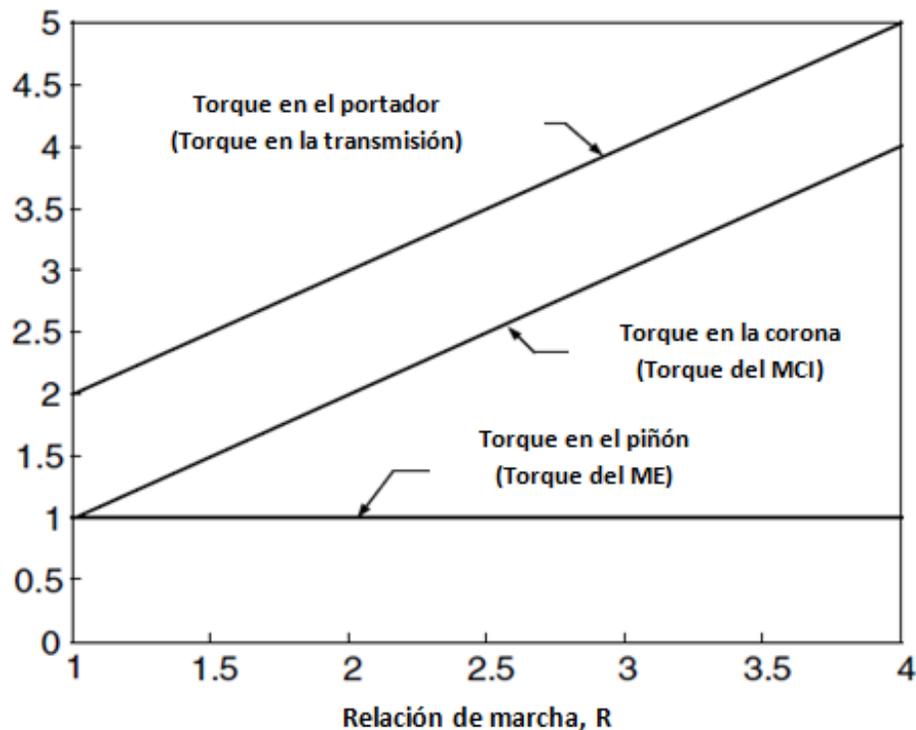


Figura 3.32 El Torque en la corona y en el portasatélites (torque del motor y torque en la transmisión) varía con relación transmisión, R , a un torque dado en el engranaje planeta (torque del motor eléctrico)⁶⁶

Sin embargo, a una velocidad angular del portasatélites dada, proporcional a la velocidad del vehículo, una relación de transmisión más grande, R , dará lugar a una velocidad del motor y del motor eléctrico alta.

⁶⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 292 p.

Modos De Operación Y Control

Según lo sugerido por la configuración de los trenes de tracción, hay dos modos distintos de funcionamiento básico: La suma de velocidad y la suma de torques entre el motor y la caja de cambios, dependiendo del acople o desacople de los embragues y los seguros:

Suma de Velocidades: Cuando el vehículo está empezando desde velocidad cero, el motor no puede funcionar a velocidad cero y la transmisión sólo tiene una relación de transmisión finita. Por lo tanto, debe existir un deslizamiento entre el eje de entrada y el eje de salida de la transmisión. El deslizamiento ocurre generalmente en el embrague para una transmisión manual o en un convertidor de par hidrodinámico para una transmisión automática. Por lo tanto, una cierta cantidad de energía se pierde en este deslizamiento. Sin embargo, en el caso del tren de tracción mostrado anteriormente, este deslizamiento se lleva a cabo entre el motor y el motor eléctrico (corona dentada y engranaje planeta). En este caso, el embrague 1 conecta el eje del motor a la corona dentada, y el embrague 2 libera al engranaje planeta de la corona, y los seguros 1 y 2 liberaran al engranaje planeta (de motor eléctrico) y a la corona (motor) del chasis del vehículo.

En un motor y a una velocidad del portasatélites dada, proporcional a la velocidad del vehículo, la velocidad del motor es:

$$\omega_s = (1 + R)\omega_c - R\omega_r. \quad (3.50)$$

Cuando el primer término del lado derecho de la ecuación es menor que el segundo término, es decir, a baja velocidad del vehículo, la velocidad del motor es negativa. Sin embargo, se sabe que el par del motor debe ser positivo. Así, la potencia del motor es negativa, es decir, que actúe como un generador, y se puede expresar como:

$$P_m = T_s\omega_s = T_c\omega_c - T_r\omega_r = P_t - P_e \quad (3.51)$$

Donde P_m es la potencia del motor, P_t es la potencia de transmisión, y P_e es la potencia del motor. Cuando aumenta la velocidad del vehículo en el valor en el que el primer

término del lado derecho de la ecuación es igual al segundo término y cuando la velocidad del engranaje planeta ω_s se convierte en cero, la potencia del motor eléctrico se convierte en cero. Esta velocidad se define como la velocidad de sincronismo, que depende de la velocidad del motor. Con un nuevo aumento de velocidad del vehículo, ω_s pasa a ser positivo y el motor eléctrico entra en funcionamiento.

En el modo de operación de suma de velocidades, la velocidad del motor se desvincula de la velocidad del vehículo y la velocidad del motor puede ser controlado por el torque del motor eléctrico y la aceleración del motor eléctrico. Se sabe que el torque del motor es proporcional al torque del motor eléctrico, según:

$$T_r = RT_s \quad (3.52)$$

La velocidad del motor está en función de su torque y el ángulo del acelerador. Por lo tanto, la velocidad del motor eléctrico puede ser controlada por el torque del motor eléctrico y aceleración del motor, como se muestra en la figura 3.33.

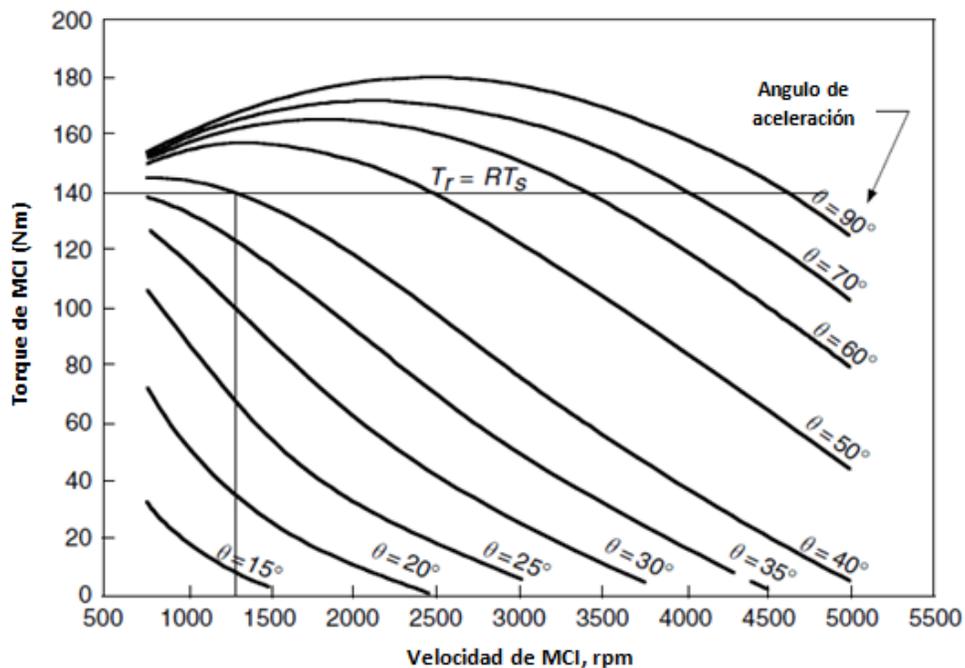


Figura 3.33 Velocidad de Motor controlado por el torque del motor eléctrico y la aceleración del motor⁶⁷

⁶⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 293 p.

A un torque motor eléctrico dado, la velocidad del motor se puede cambiar al cambiar el ángulo del acelerador del motor. A un ángulo del acelerador dado, la velocidad del motor puede ser cambiada al cambiar el torque del motor eléctrico.

Acople de torques: Cuando el embrague 1 ha sido acoplado y el seguro 2 libera el engranaje corona, el engranaje planeta (motor eléctrico) y la corona (motor) se traban y las velocidades de los engranajes se ven obligados a ser los mismos. Se observa que la velocidad del portasatélites es también igual a la velocidad del planeta y de la corona, y el giro de los satélites alrededor de su eje se detiene. En este caso, el torque del portasatélites es la suma de los torques del planeta y la corona, es decir:

$$T_c = T_s + T_r \quad (3.53)$$

El tren de tracción funciona con un patrón de suma de torques.

Modo de tracción únicamente por motor: El modo de tracción únicamente por motor puede realizarse tanto con el patrón de funcionamiento de suma de velocidades y de suma de torques. En el modo de operación de suma de velocidades, el seguro 1 bloquea el motor eléctrico, con lo que al engranaje planeta, al chasis del vehículo, y el embrague 2 libera el engranaje planeta de la corona. De las ecuaciones 3.48 y 3.49, la velocidad y torque del portasatélites y se pueden expresar como:

$$\omega_c = \frac{R}{1+R} \omega_r \quad (3.54)$$

$$T_c = \frac{1+R}{R} T_r \quad (3.55)$$

Las ecuaciones 3.54 y 3.55 indican que existe una relación de transmisión de $(1+R) / R$ entre la corona (motor) y el portasatélites. Esta relación de transmisión es mayor que 1.

En modo de operación de suma de torques, el modo de tracción únicamente por motor puede ser realizado por desconectar el motor eléctrico. En este caso, la velocidad y el

torque del portasatélites son iguales a la velocidad y el torque del motor. La relación de transmisión es igual a 1.

Se sabe de la discusión anterior que la unidad de engranajes planetario funciona como la transmisión de dos engranajes. El modo de operación de suma de velocidad tiene una marcha baja (relación de transmisión, $R / (1+R)$) y el modo de operación de suma de torques una marcha alta (relación de transmisión 1).

Frenos regenerativos: Durante el frenado, el embrague 1 se desactiva y el motor es desacoplado de la corona. El motor puede ser apagado o fijado en ralentí. El motor eléctrico está controlado para funcionar como un generador para producir par negativo. Al igual que en el modo de tracción únicamente por motor, esta operación puede ser realizada por cualquiera de los métodos de operación de suma de velocidades o suma de torques. Durante la operación de suma de velocidades, la corona está fijada al chasis del vehículo mediante el bloqueo 2, y el engranaje planeta (motor eléctrico) es liberado de la corona por la separación del embrague 2. De las ecuaciones 3.48 y 3.49 sabemos que la velocidad y el torque del motor eléctrico están asociados con la velocidad y el torque del portasatélites por:

$$\omega_c = \frac{\omega_s}{1+R} \quad (3.56)$$

$$T_c = (1+R)T_s. \quad (3.57)$$

Cuando el motor eléctrico está controlado para producir par negativo, el portasatélites obtiene un toque negativo (frenado). Las ecuaciones 3.56 y 3.57 indican que una relación de transmisión, $1+R$, se introduce entre el motor (planetario) y el portasatélites. En el modo de suma de torques, el embrague 2 acopla el engranaje planeta (motor eléctrico) a la corona dentada y el seguro 2 libera el engranaje corona del chasis del vehículo. En este caso, la velocidad y el torque son iguales a la velocidad y el par del portasatélites. La relación de desmultiplicación entre el motor eléctrico (planetario) y el portasatélites es de 1.

Una vez más, la unidad de engranaje planetario funciona como una transmisión de dos engranajes. El modo de suma de velocidades tiene una marcha baja (relación de transmisión, $1 + R$) y modo de suma de torques tiene una marcha alta (relación de transmisión, 1).

Motor de arranque: El motor puede ser arrancado por el motor eléctrico ya sea en modo de suma de velocidades o en modo de suma de torques cuando el vehículo está en punto muerto. En el modo de suma de velocidades, el embrague 1 acopla al eje del motor a la corona; el embrague 2 libera el engranaje planeta (motor eléctrico) de la corona, y los dos seguros 1 y 2 estén desactivados. De las ecuaciones 3.48 y 3.49, la velocidad y el torque se asocian con la velocidad y el torque del motor eléctrico:

$$\omega_r = -\frac{1}{R} \omega_s \quad (3.58)$$

$$T_r = RT_s \quad (3.59)$$

Para arrancar el MCI, el ME debe girar con una velocidad negativa, es decir, en una dirección opuesta. Una vez más, una relación de transmisión, R , se introduce entre el motor (corona) y el motor eléctrico (planeta). Por lo tanto, un pequeño torque del motor eléctrico se requiere para arrancar el motor.

En realidad, se sabe que un par motor positivo siempre resulta en un torque positivo del motor sin importar si el vehículo está en punto muerto o en marcha. Esto implica que el motor puede arrancar incluso cuando el vehículo está en marcha.

En el modo de funcionamiento de suma de torques, el motor se puede iniciar directamente por el motor eléctrico. En este caso, la transmisión (caja de cambios) debe ser fijado en neutro. La velocidad y el torque que obtiene el motor es igual a la velocidad y el torque que el motor eléctrico desarrolla.

Estrategias de control

Cuando la velocidad del vehículo es inferior a la velocidad de sincronismo, el modo de operación de suma de velocidades se utiliza. Como se explicó antes, el motor eléctrico funciona con una velocidad negativa y energía negativa. Parte de la energía del motor se utiliza para cargar las baterías y parte para propulsar el vehículo.

El torque del portasatélites de la unidad de engranaje planetario (torque de propulsión) está determinada por la más pequeña de $(1+R)T_s$ y $((1+R) / R) T_r$, tal como se describió en ecuaciones 3.57 y 3.55.

Cuando la velocidad del vehículo es superior, utiliza el sincronismo del modo de operación de suma de torques. La estrategia de control del tren de tracción es:

1. Cuando la demanda de energía de tracción es mayor que la potencia que el motor puede desarrollar con plena aceleración, el modo de tracción híbrido se utiliza. En este caso, el motor funciona con el acelerador a fondo y un motor eléctrico suministra energía adicional para satisfacer la demanda de energía de tracción.
2. Cuando la demanda de energía de tracción es menor que la potencia que el motor puede desarrollar con acelerador a fondo, el modo de operación del motor y del motor eléctrico están determinados por el SOC de las baterías. En el modo de carga de la batería puede ser determinado por la potencia máxima de la energía eléctrica, o por la potencia máxima del motor y la potencia de tracción demandada.

Selección del sistema

Para la selección del sistema de tracción híbrida más óptima se realizó una matriz de decisión en donde consta puntos de análisis claves de desempeño. Los cuáles van a servir y serán base para la selección del sistema.

		TIPO DE CONFIGURACIÓN					
		SERIE		PARALELO		PSEUDOHÍBRIDO	
No.	Factibilidad Técnica y Operacional	Califi	Consideraciones	Califi	Consideraciones	Califi.	Consideraciones
1	Demanda de Energía	5	Las características operativas del ME son óptimas para movilizar el bus.	5	Las características operativas del ME son óptimas para movilizar el bus, pero en condiciones de mayor demanda de energía el MCI entrega energía extra.	4	El ME tiene características operativas óptimas para movilizar el bus, y en condiciones de mayor demanda de energía será ayudado por el MCI
2	Recuperación de Energía (Freno Regenerativo)	5	El ME puede funcionar como generador para recuperar energía hacia las baterías.	5	El ME puede funcionar como generador para recuperar energía hacia las baterías.	4	El ME puede funcionar como generador para recuperar energía hacia las baterías, pero como éste es pequeño la energía entregada va a ser menor.
3	Operación de componentes con eficiencia óptima	5	Todos los componentes están en continuo trabajo y a sus máximas prestaciones.	4	El MCI en determinadas circunstancias puede funcionar en forma sobredimensionada, por lo que se recomienda usar un MCI más pequeño.	4	El tren de tracción con un motor eléctrico pequeño no puede mejorar significativamente la eficiencia del funcionamiento del motor ya que la mayoría de las veces el motor sigue funcionando en una región de baja carga.

4	Multiconversión de energía	4	La conversión de energía eléctrica a mecánica y viceversa es constante por lo que la eficiencia del sistema puede ser menor.	5	Existe conversión de energía eléctrica en mecánica (ME) pero esta no afecta de sobremanera a la eficiencia del sistema.	5	No existe multiconversión de energía por lo que no afecta a la eficiencia del sistema.
5	Trabajo de sistema Híbrido Eléctrico	5	Tanto el ME como el MCI trabajan constantemente por lo que el sistema es totalmente híbrido.	4	A velocidad constante la tracción depende solo del ME pero en otras condiciones el MCI ayuda a la tracción del bus.	3	El sistema no es completamente híbrido dado que el ME es el encargado de movilizar el bus y condiciones más severas va a ser ayudado por el MCI
6	Consumo de Combustible	5	El MCI trabaja en su régimen más óptimo donde sus prestaciones son las mejores y el consumo de combustible es el mínimo.	5	El MCI trabaja en su régimen más óptimo donde sus prestaciones son las mejores y el consumo de combustible es el mínimo y el ME adiciona torque y velocidad en determinadas circunstancias.	4	El ME ayuda a que el MCI trabaje más cerca de su región más óptima, lo que ayuda a disminuir el consumo de combustible.
7	Motor Diesel	5	Las características de desempeño MCI del bus tradicional son óptimas para utilizarlo en esta configuración.	4	Las características de desempeño MCI del bus tradicional pueden ser mayores de las requeridas para ésta configuración.	5	Las características de desempeño MCI del bus tradicional son óptimas para utilizarlo en esta configuración.
8	Dependencia de MCI con ruedas	5	El MCI es totalmente desacoplado de las ruedas de tracción por lo que la velocidad del bus	4	El MCI está acoplado a las ruedas motrices directamente o en	4	El sistema de transmisión conecta el MCI con las ruedas motrices.

	motrices		no depende de él.		combinación con el ME.		
9	Mantienen el nivel de carga de baterías	5	La unidad de control maneja el desempeño del MCI para que éste cargue las baterías.	5	La unidad de control maneja el desempeño del MCI para que éste cargue las baterías.	5	La unidad de control maneja el desempeño del MCI para que éste cargue las baterías.
10	Control del sistema	5	Dado que la tracción del bus depende sólo del ME la estrategia de control es mucho más simple.	3	Dependiendo de la condiciones de trabajo el ME o el MCI pueden movilizar el bus por lo que la estrategia de control del sistema es más complejo.	3	Dependiendo de la condiciones de trabajo el ME y el MCI pueden movilizar el bus por lo que la estrategia de control del sistema es más complejo.
11	Control de componentes	5	El control del MCI es el mismo que el de un bus tradicional, y el control del ME depende de las condiciones de trabajo.	3	El MCI y el ME se complementan para generar el torque y potencia necesarios en los picos de carga, por lo que el control de estos componentes es clave.	4	El MCI y el ME se complementan para generar el torque y potencia necesarios en los picos de carga, por lo que el control de estos componentes es clave.
12	Peso del sistema	5	El MCI por estar desacoplado de las ruedas motrices no necesita sistema de transmisión, embrague y como él ME va acoplado directamente al diferencial no es necesario el eje de transmisión.	3	Todos los componentes del sistema convencional son necesarios y además, hay que añadir los elementos constitutivos del sistema híbrido eléctrico.	3	Todos los componentes del sistema convencional son necesarios y además, hay que añadir los elementos constitutivos del sistema híbrido eléctrico.
13	Tipo de transmisión	5	Las características de torque y velocidad de un ME son mejores que la de	3	Además, de la transmisión multimarchas es necesario una unidad multiplicadora	3	Además, de la transmisión multimarchas es necesario una unidad multiplicadora de

			un MCI por lo que una transmisión de engranes simple es la ideal.		de engranes planetarios, lo cual es más compleja y costosa		engranes planetarios, lo cual es más compleja y costosa
14	Desempeño del sistema con paradas frecuentes STOP AND GO	5	El ME alcanza sus máximas prestaciones a bajas velocidades por lo que el consumo de energía es mínimo.	5	El ME es el encargado de movilizar el bus a bajas velocidades.	5	El ME es el encargado de movilizar el bus a bajas velocidades.
15	Desempeño de MCI	5	El MCI trabaja en su régimen de operación más óptima y en determinadas circunstancias de trabajo puede trabajar en Ralentí.	4	El MCI puede estar sobredimensionado para trabajar en esta configuración.	4	El MCI puede estar sobredimensionado para trabajar en esta configuración.
16	Desempeño de ME	5	Él ME trabaja constantemente pero sus características de desempeño son mejores que la de un MCI	5	Él ME trabaja constantemente pero sus características de desempeño son mejores que la de un MCI	5	Él ME trabaja constantemente pero sus características de desempeño son mejores que la de un MCI
	TOTAL	79		67		65	

De los resultados obtenidos en la Matriz de Decisión se observa que la configuración más adecuada para la realización de este proyecto es la del tren de tracción Híbrido Eléctrico en Serie.

3.2.2. Análisis de elementos y partes de los sistemas

3.2.2.1. Bus tradicional

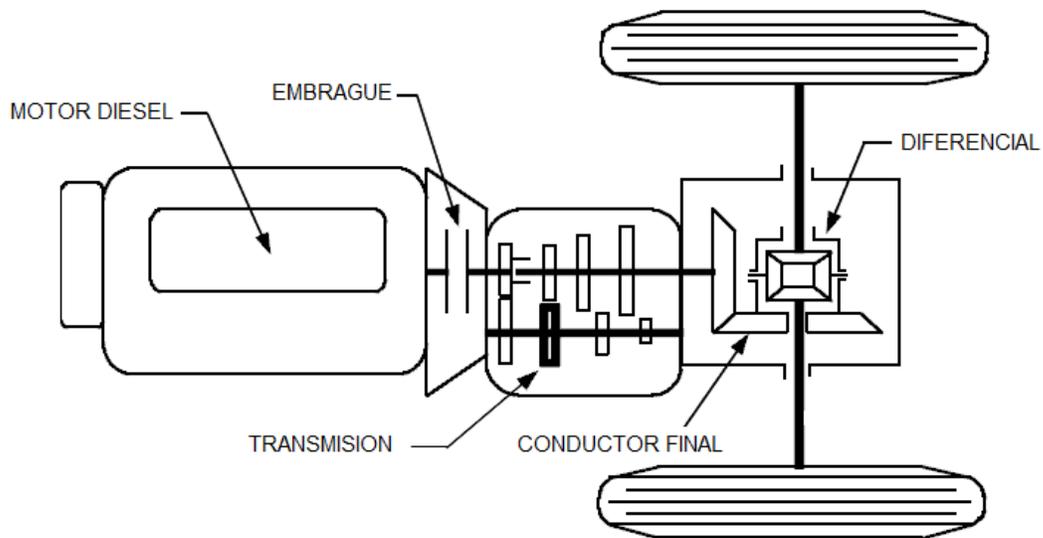


Figura 3.34 Esquema de partes principales del Tren de Tracción⁶⁸

Se toma como referencia para objeto de estudio un modelo representativo del transporte urbano: Volkswagen 17.210 OD

⁶⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 32 p.

**MODELO
VW 17.210 OD**



Figura 3.35 Chasis de bus VW 17.210 OD⁶⁹

Motor

Fabricante	MWM
Modelo	6.10 TCA
Ciclo de Funcionamiento	Diesel
Numero de Cilindros	6
Disposición de cilindros	línea
Relación de compresión	17:1
Potencia Máxima	
(cv/rpm)	206@2600
(kw/rpm)	151@2600
Torque Máximo	
(kgfm/rpm)	67@1700
(Nm/rpm)	657@1700
Aspiración	Turbo Pós-refrigerado
Numero de válvulas	12
Velocidad máxima (rpm)	3100
Observaciones:	Cumple con normas EURO II

Tabla 3.7 Especificaciones de Motor VW 17.210 OD

⁶⁹ Manual de funcionamiento VOLKBUS. 95 p.

Sistema de Lubricación

Tipo	Circulación forzada
Bomba de aceite	Lobular
Filtro de aceite	De flujo total e intercambiador de calor
Presión de aceite	
Marcha lenta (bar/psig)	1,0/15
Rotación Máxima (bar/psig)	5,5/80

Tabla 3.8 Sistema de Lubricación de Motor VW 17.210 OD

Sistema de refrigeración

Tipo	Circulación forzada
Bomba de agua	Centrifuga
Control de Temperatura	Válvula Termostática
Presión máxima del sistema (kpa/psig)	62/9
Radiador	Tubos verticales

Tabla 3.9 Sistema de Refrigeración de Motor VW 17.210 OD

Transmisión

Embrague

Fabricante	LUK
Modelo	14 _{1/2} carcasa fundida
Tipo	Monodisco con revestimiento
Diámetro (mm/pol)	365/14,37
Material de Revestimiento	VALEO F-808MCC
Accionamiento	Hidráulico ajustable asistido por aire comprimido

Tabla 3.10 Embrague de bus VW 17.210 OD

Caja de Transmisión

Fabricante	EATON
Modelo	FS 5106 A
Número de marchas	6 +reversa
Relaciones	6
1 _a	9,01:1
2 _a	5,27:1
3 _a	3,22:1
4 _a	2,04:1
5 _a	1,36:1
6 _a	1,00:1
Marchas sincronizadas	todas

Tabla 3.11 Caja de transmisión de bus VW 17.210 OD

Árboles de Transmisión

Fabricante	DANA
Modelo	SPICER
Número de Árboles	3
Serie "ESPICER"	SPL-90
Tipo de fijación de las crucetas	Bearing Strap en la caja, ejes y anillos Seeger en los árboles
Diámetro tubos (mm)	101,6
Espesor de tubo (mm)	3,4
Acabado del entallado	Glidecote (nylon azul)
Crucetas	SPL-90-1X

Tabla 3.12 Árboles de Transmisión de bus VW 17.210 OD

Eje Trasero

Fabricante	MERITOR
Modelo	RS 23-155
Tipo	Fluctuante con una carcasa de engranes fijada por pernos
N° de velocidades/ N° de reducciones	1 velocidad/1 reducción
Relación de reducción básica	5,86:1 Urbano
Capacidad de carga (kgf)	10.800
Estructura	Estampada en chapa de acero y soldada

Tabla 3.13 Eje Trasero de bus VW 17.210 OD

Dirección

Fabricante	ZF
Modelo	ZF 8097
Tipo	Hidráulica
Relación de reducción	20,1 a 23,8:1
Diámetro del volante (mm)	460
Número de vueltas	5
Columna de dirección	Fija
Bomba Hidráulica:	Glidecote (nylon azul)
Fabricante	ZF
Modelo	7674 (hierro fundido)
Tipo	De engranes

Tabla 3.14 Dirección de bus VW 17.210 OD

Eje delantero

Fabricante	SIFCO - MERITOR
Modelo	13K - 844
Tipo	Viga tipo "I" ELLIOT REVERSO de acero forjado
Capacidad de carga (kgf)	6.000

Tabla 3.15 Eje delantero de bus VW 17.210 OD

Frenos

Freno de servicio:	
Fabricante	MASTER con válvulas WABCO y KNORR
Tipo	Aire comprimido de doble circuito independiente
Frenos delanteros:	
Tipo	Tambor con accionamiento por "S came"
Diámetro (mm/pul)	381/15
Ancho (mm/pul)	219/8 ^{5/8}
Palanca (pul)	6
Cámara "combinada" (pul ²)	24/30 tipo diafragma
Ajuste	Automático
Frenos traseros:	
Tipo	Tambor con accionamiento por "S came"
Diámetro (mm/pul)	381/15
Ancho (mm/pul)	178/7
Palanca (pul)	6
Cámara (pul ²)	24
Ajuste	Automático
Área de frenado (cm ²)	4.232
Freno de estacionamiento:	
Tipo	Cámara
Accionamiento	manual
Freno de motor:	
Tipo	Mariposa intercalada en el tubo de escape
Accionamiento	Electroneumático

Tabla 3.16 Sistema de frenos de bus VW 17.210 OD

Compresor de Aire

Fabricante	KNORR
Modelo	Monocilíndro LK 38 - Regulado
Desplazamiento (cm ³)	225
Accionamiento	Por engranes
Capacidad (l/min@rpm)	180@1.300 (presión de 4bar)
Refrigeración	Circuito de agua de motor
Lubricación	Circuito de aceite de motor

Tabla 3.17 Compresor de aire de bus VW 17.210 OD

3.2.2.2. Bus Híbrido

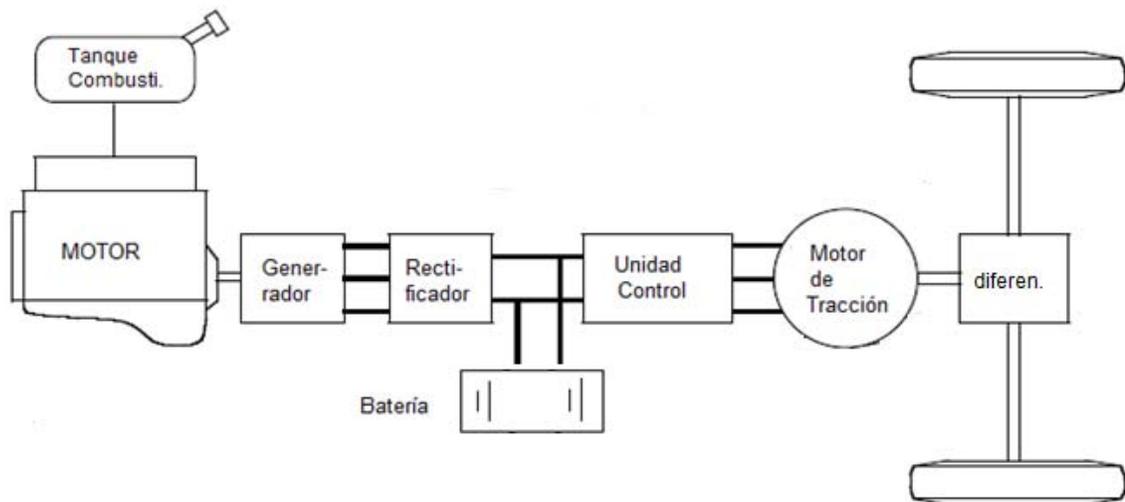


Figura 3.36 Configuración en serie del tren de tracción Híbrido Eléctrico⁷⁰

Los componentes que se presentan a continuación tienen características generales y necesarias de acuerdo a las exigencias y resultados que se obtuvieron en los cálculos del tren de tracción.

Ver anexo J

⁷⁰ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 122 p.

Motor de Combustión Interna

Ciclo de funcionamiento	Diesel
Numero de cilindros	6 en línea
Potencia Máxima	
(CV/rpm)	206@2600
(kw/rpm)	151@2600
Torque Máximo	
(kgfm/rpm)	67@1700
(Nm/rpm)	657@1700

Tabla 3.18 Motor Diesel de Sistema Híbrido Eléctrico en serie

Motor Eléctrico

Tipo de motor	Síncrono TFM
Tipo de imanes	permanentes
Alimentación (V)	500 AC
Potencia Continua	
(kw)	200
Torque:	
Continuo (Nm)	1800
Refrigeración	agua

Tabla 3.19 Motor Eléctrico de Sistema Híbrido Eléctrico en serie

La tecnología TFM se distingue de imán permanente estándar de máquinas síncronas por su disposición campo magnético, y en particular por la forma en que el flujo transversal se orienta en relación con el colector de configuración de los imanes en el rotor. Las ventajas de la tecnología de TFM radican en su alta densidad de potencia y el bajo peso que permiten una eficiencia de hasta el 95 por ciento. Debido a su baja velocidad, el motor de TFM se puede aplicar en todos los componentes de la unidad estándar.

Generador

Tipo de motor	Síncrono TFM
Tipo de imanes	permanentes
Potencia Continua (Kw)	220
Velocidad Máxima (rpm)	2400
Refrigeración	agua

Tabla 3.20 Generador de Sistema Híbrido Eléctrico en serie

Baterías

Fabricante	Panasonic
Componentes	Níquel e Hidruro Metálico
Voltaje (V)	202 DC
# Módulos	28
# Celdas	168
Potencia (kw)	27

Tabla 3.21 Baterías de Sistema Híbrido Eléctrico en serie

Inversor o Rectificador

Fabricante	Toyota
Tipo	Trifásico

Tabla 3.22 Inversor de Sistema Híbrido Eléctrico en serie

3.2.3. Estudio Comparativo

3.2.3.1. Partes y elementos comunes, modificables y descartables

ELEMENTOS	COMUNES	MODIFICABLES	DESCARTABLES
<u>BUS TRADICIONAL</u>			
Motor	√	√	
Sistema de Lubricación	√		
Sistema de Refrigeración	√		
Transmisión			
Embrague			√
Caja de Transmisión			√
Árboles de Transmisión			√
Eje Trasero	√	√	
Dirección	√		
Eje Delantero	√		
Frenos			
De servicio	√		
Delanteros	√		
Traseros	√		
De estacionamiento	√		
De motor			√
Compresor de Aire			√
<u>SISTEMA HIBRIDO</u>			
Motor Eléctrico	√		
Generador	√		
Baterías	√		
Inversor	√		
Unidad de Control	√		

Tabla 3.23 Matriz Comparativa de elementos necesarios en Sistema Híbrido Eléctrico en Serie.

3.3. Factibilidad Económica

3.3.1. Detalle de elementos

3.3.1.1. Comunes

Debido a que el sistema híbrido es la unión de dos sistemas de generación de energía, lo más óptimo sería analizar los costos de los componentes de los dos sistemas, pero este proyecto está enfocado en la modificación de un bus común y corriente existente en nuestro mercado, por lo que los costos de los componentes del bus tradicional no son punto de análisis.

3.3.1.2. Modificables

Los costos de los componentes del tren de tracción del bus híbrido se detallan a continuación:

Elementos	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Motor Eléctrico	1	5000	5000
Generador	1	5000	5000
Baterías	2	2000	4000
Inversor	1	3700	3700
Unidad de Control	1	3000	3000
Otros		1000	1000
		TOTAL	21700

Tabla 3.24 Costo de componentes de Sistema Eléctrico

Estos costos corresponden a información obtenida de varios catálogos de empresas que pueden ofrecer esta clase de productos de acuerdo a las características que se requiere. En algunos casos como las baterías la información fue muy difícil de conseguir dado que existen pocas compañías que las fabrican y porque la tecnología es muy compleja y variada.

CAPITULO 4

EVALUACIÓN Y DESEMPEÑO

4.1. Factibilidad Operacional

Esta factibilidad estudia la probabilidad de que el nuevo sistema funcione según lo esperado y cumpla con los requisitos básicos para tener un desempeño al menos igual al sistema actual.

4.1.1. Parámetros de Funcionamiento Teórico

Los parámetros de funcionamiento son aquellos que marcan el desempeño del motor, es decir, aquellos que condicionan su comportamiento en diferentes situaciones de aplicación.

4.1.1.1. Sistema de Transporte Tradicional

Los parámetros más comunes para el funcionamiento del motor son:

- **Potencia máxima:** La mayor potencia que el motor se le permite desarrollar durante un corto período de funcionamiento.
- **Régimen nominal:** La velocidad de rotación del cigüeñal, en la que la potencia nominal se ha desarrollado.

Para la aplicación del vehículo, el rendimiento del motor es más precisamente definido por:

1. La potencia máxima (o de par máximo), disponible en cada velocidad dentro de un rango de operación útil del motor. ⁴
2. El rango de velocidad y el poder sobre el que el funcionamiento del motor es satisfactoria.

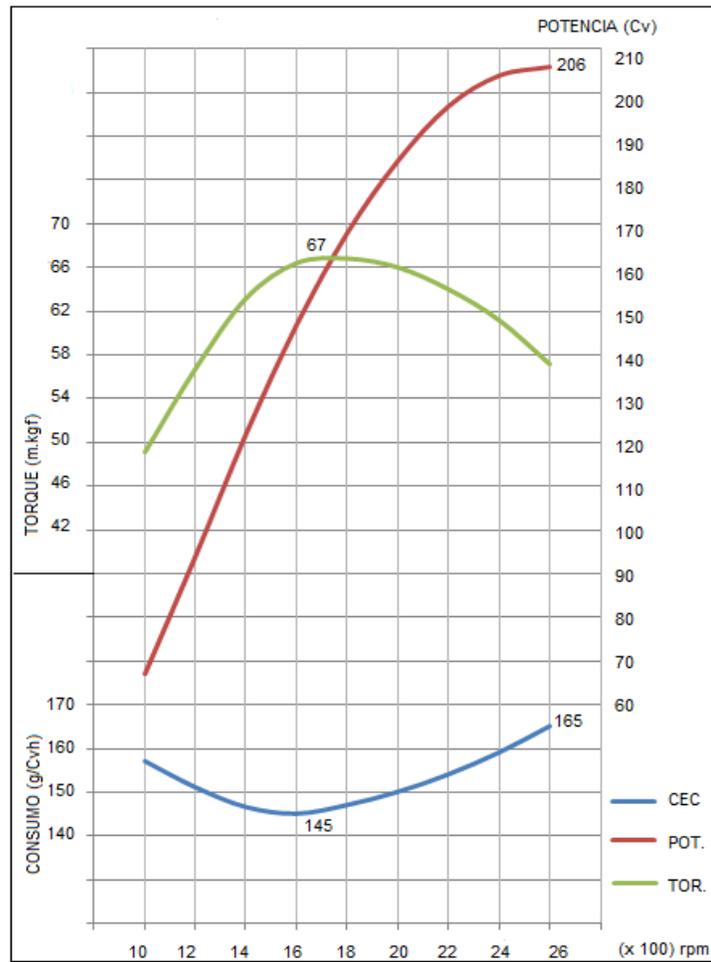


Figura 4.1 Curvas Características de Motor Diesel VW 17.210 OD⁷¹

⁷¹ Manual de Funcionamiento VOLKBUS. 138 p.

Análisis:

El comportamiento del motor de un vehículo depende de muchos parámetros entre los cuales se puede mencionar: modo de conducción, tipo de terreno, geografía del terreno, entre otras pero, para un análisis óptimo se recomienda de sobremanera basarse en las revoluciones del motor.

En base a este análisis y datos proporcionados por el fabricante se obtuvo las tres gráficas más representativas de un motor por lo que se obtienen los siguientes datos:

Parámetros de desempeño	Dato	rpm
Consumo de combustible (gCv/h):		
Máximo	165	2600
Mínimo	145	1600
Torque Máximo (Kgfm)	67	1700
Potencia Máxima (Cv)	206	2600

Tabla 4.1 Parámetros de desempeño de Motor Diesel

Calculo de Consumo de combustible

$P_e := 151$	(kw)	Máxima Potencia generada por el motor
$g_e := 224.18$	(Kg/kwh)	Consumo específico de combustible a máxima potencia
$\gamma_f := 0.82$	(kg/L)	Densidad del diesel

$$Q_s := \frac{P_e \cdot g_e}{1000 \cdot \gamma_f} \quad (4.1)$$

$$Q_s = 41.282 \quad (\text{L/h})$$

Cálculo de consumo de combustible por trayecto diario

$$S := 25000 \quad (\text{m}) \quad \text{Distancia promedio de recorrido de un autobús diario}$$

$$V := 49968 \quad (\text{m/h})$$

$$Q_s := \frac{P_e \cdot g_e \cdot S}{1000 \gamma_f \cdot V} \quad (4.2)$$

$$Q_s = 206.542 \quad (\text{L}) \quad \text{Promedio de consumo al día}$$

4.1.1.2. Sistema de Transporte Híbrido

Motor Diesel

En los trenes de tracción híbridos eléctricos en serie, el motor diesel es mecánicamente desacoplado de las ruedas motrices, debido a que el motor que va a impulsar al vehículo es el motor eléctrico.

La velocidad y el par de torsión (torque) del motor diesel son independientes de la demanda de velocidad y par de tracción del vehículo, es por esta razón que la velocidad y par de torsión, pueden ser controlados en cualquier punto de funcionamiento de la gráfica velocidad – torque. Generalmente, el motor debe ser controlado de tal manera que funcione siempre en su región de operación óptima, donde el consumo de combustible y las emisiones del motor se reducen al mínimo.

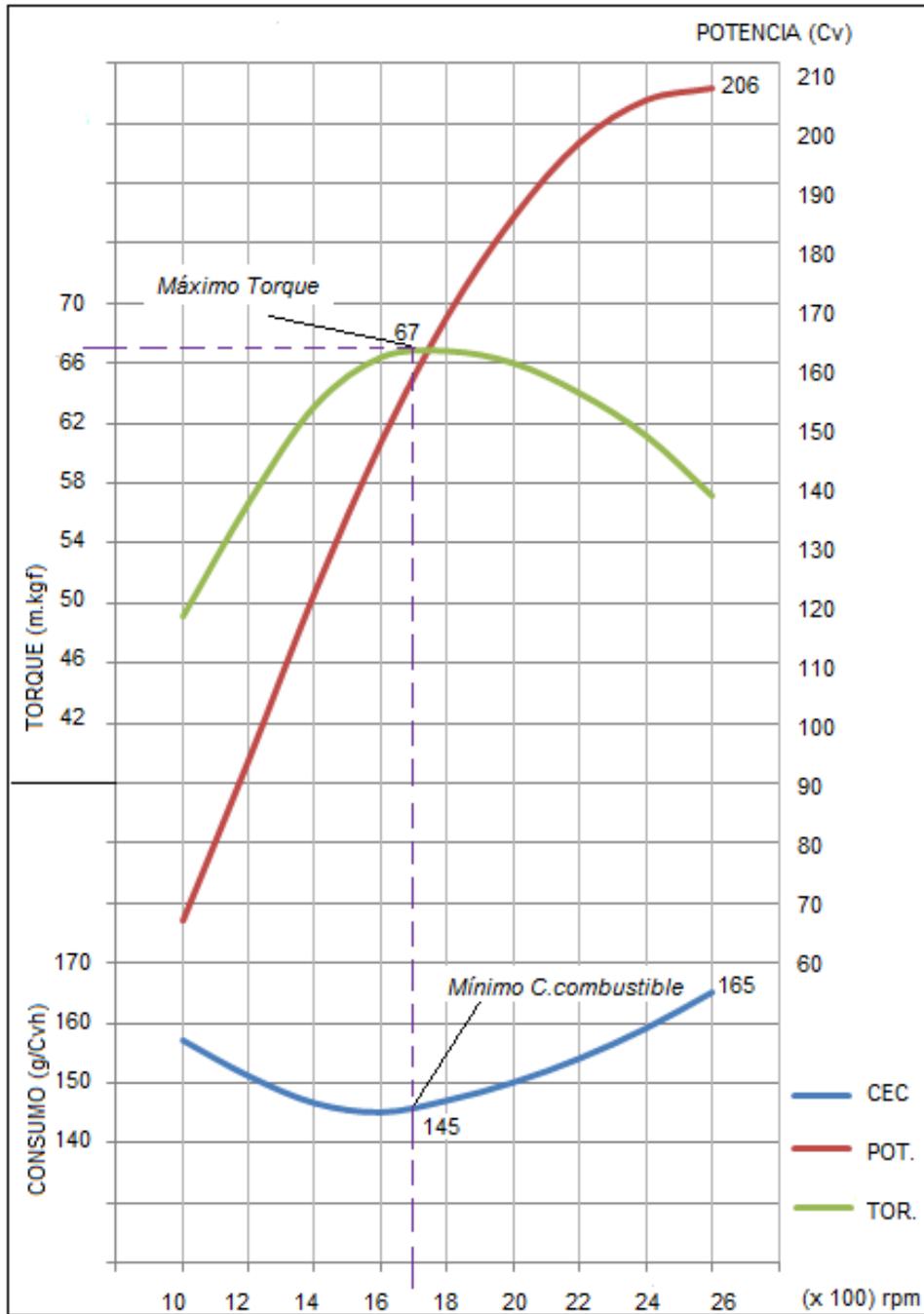


Figura 4.2 Ajuste de RPM de Motor Diesel⁷²

⁷² Manual de Funcionamiento VOLKBUS. 138 p.

Tomando estas consideraciones y analizando la gráfica el Motor Diesel puede trabajar a estas condiciones de operación:

Parámetros de desempeño	Dato	rpm
Consumo de combustible (gCv/h):	146	1700
Torque Máximo (Kgfm)	67	1700
Potencia (Cv)	162	1700

Tabla 4.2 Parámetros de desempeño con ajuste de RPM

Calculo de Consume de combustible

$P_e := 119.76$ (kw) Máxima Potencia generada por el motor

$g_e := 197.01$ (Kg/kwh) Consumo específico de combustible a máxima potencia

$\gamma_f := 0.82$ (kg/L) Densidad del diesel

$$Q_s := \frac{P_e \cdot g_e}{1000 \cdot \gamma_f}$$

$Q_s = 28.773$ (L/h)

Cálculo de consumo de combustible por trayecto diario

$S := 25000$ (m) Distancia promedio de recorrido de un autobús diario

$V := 49968$ (m/h)

$$Q_s := \frac{P_e \cdot g_e \cdot S}{1000 \cdot \gamma_f \cdot V}$$

$Q_s = 143.957$ (L) Promedio de consumo al día

Motor Eléctrico

En el transporte común el consumo de energía se mide haciendo referencia a la cantidad de volumen por unidad de distancia, tales como litros cada 100 km (l/100 km), sin embargo para motores eléctricos alimentados por baterías o generadores la unidad original de consumo de energía en (kwh), medido en los bornes de la batería, es más adecuado.

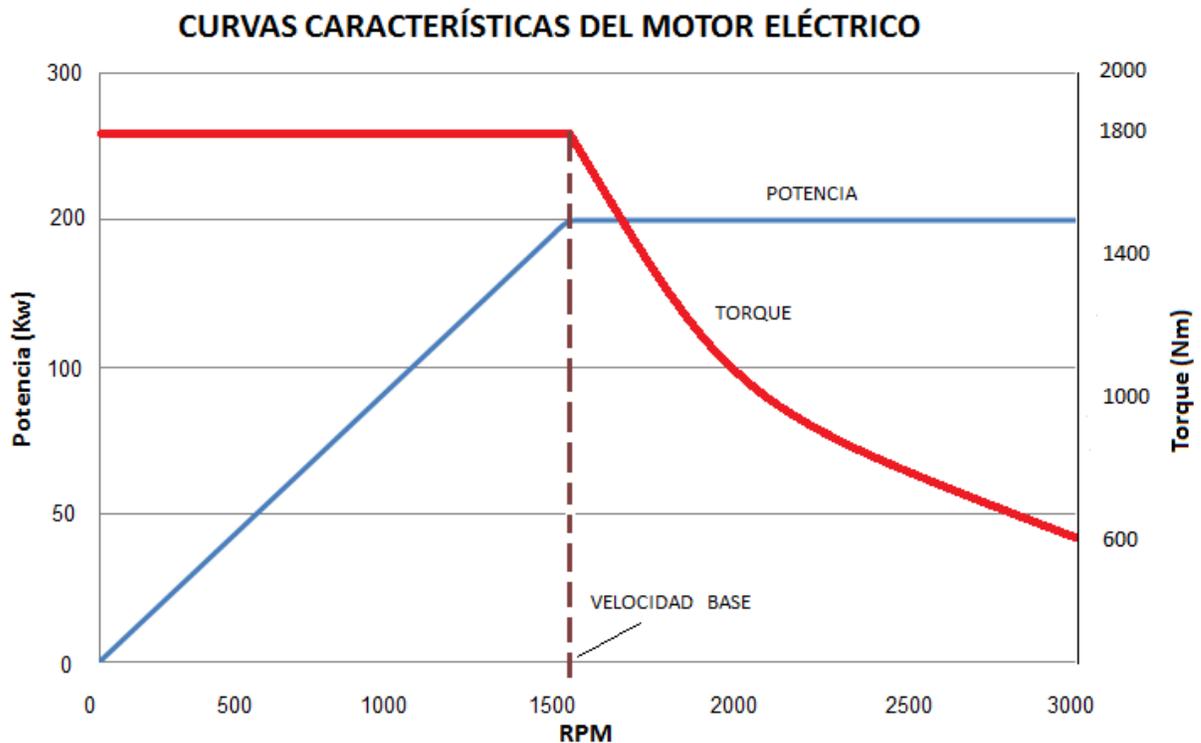


Figura 4.3 Curvas características de Motor Eléctrico Voith ELVO Drive® tipo TFM de imanes permanentes⁷³

⁷³ <http://www.scania.com/media/calendar/2009/scania-at-busworld-2009-pressroom.aspx>

Calculo de consumo de energía del motor eléctrico

$i := d - fr$	Grado Máximo de pendiente
$i = 0.028$	
$fr = 0.01$	Coefficiente de resistencia al rodamiento
$Mv = 16800 \text{ (kg)}$	Masa del autobús
$\rho a = 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Densidad del aire
$Af = 7.5 \text{ (m}^2\text{)}$	Área frontal del autobús
$V := 11.11$	Velocidad máxima permitida 40(km/h) para autobuses
$Cd = 0.7$	Coefficiente de resistencia aerodinámica

$Ntf := 0.9$	Relación combinada entre caja y grupo
$\delta := 1.04 + 0.0025Ntf^2$	Formula 3.16 Libro "Tratado de automóviles"

$\delta = 1.042$ Factor de Masa

$$d := \frac{Ft - Fw}{Mv \cdot g}$$

$d = 0.038$

$fr := 0.01$ Coeficiente de resistencia al rodamiento

$$d := \frac{Ft - Fw}{Mv \cdot g}$$

$d = 0.038$

$$a := \frac{g}{\delta} \cdot (d - fr)$$

$a = 0.267 \text{ (m/s}^2\text{)}$ Aceleración

$nt := 0.975$ Rendimiento entre motor y ruedas

$nm := 0.9$ Eficiencia de motor de transmisión

$$Pb_out := \frac{V}{nt \cdot nm} \cdot \left[Mv \cdot g \cdot (fr + i) + \frac{1}{2} \cdot \rho a \cdot Cd \cdot Af \cdot V^2 + Mv \cdot \delta \cdot a \right]$$

$Pb_out = 143982.014 \text{ (w)}$

Energía que produce el motor eléctrico con Freno Regenerativo

Donde el grado de carretera α o a pueden ser negativo, y α tiene que estar entre los límites ($0 < \alpha < 1$).

《

$$\alpha = 0.698$$

$$Pb_in := \frac{\alpha \cdot V}{nt \cdot nm} \left[Mv \cdot g \cdot (fr - i) + \frac{1}{2} \cdot \rho a \cdot Cd \cdot Af \cdot V^2 - Mv \cdot \delta \cdot a \right]$$

$$Pb_in = -106930.451 \text{ (w)}$$

Calculo de velocidad máxima posible del autobús

$$Nmmax := 2400$$

$$ig := 1$$

Debido que se utiliza una transmisión de engrane simple

$$io := 1$$

$$Vmax := \frac{\pi \cdot Nmmax \cdot rd}{30 \cdot ig \cdot io}$$

$$Vmax = 143.634 \text{ (km/h)}$$

4.1.2. Comparación del Sistema Híbrido con relación al tradicional

Características del Motor de Tracción

Para aplicaciones en vehículos, la característica ideal de un motor de tracción es la salida de potencia constante en un determinado rango de velocidad. En consecuencia, el torque varía con la velocidad hiperbólicamente como se muestra en la figura 4.4

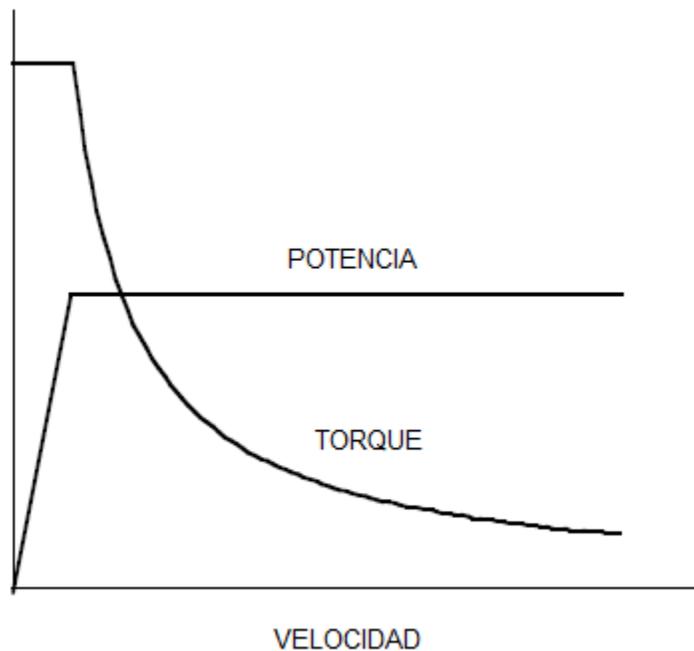


Figura 4.4 Variación de Torque vs. Velocidad⁷⁴

A bajas velocidades, el torque está limitado a ser constante. Esta característica constante de potencia proveerá el vehículo un esfuerzo de tracción de alta a bajas velocidades, donde las demandas de aceleración, de tracción, o de grandes exigencias de escalonamientos son altos.

Dado que el motor de combustión interna y motores eléctricos son los más comúnmente utilizados para la generación de energía para vehículos automotores hasta la fecha, es

⁷⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 34 p.

conveniente la revisión de las características básicas que son esenciales para la fundamentación del rendimiento del vehículo y el diseño de línea de conducción.

Las características básicas de un motor diesel en el acelerador a fondo y un motor eléctrico a plena carga se muestran en la Figura 4.5 y la Figura 4.6 respectivamente.

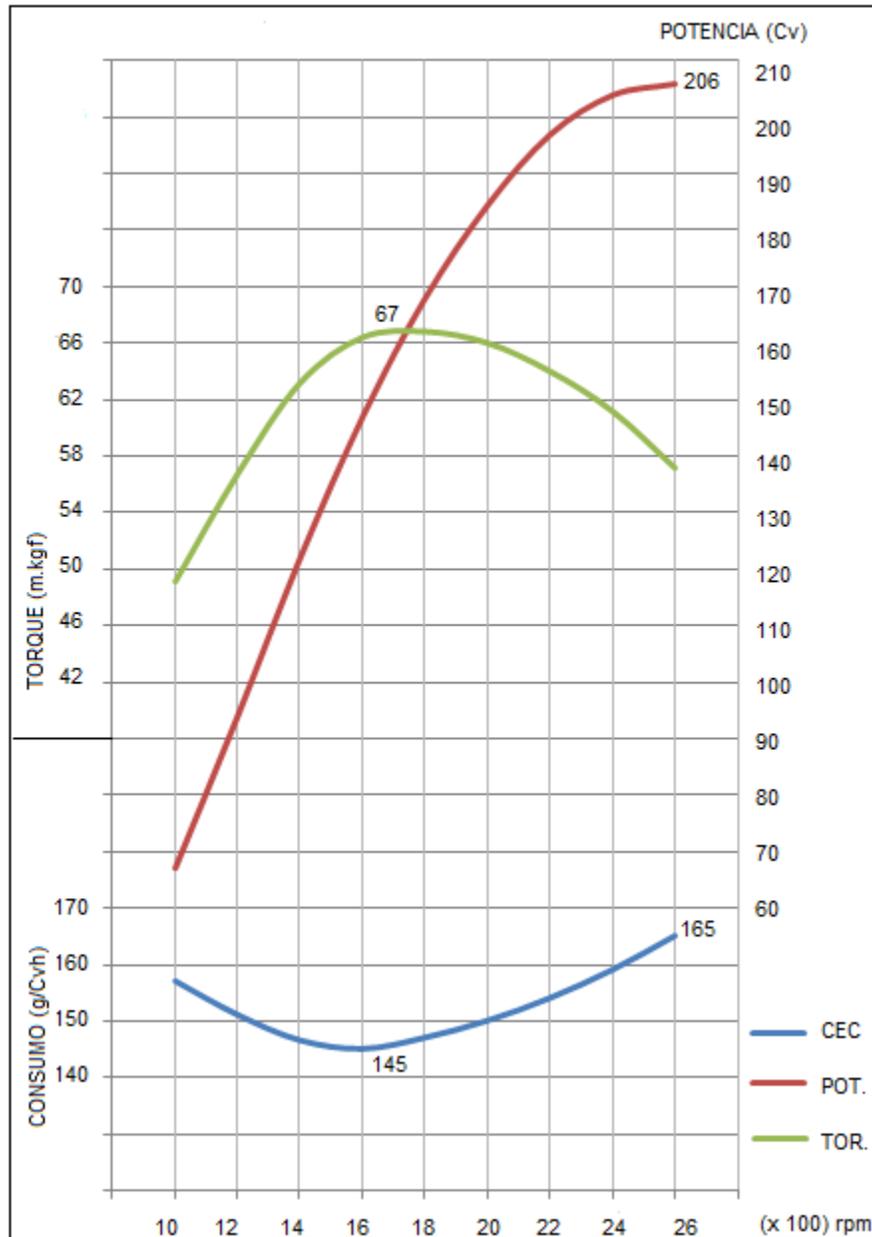


Figura 4.5 Curvas de desempeño de un Motor Diesel⁷⁵

⁷⁵ Manual de Funcionamiento VOLKBUS. 138 p.

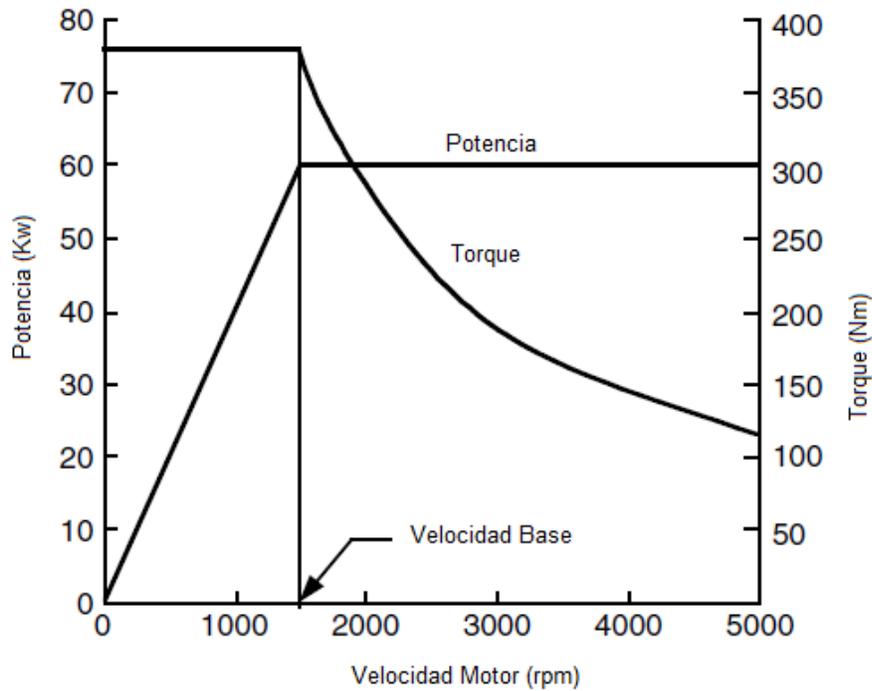


Figura 4.6 Curvas de desempeño de un Motor Eléctrico⁷⁶

El motor de combustión interna por lo general tiene características torque-velocidad muy lejos del rendimiento ideal requerido por la tracción. Se comienza a operar sin problemas a velocidad lenta, buena calidad de la combustión y el torque máximo se obtiene a un régimen de giro intermedia. A medida que la velocidad aumenta aún más, la presión media efectiva disminuye debido a las crecientes pérdidas en la inducción de aire y una disminución en el torque entregado por el motor. Sin embargo, la potencia de salida aumenta a su máximo en una velocidad determinada. Más allá de este punto, el torque que entrega el motor disminuye mucho más rápido con una velocidad cada vez mayor. Esto se traduce en la disminución de la potencia del motor, en las aplicaciones de vehículos, el máximo permitido la velocidad del motor se suele fijar un poco por encima de la velocidad de la potencia máxima de salida, el motor de combustión interna tiene un relativo comportamiento bajo de torque-velocidad (en comparación con el comportamiento ideal), como se muestra en la figura 4.4 por consiguiente, se emplea generalmente una transmisión de varias marchas como se muestra en la figura 4.7

⁷⁶ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 35 p.

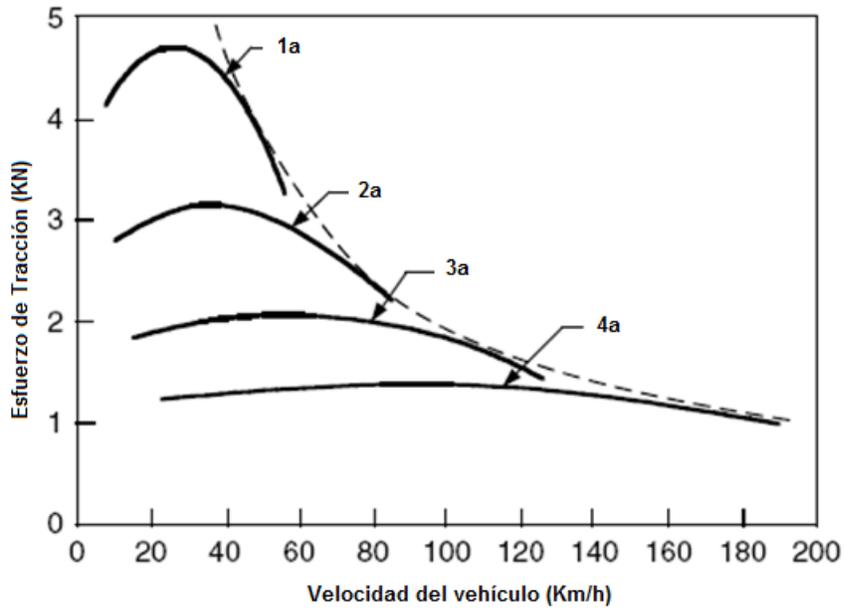


Figura 4.7 Esfuerzo de Tracción vs. Velocidad (transmisión multimarchas)⁷⁷

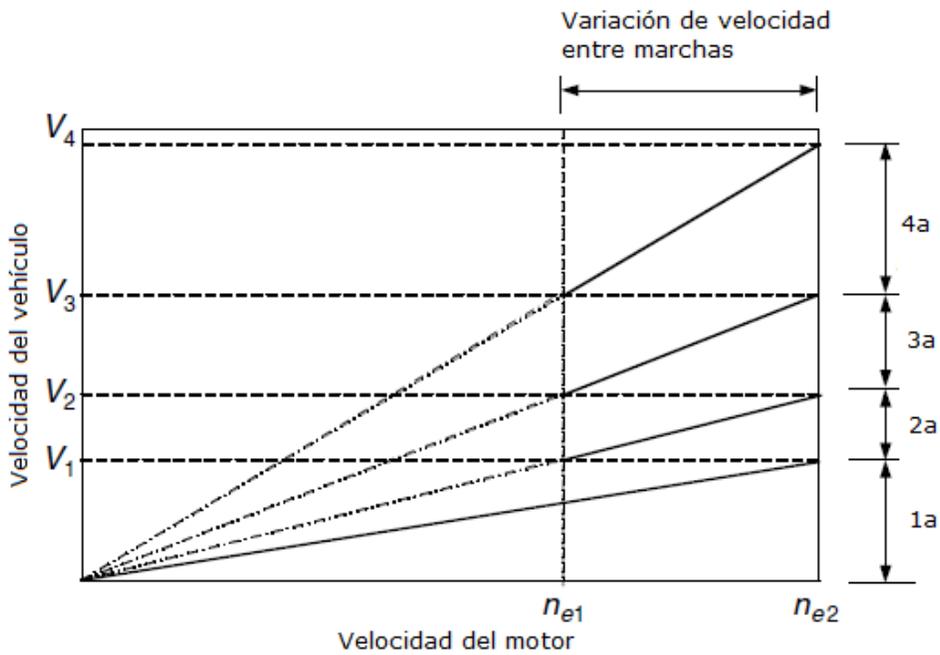


Figura 4.8 Velocidad del vehículo vs Velocidad de giro, entre cambio de marchas⁷⁸

⁷⁷ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 36 p.

⁷⁸ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 38 p.

En los motores eléctricos, sin embargo, suelen tener una característica velocidad-torque que está mucho más cerca del ideal, como se muestra en la figura 4.6, el motor eléctrico parte desde cero en la velocidad. A medida que aumenta la velocidad hasta una base, los aumentos de tensión hasta su valor nominal, mientras que el flujo se mantiene constante. Más allá de la velocidad de base, la tensión permanece constante y el flujo se debilita. Esto se traduce en una constante potencia de salida, mientras que el torque disminuye hiperbólicamente con el aumento de la velocidad. El comportamiento velocidad torque de un motor eléctrico está cerca del ideal, una transmisión simple o de doble engrane se emplea generalmente, como se muestra en la figura 4.9

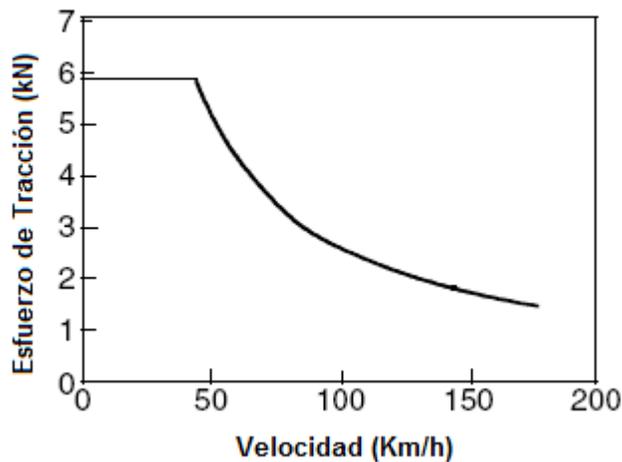


Figura 4.9 Esfuerzo de Tracción con transmisión simple⁷⁹

4.1.2.1. Ventajas

- Reducción de un 25 a 30 por ciento en el consumo de combustible, consecuencia de esto las emisiones contaminantes son inferiores.
- Con el motor eléctrico la aceleración es suave y continua.

⁷⁹ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 36 p.

- El Motor de Combustión Interna trabaja en el punto más óptimo donde su torque es el máximo y su consumo es el menor.
- La aceleración depende únicamente de la potencia que genera el motor eléctrico por eso es irrelevante la potencia suministrada por el motor diesel.
- La potencia óptima de funcionamiento de un motor eléctrico se obtiene a lo largo de una velocidad constante de giro del motor, por lo que un engranaje fijo puede sustituir la caja de cambios de varias velocidades y reducir la necesidad de un embrague. Esta configuración no sólo reduce el tamaño y el peso de la transmisión mecánica, sino también el control del tren de tracción debido a que el cambio entre marchas ya no es necesario.

4.1.2.2. Desventajas

- El desempeño puede ser menor debido a la constante conversión de energía mecánica a eléctrica y viceversa.
- La adición de varios elementos incrementa el peso del sistema y esto puede disminuir el desempeño del mismo.
- Para mantener el MCI trabajando en su región óptima es necesario controlar la dosificación de combustible mediante un acelerador electrónico, esto puede modificar el control del sistema.

CAPITULO 5

MANTENIMIENTO

5.1 Mantenimiento de Bus Urbano

Para el análisis del mantenimiento del transporte urbano, se toma en consideración las características de funcionamiento general de un bus de transporte de pasajeros. Basándose en manuales de usuario y datos de talleres se presenta una guía de mantenimiento básica para buses.

Las principales condiciones de operación en las que se analizará este medio de transporte son el número de kilómetros recorridos en un determinado período de tiempo, este período puede ser considerado como: jornada laboral (diario), semanal, mensual, anual.

Por lo que se presenta una Tabla 5.1 generalizada de kilómetros recorridos por un bus urbano.

BUS URBANO			
	RECORRIDO Km		FRECUENCIA LABORAL
DIARIO	200	Horas/día	10
SEMANAL	1200	Días/semana	6
MENSUAL	5600	Días/mes	28
ANUAL	67200	Meses/año	12

Tabla 5.1 No. de Km y frecuencia laboral de un bus urbano

A continuación se presenta una tabla con las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de acuerdo al kilometraje recorrido por la unidad.

Ver Anexo A

La tabla (Anexo A) presenta el mantenimiento preventivo y correctivo recomendado por los fabricantes para los 300km que según los datos recogidos de jornadas de trabajo de un bus urbano equivale para los 5 primeros años de trabajo.

Costos de Mantenimiento

A continuación se presenta un costo estimado de mano de obra y repuestos en cada uno de los ítems de mantenimiento.

Ver Anexo B y C

5.2 Mantenimiento de Bus Híbrido

Un vehículo híbrido es la unión de dos sistemas de generación de energía, pero aprovechando las mejores prestaciones de los mismos, dado que en el caso de un Sistema Híbrido en serie tanto el Motor de Combustión Interna como el Motor de Tracción (Eléctrico), van a estar en continuo trabajo, pero el mantenimiento de un motor eléctrico es mucho más sencillo; por otro lado, el mantenimiento se lo realiza en forma periódica y no en base al kilometraje.

En un mantenimiento de motores eléctricos, se debe inspeccionar periódicamente niveles de aislamiento, bobinas, soportes, desgaste y lubricación de los rodamientos, vida útil de los soportes, niveles de vibraciones, desgastes de escobas y anillas colectoras (generador).

Tabla de mantenimiento general de motores eléctricos

Ver anexo D

En base a esta tabla (Anexo D) se presenta un cuadro de mantenimiento para el bus híbrido con las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo de acuerdo al kilometraje recorrido por la unidad.

Ver anexo E

Según talleres especializados en vehículos híbridos (en otros países), han coincidido en que el mantenimiento de este tipo de coches será un poco más barato que el de un coche convencional, y se debe en gran parte gracias a que el motor eléctrico necesitará sólo una pequeña revisión cuando se haya usado cada 5.000 horas, que viene a ser un equivalente a unos 50.000 km.

Tabla de costos en dólares para el mantenimiento de un bus híbrido para intervalos determinados de kilometraje

Ver anexo F

En la figura 5.1 se puede observar una ligera disminución en los costos de mantenimiento debido a que el motor de combustión interna al funcionar en un régimen constante todos sus elementos alargan su vida útil aproximadamente en un 30 por ciento.

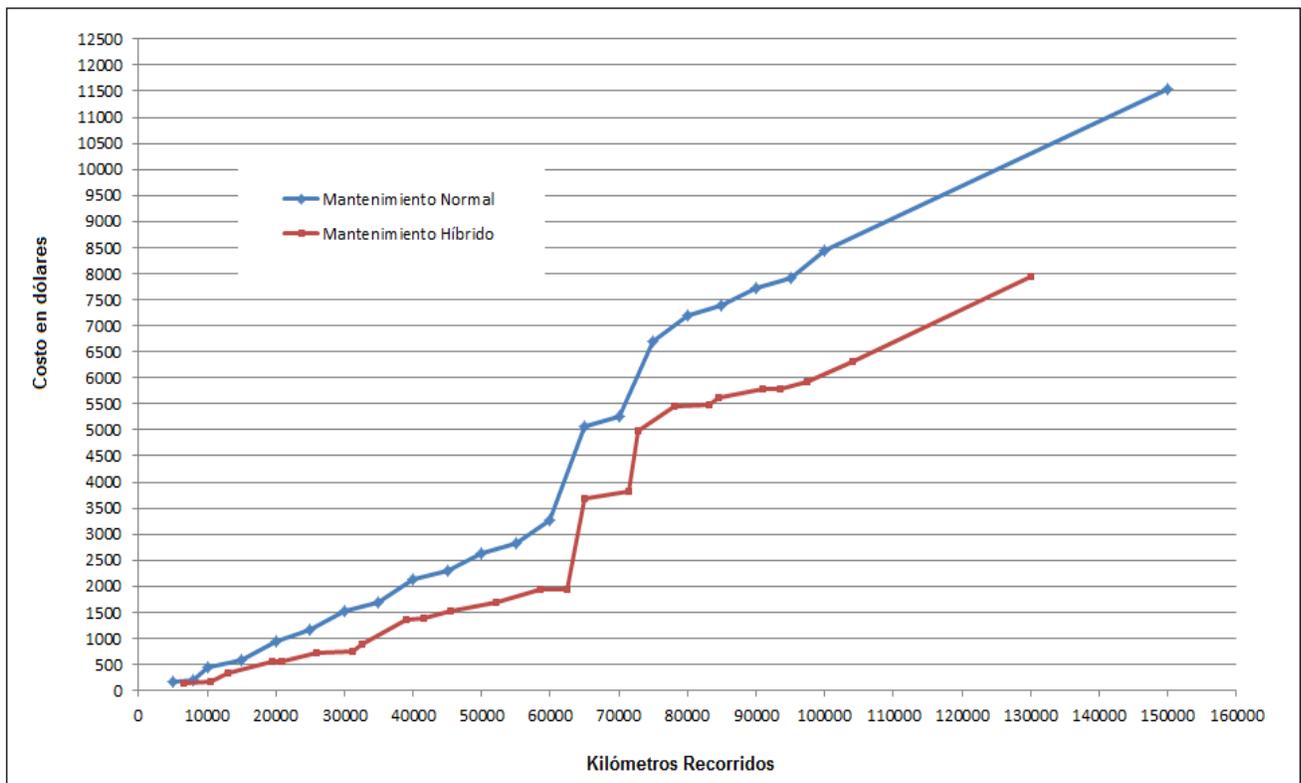


Figura 5.1 Gráfica comparativa de Mantenimiento Convencional vs. Mantenimiento Bus Híbrido

CAPÍTULO 6

IMPACTO AMBIENTAL

6.1. Agentes Contaminantes

6.1.1. Gases de Escape

A continuación se presenta un resumen sobre los efectos que los contaminantes comunes del aire tienen sobre la salud humana, especialmente la de aquellas personas más sensibles como son los niños pequeños, los ancianos y los que padecen afecciones respiratorias o cardiovasculares crónicas.

El material particulado

El término “material particulado” (PM, del inglés particulate matter) incluye tanto partículas sólidas como gotas de líquido que se encuentran en el aire. Múltiples actividades humanas y fuentes naturales, emiten PM directamente o emiten otros contaminantes que reaccionan en la atmósfera para formar PM. Estas partículas sólidas o líquidas se manifiestan en un amplio rango de tamaños, pero desde el punto de vista de la salud las que mayor interés tienen son las partículas con diámetros menores a 10 micras.

(PM10) que son las que pueden ser inhaladas y se acumulan dentro del sistema respiratorio; dentro de ellas, especial atención demandan las partículas menores a 2.5 micras de diámetro (PM2.5), generalmente referidas como “finas”.

Las fuentes de partículas finas, algunas de las cuales son tan pequeñas que se denominan nanopartículas, incluyen todo tipo de combustión (vehículos, generadores, quema

de madera, etc.), así como algunos procesos industriales. Por su parte las partículas de entre 2.5 y 10 micrómetros de diámetro (referidas en algunos textos como “gruesas”) tienen su origen en las operaciones de pulido o de tratamiento de materiales y en el polvo que se levanta en las vías, especialmente las no pavimentadas.

En términos generales tanto las partículas finas como las gruesas pueden acumularse en el sistema respiratorio y están asociadas con numerosos efectos negativos en la salud. Las partículas gruesas pueden agravar condiciones respiratorias como el asma, mientras que la exposición a material fino está asociada con varios efectos graves, incluyendo la muerte. La Organización Mundial de la Salud ha insistido en que para este tipo de contaminantes no existe un valor bajo el cual es inofensivo para la salud humana y más bien la gravedad de los daños está relacionada con los tiempos de exposición que pueden ir desde un día hasta períodos mucho mayores. Algunos otros detalles sobre estos efectos se enuncian a continuación:

- Las personas que presentan enfermedades de los pulmones o el corazón, tales como asma, obstrucción pulmonar crónica, congestiones cardíacas o similares, expuestas a material particulado tienen un riesgo incremental de muerte prematura o de agravamiento de sus cuadros clínicos.
- Las personas de edad avanzada también son sensibles a la exposición a material particulado. Igual que en el caso anterior, pueden presentar agravamiento de condiciones pulmonares o cardíacas preexistentes o a desarrollar este tipo de dolencias.
- Los niños o las personas con enfermedades pulmonares expuestas a PM pueden ver disminuida su capacidad de respirar profunda y vigorosamente y pueden experimentar síntomas como tos o agitación.
- El material particulado puede incrementar la susceptibilidad a las infecciones respiratorias y puede agravar enfermedades respiratorias existentes, tales como asma y bronquitis crónica, provocando mayores cuidados médicos.

El monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) es un gas inodoro e incoloro. Se forma cuando el carbono de los combustibles no se quema completamente, lo cual ocurre preferentemente en los motores de los vehículos. Otras fuentes incluyen la combustión de combustibles fósiles en procesos industriales y también fuentes naturales como los incendios forestales. Las concentraciones de CO son generalmente mayores durante los climas fríos ya que las bajas temperaturas provocan que el proceso de combustión sea menos completo.

El monóxido de carbono ingresa al torrente sanguíneo a través de los pulmones y se combina rápidamente con la hemoglobina, de manera incluso más efectiva que el oxígeno, deprimiendo el abastecimiento de éste último a las células y, consecuentemente a los tejidos y órganos del cuerpo humano. Concentraciones altas de CO pueden ocasionar dolores de cabeza y mareos, hasta el extremo de pérdidas de conocimiento e incluso la muerte.

Los efectos más comunes causados por el CO son los siguientes:

- Las personas con enfermedades cardiovasculares, tales como angina, son las más sensibles a los efectos del CO. Estos individuos pueden experimentar dolores de pecho y otros síntomas cardiovasculares, especialmente si se están ejercitando.
- Las personas con afectaciones que comprometen a los sistemas cardiovascular y respiratorio (por ejemplo, fallas congestivas del corazón, enfermedades cerebrovasculares, anemia, obstrucción crónica del pulmón) y las mujeres embarazadas, los bebés en gestación y recién nacidos, pueden también experimentar altos riesgos debido a la contaminación por CO.
- Los individuos sanos expuestos a altos niveles de monóxido de carbono pueden ver afectadas la alerta mental y la visión.

El dióxido de azufre

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro y reactivo que se produce durante la quema de combustibles que contienen azufre, tales como carbón y ciertos derivados de

petróleo, fundición de metales y por otros procesos industriales. Las principales fuentes incluyen las plantas de generación termoeléctrica, así como los calentadores industriales. Generalmente, las mayores concentraciones de SO₂ se encuentran cerca de las zonas industriales.

Los principales efectos sobre la salud que resultan de la exposición al SO₂ son los siguientes:

- Los niños y adultos con asma que realizan actividades físicas al aire libre son los más vulnerables a los efectos nocivos del dióxido de azufre. El efecto primario que experimentan, incluso con exposiciones cortas, es el estrechamiento de las vías respiratorias (bronco constricción), lo cual puede causar síntomas tales como opresión del pecho y dificultad para respirar. Estos síntomas se vuelven más graves conforme aumentan las concentraciones del SO₂ y/o la frecuencia respiratoria.

Cuando la exposición cesa, la función pulmonar generalmente recobra su normalidad dentro de una hora.

- A niveles muy altos, el dióxido de azufre puede causar los mismos síntomas anteriormente descritos incluso para gente que no sufre de asma.

- Exposiciones de largo plazo a dióxido de azufre y material particulado fino pueden causar enfermedades respiratorias, alterar los mecanismos pulmonares de defensa y agravar enfermedades cardiovasculares existentes. Las personas que son más susceptibles a estos efectos incluyen aquellos con enfermedades cardiovasculares o pulmonares crónicas, así como también niños y ancianos.

El dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas café rojizo y altamente reactivo, que se forma cuando otro contaminante, el óxido nítrico (NO) se combina con el oxígeno del aire.

Una vez que se ha formado, el dióxido de nitrógeno reacciona con los compuestos orgánicos volátiles (COVs) para formar el ozono a nivel del suelo. Las mayores fuentes de este

gas son los automóviles y las plantas de generación, así como grandes procesos industriales de combustión.

Los efectos sobre la salud generados por el dióxido de nitrógeno son los siguientes:

- En niños y adultos con enfermedades respiratorias como el asma, el NO₂ puede causar síntomas respiratorios como la tos y la dificultad en respirar. Incluso exposiciones cortas pueden afectar la función pulmonar especialmente en individuos muy sensibles.
- En niños, exposiciones de corto plazo pueden incrementar el riesgo de enfermedades respiratorias.
- Estudios con animales sugieren que exposiciones prolongadas al dióxido de nitrógeno pueden incrementar la susceptibilidad a infecciones pulmonares y puede causar cambios estructurales permanentes en los pulmones.

El ozono

El ozono es un gas inodoro e incoloro compuesto de tres átomos de oxígeno. En la alta atmósfera, particularmente la estratosfera localizada entre los 11 y los 50 km de altitud, la presencia del ozono es beneficiosa para los seres vivos ya que los protege de la radiación ultravioleta emitida por el Sol; sin embargo, a nivel del suelo el ozono es un contaminante peligroso que se forma cuando los contaminantes emitidos por los vehículos automotores, las chimeneas industriales y los depósitos de combustibles o similares, específicamente los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, reaccionan químicamente en la atmósfera en presencia de la luz solar.

Los mayores niveles de ozono a nivel del suelo ocurren durante los días que presentan cielos despejados, especialmente en las primeras horas de la mañana y muchas veces se manifiesta como el smog fotoquímico, que es una especie de nube amarillenta estacionada sobre zonas de alto tráfico vehicular.

A continuación se describen los principales problemas derivados de la contaminación por ozono:

- El ozono puede irritar el sistema respiratorio, causando tos, irritación de la garganta y/o una incómoda sensación en el pecho.
- El ozono puede reducir las funciones pulmonares y hacer más difícil una respiración profunda y vigorosa, que puede devenir más rápida y agitada que lo normal. Esta reducción en la función pulmonar puede limitar la capacidad de la persona para realizar ejercicios en lugares abiertos.
- El ozono puede agravar el asma. Cuando los niveles de ozono son altos, más personas con esta enfermedad sufren ataques que requieren atención médica o el uso de medicamentos. Una razón para esto es que el ozono hace a las personas más sensibles a las alergias, que es uno de los detonantes más comunes de los ataques de asma.
- El ozono puede incrementar la susceptibilidad a infecciones respiratorias.
- El ozono puede inflamar y dañar el tapizado interno de los pulmones, lo cual en condiciones normales puede ser renovado por el propio organismo; sin embargo, estudios en animales sugieren que si esta inflamación ocurre repetidamente, el tejido pulmonar puede lastimarse de manera permanente, resultando en la pérdida de elasticidad de los pulmones, una baja permanente en la función pulmonar y, consiguientemente un debilitamiento crónico de la salud.

Sinergias

Debe tenerse en cuenta adicionalmente, que existen fenómenos de sinergia y potenciación de los efectos dañinos de los contaminantes, particularmente sobre el aparato respiratorio, y de manera especial, entre los óxidos de azufre, las partículas y el ozono.

Esto obliga a que en determinadas circunstancias deban tomarse precauciones especiales de protección de la población, aun cuando los niveles de cada uno de estos contaminantes no justifiquen por sí solos tales medidas.

Calidad del aire

La Sección 4.1.2.1 de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente, establecida en el Libro VI, Anexo 4 del Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (Ministerio del Ambiente, 2003) define los siguientes niveles de concentración máxima permitida para los contaminantes comunes del aire ambiente:

- **Partículas sedimentables.**- La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado (1 mg/cm² x 30 d).
- **Material particulado menor a 10 micrones (PM10).**- El promedio aritmético de la concentración de PM10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 ug/m³), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año.
- **Material particulado menor a 2.5 micrones (PM2.5).**- Se ha establecido que el promedio aritmético de la concentración de PM2.5 de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico (15 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder sesenta y cinco microgramos por metro cúbico (65 ug/m³), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año.
- **Dióxido de azufre (SO2).**- El promedio aritmético de la concentración de SO2 determinada en todas las muestras en un año no deberá exceder de ochenta microgramos por metro cúbico (80 ug/m³). La concentración máxima en 24 horas no deberá exceder trescientos cincuenta microgramos por metro cúbico (350 ug/m³), más de una vez en un año.

- **Monóxido de carbono (CO).**- La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 (ocho) horas, no deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico (10 000 ug/m3) más de una vez en un año. La concentración máxima en una hora de monóxido de carbono no deberá exceder cuarenta mil microgramos por metro cúbico (40 000ug/m3) más de una vez en un año.
- **Oxidantes fotoquímicos, expresados como ozono (O3).**- La máxima concentración de oxidantes fotoquímicos, obtenida mediante muestra continua en un período de una hora, no deberá exceder de ciento sesenta microgramos por metro cúbico (160 ug/m3), más de una vez en un año. La máxima concentración de oxidantes fotoquímicos, obtenida mediante muestra continua en un período de ocho horas, no deberá exceder de ciento veinte microgramos por metro cúbico (120 ug/m3), más de una vez en un año.
- **Óxidos de nitrógeno, expresados como dióxido de nitrógeno (NO2).**- El promedio aritmético de la concentración de óxidos de nitrógeno, expresada como NO2, y determinada en todas las muestras en un año, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100 ug/m3). La concentración máxima en 24 horas no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 ug/m3) más de dos (2) veces en un año.

Los valores de concentración de los distintos contaminantes han sido determinados considerando condiciones de referencia de presión y temperatura (25 °C y 760 mmHg, respectivamente), por lo que en la Sección 4.1.2.3 de la Norma se establece la necesidad de que las mediciones observadas en los procesos de monitoreo deben ser corregidas según la siguiente expresión:

$$Cc = Co \times \frac{760mmHg}{PblmmHg} \times \frac{(273 + t^{\circ}C)^{\circ}K}{298^{\circ}K} \quad (6.1)$$

donde:

Cc: Concentración corregida

Co: Concentración observada

Pbl: Presión atmosférica local (mm Hg)

t: Temperatura local (°C)

Considerando las mediciones de presión y temperatura en los sitios donde están instaladas las estaciones, se han definido las siguientes expresiones para la corrección de las concentraciones:

$$C_c = 1.34 \times C_o \text{ Quito} \quad (6.2)$$

$$C_c = 1.27 \times C_o \text{ Tumbaco} \quad (6.3)$$

$$C_c = 1.30 \times C_o \text{ Los Chillos} \quad (6.4)$$

Adicionalmente, en la Sección 4.1.3.2 del mismo cuerpo legal se definen los episodios críticos de contaminación del aire a través de los niveles de alerta, alarma y de emergencia en lo referente a la calidad del aire (expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm de presión), según la siguiente tabla 6.1:

Contaminante y periodo de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de carbono, concentración promedio en 8 horas	15 000	30 000	40 000
Ozono, concentración promedio en 1 hora	300	600	800
Dióxido de nitrógeno, concentración promedio en 1 hora	1 200	2 300	3 000
Dióxido de azufre, concentración promedio en 24 horas	800	1 600	2 100
Material particulado PM10, concentración promedio en 24 horas	250	400	500

Tabla 6.1 Niveles de contaminación⁸⁰

Estos episodios críticos, según la Sección 2.11 de la Norma, constituyen “la presencia de altas concentraciones de contaminantes comunes del aire y por períodos cortos de tiempo, como resultado de condiciones meteorológicas desfavorables que impiden la dispersión de los contaminantes previamente emitidos”.

6.1.2. Ruido

El ruido producido por lo elementos mecánicos ocasiona molestias tanto a los usuarios como de las personas que se encuentran cerca de la unidad. Dado que en el país según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034 “Elementos Mínimos de Seguridad en vehículos automotores” informa que de no existir normas o reglamentos que controlen los

⁸⁰ Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente, establecida en el Libro VI, Anexo 4 del Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (Ministerio del Ambiente, 2003).

niveles de ruido en vehículos recomienda utilizar reglamentos o normativas equivalentes que sean aplicables, ya sean estas Europeas, Estadounidenses o Japonesas.

Según normas internacionales en la materia establecen límites para el nivel de ruido producido por los vehículos en marcha, y medido en condiciones predeterminadas a 7,5 m de la unidad. Para los vehículos de transporte colectivo (más de 10 pasajeros y de hasta 3,5 toneladas de peso total) donde su potencia es menor de 210 Cv, el límite es de 90 dB, y de 91 dB en vehículos más potentes.

Según las mediciones realizadas por la Dirección Metropolitana de Ambiente (DMA) y La Corporación Municipal para el mejoramiento del aire de Quito (CORPAIRE) el promedio de ruido en la ciudad oscila entre los 80-90 dB, y el nivel tolerable establecido para Quito es de 90 dB para un vehículo pesado.

Con el control en el desempeño del motor de combustión interna las vibraciones a la carrocería se reducen en gran medida y se logra niveles de ruido entorno de 75-78 dB en operación, que sería una reducción del 15 al 17 por ciento.

6.2. Niveles de Contaminación

6.2.1 Sistema de Transporte Tradicional

Los gases de escape tienen componentes principales y secundarios.

Los componentes principales de los gases de escape son: Nitrógeno, Dióxido de Carbono y Vapor de Agua. No son venenosos. El componente CO₂, que depende fundamentalmente del consumo de energía, adquiere sin embargo creciente importancia por su aportación al "Efecto Invernadero".

Componentes Secundarios:

- Monóxido de Carbono (CO): gas incoloro, inodoro e insípido. El respirar 30 minutos un aire que contenga un 0,3 por ciento en volumen de CO puede ser mortal.

- Monóxido de Nitrógeno (NO): gas incoloro, inodoro e insípido que expuesto al aire se transforma lentamente en NO₂. El NO₂ es un gas pardo rojizo, de olor penetrante y muy venenoso. Destruye el tejido pulmonar. El NO y el NO₂ se determinan corrientemente juntos y se denominan Óxidos de Nitrógeno (NO_x).
- Hidrocarburos: están contenidos en los gases de escape en mucha mayor proporción. En presencia de Óxidos de Nitrógeno y a la luz del sol forman oxidantes que irritan las mucosas. Algunos hidrocarburos son cancerígenos.
- Partículas: Comprenden todo material (excepto el agua no combinada), que en condiciones normales está contenido como cuerpo sólido (cenizas, carbono) o líquido en los gases de escape.

Composición y temperatura de los Gases de Escape

Componentes del gas de escape		Al ralentí	A potencia máxima
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	ppm	50...250	600...2500
Hidrocarburos (HC)	ppm	50...500	150
Monóxido de Carbono (CO)	ppm	100...450	350...2000
Dióxido de Carbono (CO ₂)	% en volumen	... 3,5	12...16
Vapor de Agua	% en volumen	2...4	...11
Oxígeno	% en volumen	18	2...20
Nitrógeno y otros	% en volumen	resto	resto
Hollín	mg/m ³	~ 20 (SE 0.7)	~ 200 (SE 0.8)
Temperatura gas escape(*)	°C	100...200	550...750

(*) Después de la válvula de escape

Tabla 6.2 Componentes de los gases de escape⁸¹

⁸¹ BOSCH, "Manual de la Técnica del Automóvil", Reverté S.A., 3ª Edición. 531 p.

Si se comparan las emisiones de escape del motor Otto con las del motor diesel convencional, se comprueba que el motor diesel sin depuración de gases de escape alcanza valores más bajos de CO y HC, mientras que las concentraciones de NO_x son similares en los dos tipos de motores. (En los motores de gasolina, con la acumulación de kilómetros aumentan los NO_x y en los diesel disminuyen).

Si se analizan las emisiones de partículas, las concentraciones más altas corresponden al motor diesel. Las partículas sólidas, denominadas comúnmente hollín, constan de un núcleo de carbono puro, al que se hallan adheridos los siguientes componentes:

- Hidrocarburos (HC).
- Agua (H₂O).
- Sulfato (SO₄).
- Azufre y óxidos metálicos varios.

El núcleo de carbono puro se considera una sustancia inofensiva para la salud, pero algunos compuestos de hidrocarburos se consideran nocivos y otros producen un olor desagradable.

Calidad del aire en la ciudad de Quito

Datos obtenidos de la página de internet de LA CORPAIRE⁸²



Figura 6.1 Material particulado anual

⁸² http://www.corpaire.org/siteCorpaire/rma_main.jsp

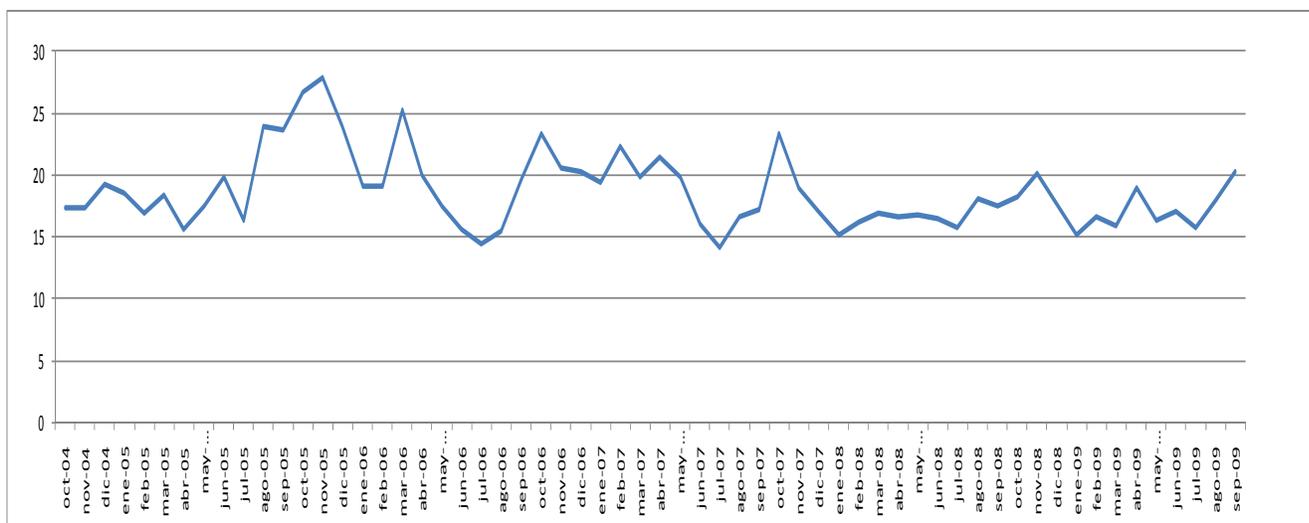


Figura 6.2 Variación de Material Particulado

Quito es la ciudad más contaminada del país. Su situación geográfica rodeada de montañas que impiden la fluidez de aire así lo impone. El resto lo hace el parque automotor. El 80 por ciento del problema se origina en las emisiones generadas por vehículos el parque automotor de Quito tiene alrededor de 220 000 vehículos donde apenas cerca del 14 por ciento corresponde a buses.

Marca	Modelo	Cuenta	PPM			Desviación Estandar	Porcentaje		
			Promedio	Mínimo	Máximo				
CHEVROLET	CHR 7.2 CHASIS TORPE	85	27,01	6,00	49,00	10,75	0,04		
CHEVROLET	FB 9502	2	32,50	20,00	45,00	12,50	0,00		
CHEVROLET	FTR 32M	451	27,25	1,00	49,00	11,31	0,19		
HINO	FD166B	92	34,91	3,00	59,00	13,78	0,04		
HINO	FF1JP6Z	96	29,42	2,00	59,00	15,88	0,04		
HINO	GD1JLTA	76	20,84	3,00	47,00	11,52	0,03		
HINO	RK1JSTL	43	22,02	3,00	49,00	12,99	0,02		
HINO	FG1JPUZ	267	21,99	1,00	49,00	12,02	0,11		
HINO	XZU413L-HKMQD	21	34,67	17,00	49,00	9,06	0,01		
MERCEDES BENZ	ARTICULADO TROLEBUS	72	27,47	4,00	59,00	14,76	0,03		
MERCEDES BENZ	MBO 1417/60	1	5,00	5,00	5,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	O400 UPA BUS	1	7,00	7,00	7,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OF 1318/51	63	31,44	4,00	53,00	15,07	0,03		
MERCEDES BENZ	OF 1620/60	31	27,35	2,00	59,00	16,32	0,01		
MERCEDES BENZ	OF 1721/52	242	23,14	3,00	49,00	12,27	0,10		
MERCEDES BENZ	OF 1721/59	429	23,08	3,00	49,00	11,87	0,18		
MERCEDES BENZ	OF 318/51 OMNIBUS	1	21,00	21,00	21,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OMNIBUS L 1317	1	9,00	9,00	9,00	0,00	0,00		
MERCEDES BENZ	OF 1722/59	27	24,85	6,00	46,00	10,77	0,01		
VOLKSWAGEN	16180 CO BUS	1	22,00	22,00	22,00	0,00	0,00		
VOLKSWAGEN	16210	6	26,00	9,00	40,00	14,22	0,00		
VOLKSWAGEN	17210 OD	377	28,56	4,00	49,00	12,07	0,16		más contaminante
VOLKSWAGEN	9.150 OD	7	26,71	6,00	46,00	14,18	0,00		
	TOTAL	2392							

Tabla 6.3 Datos de prueba de control de opacidad por marcas

Total de unidades Volkswagen 391

6.2.2 Sistema de Transporte Híbrido

Los vehículos híbridos, hoy en día son los vehículos con las tecnologías más prometedoras en cuanto al ahorro y optimización en el uso de combustible, utilizando los actuales motores de combustión interna (ICE) como su fuente primaria de energía y baterías de pilas / motores eléctricos como los fuente de energía en horas pico, tienen una eficiencia de operación mucho más altos.

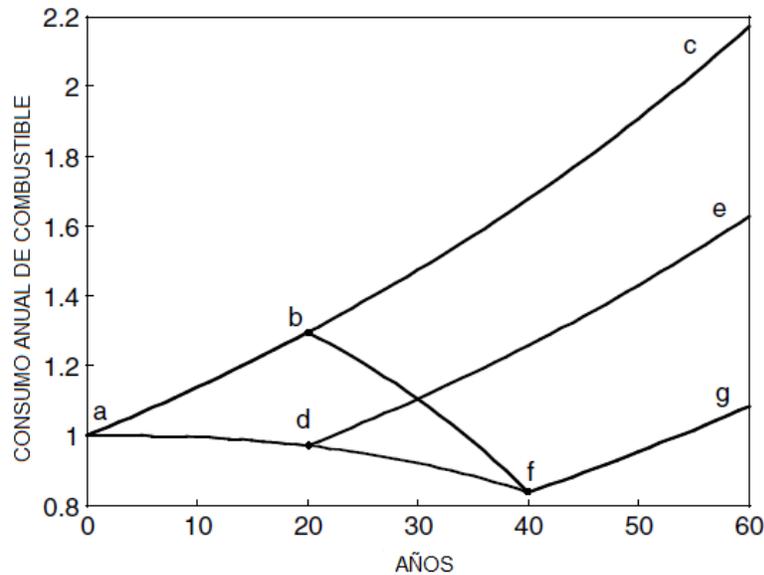


Figura 6.3 Consumo de combustible de acuerdo a diferentes tecnologías⁸³

La figura 6.3 muestra el generalizado consumo de combustible anual de las diferentes estrategias de desarrollo de los vehículos de próxima generación. La curva a-b-c representa la tendencia del consumo anual de combustible de los vehículos actuales, la cual tiene una tasa anual de crecimiento de 1,3 por ciento. Esta tasa de crecimiento anual se supone que es la tasa de crecimiento anual del número total de vehículos. La curva a-d-e representa una estrategia de desarrollo en el que los vehículos convencionales son convertidos gradualmente en vehículos híbridos durante los primeros 20 años, y después de 20 años todos los vehículos serán vehículos híbridos. En esta estrategia, se supone que el vehículo híbrido es un 25 por ciento más eficiente que un vehículo convencional actual de consumo de combustible (25 por ciento menos).

⁸³ M. Ehsani and others. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 12 p.

Curva de a-b-f-g representa una estrategia en la que, en los primeros 20 años, los vehículos con pilas de combustible están en una etapa de desarrollo actual, mientras que los vehículos convencionales están todavía en el mercado. En los segundos 20 años, los vehículos con pilas de combustible poco a poco entran al mercado, empezando en el punto b y se vuelven totalmente con pilas de combustible en el punto f. En esta estrategia, se asume que un 50 por ciento menos de combustible será consumido por los vehículos con pilas de combustible que la de los actuales vehículos convencionales. La curva a-d-f-g representa la estrategia en la cual los vehículos se convierten en híbridos en los primeros 20 años, y con pilas de combustible en los segundos 20 años.

En vista de que se tienen datos de la calidad del aire a partir del 2004 se realizó una proyección. Que a partir del 2004 se modificaron el 20 por ciento anual a las unidades existentes de buses Volkswagen por lo que se obtuvo la figura 6.4:

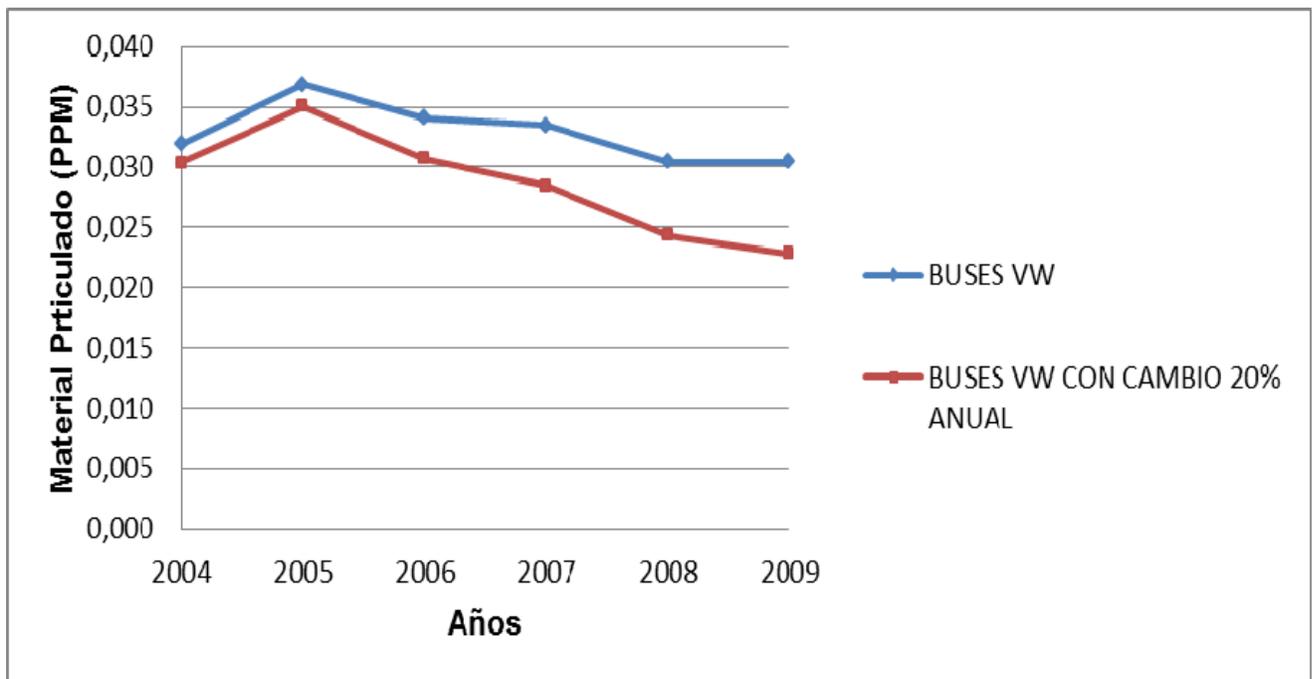


Figura 6.4 Variación de material particulado con tecnología híbrida

CAPÍTULO 7

SIMULACIÓN DE FRECUENCIA DE FALLAS

Motor de Combustión Interna

Las nuevas tecnologías en fabricación de motores han logrado que desarrollen especificaciones de funcionamiento muy elevadas tal es el caso que los vehículos hoy en día alcanzan revoluciones de giro del motor que sobrepasan las 5000 y 6000 rpm. Pero por más avanzados que estos sean no pueden escapar a los diferentes problemas que se presentan en el tren motriz, derivado como consecuencia de la fricción, la temperatura y el desgaste.

La vida promedio para un motor de vehículos es de 10 años, la lubricación entre sus elementos, se puede considerar como el principal factor para que un motor disminuya en su período de vida. Debido a que los lubricantes por más avanzados y costosos que sean no pueden proteger del todo a los componentes que constantemente se encuentran en fricción.

Por lo que se puede considerar que el desgaste del motor está directamente relacionado con la lubricación entre sus componentes y las revoluciones a las cuales es sometido el motor, es muy difícil determinar las condiciones de trabajo a las que está sometido el motor de un vehículo debido a que depende en mucho del tipo de conducción, el terreno, condiciones de estado del vehículo, pero mediante un ensayo FTP 75 que es un test que se realiza a vehículos en Estados Unidos para la medición de gases en un ciclo de manejo, se puede evidenciar la continua variación de velocidad en determinados intervalos de tiempo a las que está sometido el motor.

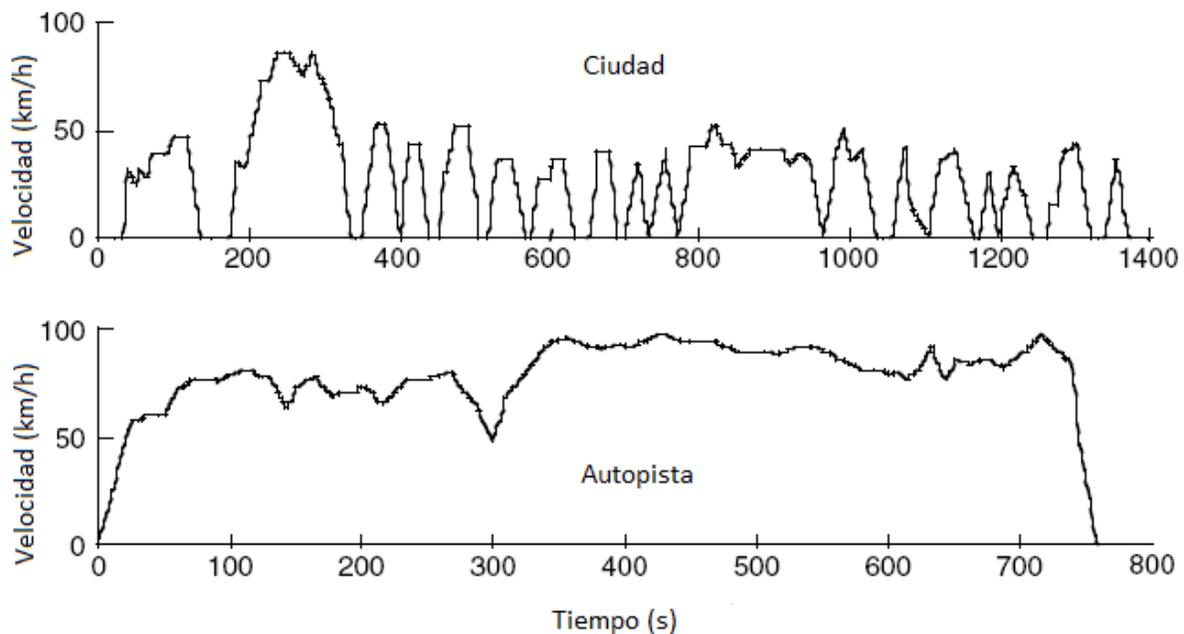


Figura 7.1 Ensayo de conducción FTP 75 de vehículos para ciudad y autopista⁸⁴

La figura 7.1 muestra una continua variación de velocidad del vehículo, para que esto ocurra es necesario que las revoluciones de giro del motor también varíen, por esta razón va a existir un mayor desgaste en todos los componentes del motor y sus sistemas anexos como el de refrigeración, alimentación, entre otros.

Utilizando el software desarrollado dentro del convenio entre la COMISION NACIONAL DE TRANSPORTE TERRESTRE, TRANSITO Y SEGURIDAD VIAL (CNTTTSV) – ESPE en el proyecto “Metodología para determinar la vida útil vehicular que sirva de base para la toma de determinaciones y para la implementación de un programa nacional de renovación de flota de vehículos de servicio público”, en el cual se pueden ingresar los principales parámetros de funcionamiento de un vehículo como costo de la unidad, tiempo de trabajo, tipo de servicio y un cronograma determinado de mantenimiento de acuerdo al kilometraje recorrido se puede obtener:

⁸⁴ M. Ehsani and others, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design*, CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005. 52 p.

Cuadro de resultados para vehículos de servicio público.

Bus Tradicional

	VIDA ÚTIL			VIDA ÚTIL RESIDUAL		
	KM de Vida Útil	Años de Vida Útil	Costo/Km	KM de Vida Útil	Años de Vida Útil	Costo/Km
TAXIS	177.731	4	0,08	130.248	3	0,07
CAMIONETAS	182.839	8	0,15	109.597	5	0,10
CAMIONES	373.451	8	0,21	288.659	6	0,16
BUS ESCOLAR	305.373	8	0,29	191.458	5	0,20
TRACTOCAMIONES	598.493	8	0,29	324.422	5	0,16
MICROBUS ESCOLAR	140.895	5	0,14	104.798	4	0,10
INTERPARROQUIAL	290.548	7	0,31	181.263	5	0,21
BUS URBANO	433.341	7	0,34	269.445	4	0,23
INTERPROVINCIAL	425.453	6	0,24	288.659	4	0,16



**COMISIÓN NACIONAL
DEL TRANSPORTE TERRESTRE,
TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL**



Tabla 7.1 Vida Útil y Residual de transporte público⁸⁵

En la Tabla (Anexo G) se puede observar los diferentes ítems de mantenimiento, costos de mano de obra y repuestos de acuerdo al kilometraje recorrido. (Datos ingresados en el programa realizado en la ESPE para determinar la vida útil de los vehículos de servicio público).

[Ver anexo G](#)

En la Tabla 7.2 se puede observar los resultados de Vida Útil en km, costos de mantenimiento y una gráfica que representa la vida útil del bus.

⁸⁵ Software convenio CNTTTSV-ESPE

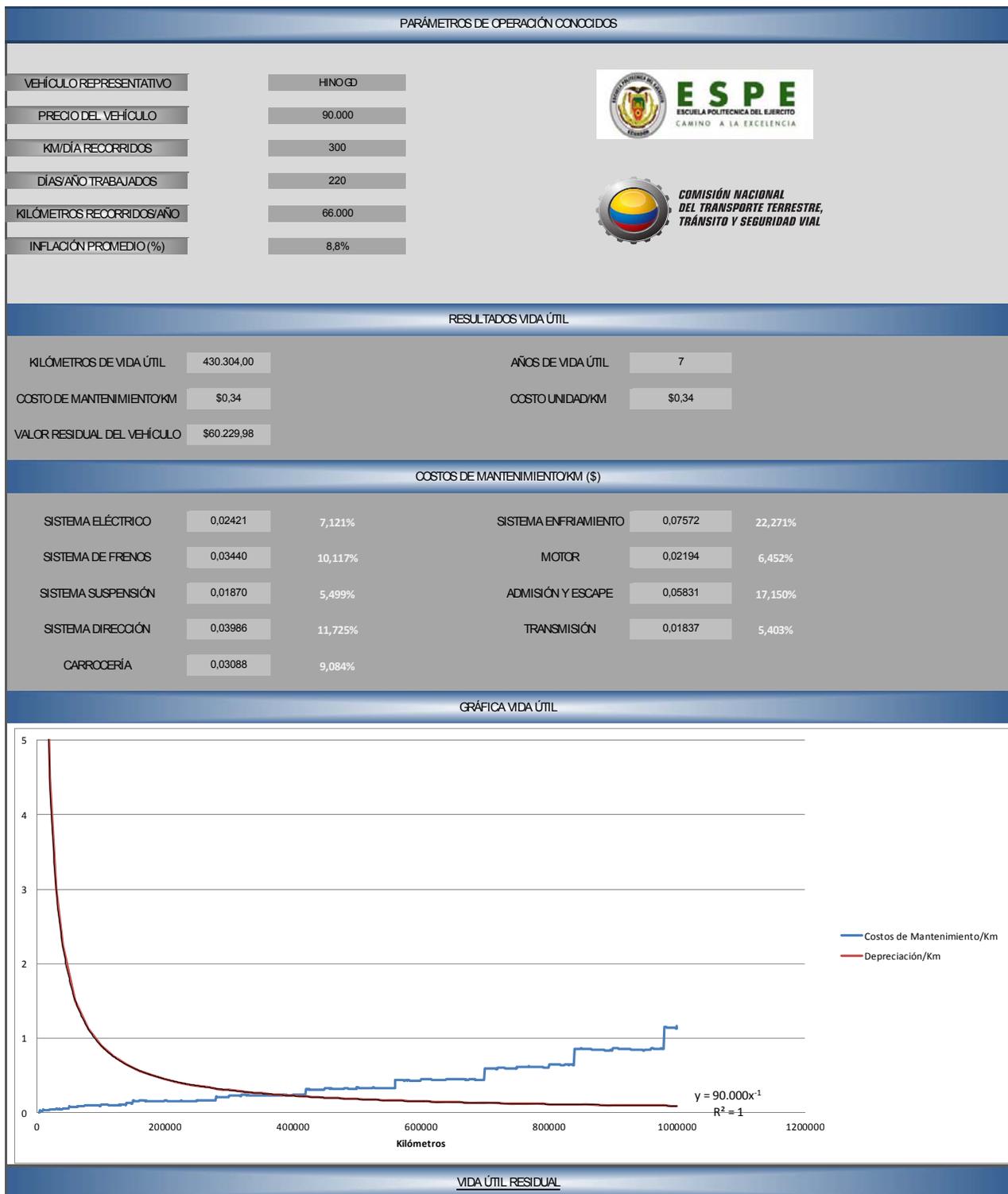


Tabla 7.2 Vida Útil de bus tradicional⁸⁶

⁸⁶ Software convenio CNTTTSV-ESPE

Bus Híbrido

En el caso del Sistema Híbrido en Serie el motor de Combustión Interna trabaja a un determinado número de revoluciones lo cual implica que la fricción sea mucho menor, consecuencia de esto las temperaturas a las que trabaja el motor y el desgaste de todos los componentes móviles van a ser menores. Producto de esta condición de trabajo del motor se puede decir que éste trabaja cerca al régimen de un motor estacionario.

El promedio de vida de un motor estacionario supera en un 30 por ciento a un motor de vehículos por lo que los componentes que están relacionados o interactúan con el motor también extienden su vida. Por medio del programa de vida útil se obtienen los siguientes resultados.

	Bus urbano	Bus urbano Híbrido
Recorrido diario (km)	300	300
Días de trabajo anual	220	220
Total recorrido anual (km)	66000	66000
Km vida útil	430304	559395
Meses de vida útil	84	102

Tabla 7.3 Tabla comparativa Bus Convencional vs. Bus Híbrido

En la Tabla (Anexo I) se puede observar los diferentes ítems de mantenimiento, costos de mano de obra y repuestos de acuerdo al kilometraje recorrido, sugerido para un bus híbrido.

Ver anexo I

En la Tabla 7.4 se puede observar los resultados de Vida Útil en km, costos de mantenimiento y una gráfica que representa la vida útil del bus.

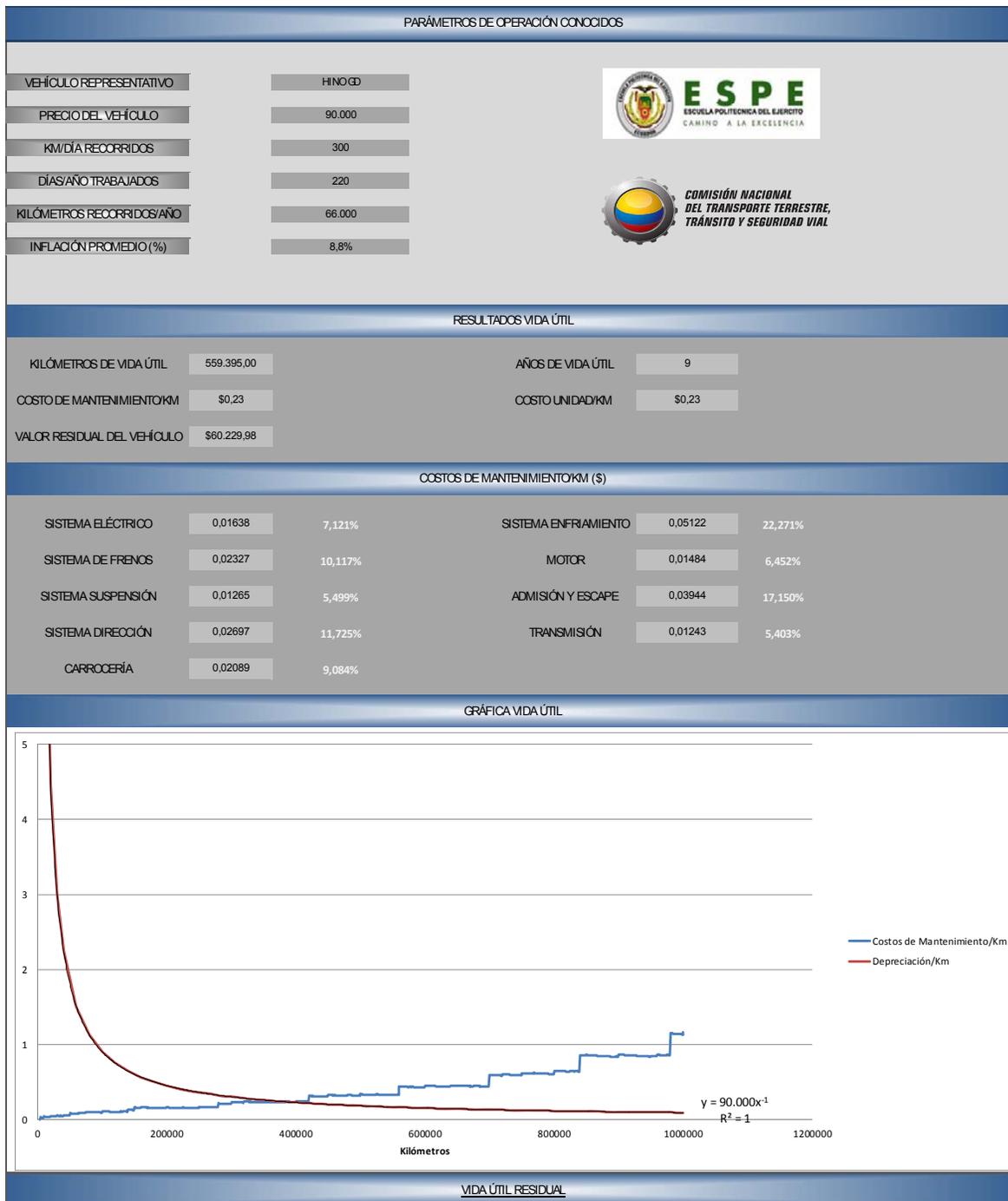


Tabla 7.4 Vida Útil de Bus Híbrido⁸⁷

⁸⁷ Software convenio CNTTTSV-ESPE

Fallas Frecuentes en Sistema Eléctrico de Bus Híbrido

Motor Eléctrico

El promedio de vida de un motor eléctrico varía entre 24.000 y 28.000 horas de trabajo pero esto depende del tipo de trabajo, condiciones de funcionamiento y el tipo de mantenimiento como se mencionó en el Capítulo 5 se dan ítems de mantenimiento muy sencillos para el motor/generador que ayudan a que el motor alargue su vida útil.

Para determinar las posibles fallas de un motor eléctrico, se han establecido las siguientes zonas o áreas de fallas.

- Circuito de Potencia
- Calidad de energía
- Aislamiento
- Estator
- Rotor
- Excentricidad (entrehierro)

El análisis de estas 6 zonas nos permite distinguir entre un problema mecánico o eléctrico.

Circuito de Potencia

Este problema generalmente involucra a todos los conductores con sus bornes, interruptores, protecciones térmicas, fusibles, contactores y cuchillas.

Se ha demostrado que los falsos contactos han sido la fuente de un 46 por ciento de las fallas en motores, por lo que aunque muchas veces el motor este en excelente estado, este se instala en un circuito de potencia defectuoso, que a la postre lo daña.

Los problemas de conexiones de alta resistencia (se oponen al paso de la corriente) son variados, entre ellos tenemos:

- Generación de armónicas
- Desbalances de voltaje
- Desbalances de corriente

Típicamente las conexiones de alta resistencia son causadas por:

- Terminales corroídos
- Cables sueltos
- Prensa fusibles corroídos
- Conexiones entre Aluminio – cobre
- Diferentes tamaños de conductores

Uno de los métodos utilizados para detectar defectos en el circuito de potencia en un motor / generador, trifásico es la medición de resistencia entre fases, es una prueba estática con motor detenido. En un equipo en buen estado las tres lecturas entre las fases deberían ser casi idénticas, su desbalance resistivo debe ser menor a un 5 por ciento.

Dinámicamente, con motor energizado el circuito es evaluado completamente al detectarse desbalances de voltaje en cualquiera de las fases.

Calidad de energía

Sin duda es una zona de falla con mucha influencia en la vida de un motor. Existen varios factores involucrados en la calidad de energía; distorsión armónica tanto de voltaje como de corriente, picos de voltaje, desbalances de voltaje y factor de potencia.

- Desbalance de Voltaje.- Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor no son equilibrados se desarrollan corrientes desbalanceadas en los devanados del estator, a estas se las conoce como corrientes de secuencia negativa y reducen el torque del motor. Se producen dos efectos importantes, aumenta la temperatura en el devanado y aumenta su vibración. Un aumento de la temperatura por encima de su valor permitido

provocaría daños al aislamiento, y el aumento en los niveles de vibración provocaría en algún grado solturas mecánicas, rodamientos y aflojamiento de las bobinas, ningún motor debe ser operado con desbalances de voltaje mayores a un 5 por ciento.

- Distorsión de armónica.- o también por conocida como Distorsión Armónica Total por sus siglas en inglés (THD), en términos simples se puede decir que es el valor RMS de la señal con la frecuencia fundamental removida. Es decir, otra onda presente junto con la fundamental se le considera distorsión armónica.

La figura 7.2 muestra la onda fundamental a 60Hz pero con otra onda sobrepuesta, esta última completa 2 ciclos en el mismo tiempo que la fundamental completa uno. Si se observa la fase 1 de la fundamental (gris), la armónica forma los dos ciclos (verde).

A la onda sobrepuesta se le conoce como la 2da. Armónica $2 \times 60\text{Hz} = 120\text{Hz}$

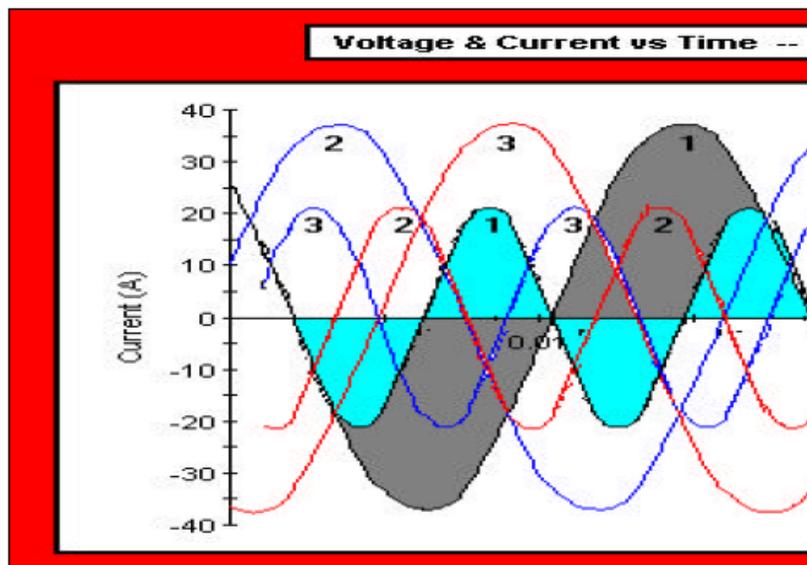


Figura 7.2 Onda Fundamental con onda superpuesta⁸⁸

Por lo tanto, las armónicas son señales que distorsionan a la onda fundamental, tienen una forma sinusoidal y están presentes en múltiplos de la onda fundamental.

Las armónicas existen en todos los sistemas trifásicos y son generadas por cargas no lineales como Convertidores de potencia electrónicos.

⁸⁸ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

Existen tres tipos de armónicas:

- Secuencia positiva: Crea un campo magnético en la dirección de rotación, por lo tanto ayuda al torque del motor.
- Secuencia negativa: Se opone a la rotación del motor e incrementa la demanda de corriente a una carga determinada.
- Secuencia cero: No produce ningún trabajo, pero causa calentamiento y retorna al transformador de alimentación y produce por lo tanto calentamiento del transformador también.

El fenómeno de las armónicas que más afecta para el caso de los motores eléctricos es el excesivo calor que se produce por las demandas de corriente anormales. Un motor afectado por THD puede consumir hasta un 20 por ciento más de corriente. Este aumento de corriente perfectamente podría no ser tolerado por el motor y provoca daños severos al aislamiento y posible colapso del mismo.

Aislamiento

La RTG indica que tan limpio o sano está un aislamiento. Para que se dé una falla a tierra, deben de ocurrir dos cosas. Primero debe crearse un camino de conducción a través del aislamiento. Conforme el aislamiento envejece se fisura y posibilita que se acumule material conductor. Segundo, la superficie exterior del aislamiento se contamina de material conductor y conduce suficiente corriente a la carcasa o núcleo del motor que está conectado a tierra.

Hoy en día los sistemas de aislamiento han mejorado notablemente y son capaces de soportar mayores temperaturas sin sacrificar su vida esperada.

La máxima temperatura de operación de un motor / generador depende principalmente de los materiales usados en su construcción, dichas temperaturas máximas, son a las cuales el aislamiento podría colapsar.

Generalmente al medir la temperatura de la carcasa del motor, asumimos que el aislamiento está en 20°C más alto que esta. El aislamiento pierde muy rápido sus propiedades

al aumentar la temperatura, es por esta razón que un motor en vez de durar aproximadamente 15 años, duraría alrededor de 3 años.

La figura 7.3 muestra la variación del valor de aislamiento con respecto al tiempo (meses)

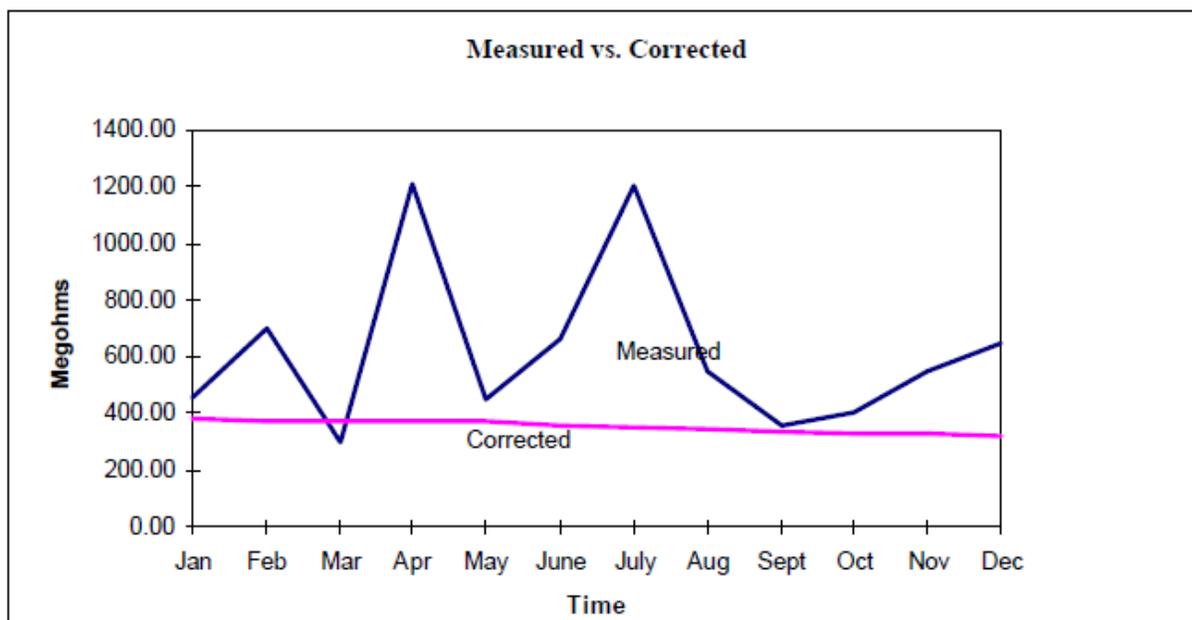


Figura 7.3 Variación de aislamiento vs. Tiempo de uso⁸⁹

El determinar la causa raíz de una falla en el aislamiento de un motor, puede involucrar alguno de estas causas posibles:

- Circuito de potencia: Una conexión de alta resistencia, produce un voltaje de línea desbalanceada
- Armónicas: que introducen corrientes de secuencia negativa y sobrecalentando el devanado.
- Ambiental: Contaminación en el motor

⁸⁹ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

Estator

En un estator es importante el diagnosticar: los devanados, el aislamiento entre vueltas, juntas de soldado entre las espiras y el núcleo del estator o laminaciones.

Tal vez, la falla más común es un corto entre vueltas, esto reduce la habilidad de producir un campo magnético balanceado. Esto a la vez trae otras consecuencias como un aumento en la vibración de la máquina, y por ende degradación del aislamiento y daños a los rodamientos del motor. Generalmente este tipo de cortos aumenta la temperatura y el corto se expande a un corto entre espiras y eventualmente destruye todo el motor.

Aún más grave que esta es la falla entre fases, un corto de este tipo acelera rápidamente la destrucción del motor. Sí el núcleo del motor se llegase a dañar el reemplazo del motor sería total.

El diagnóstico de esta zona de falla puede ser efectuada directamente en los terminales del motor o desde el Centro de Control de Motores (CCM).

La prueba estática involucra mediciones de inductancia entre fases, para esto se envían señales de CA a alta frecuencia, y se calcula un desbalance inductivo. Un desbalance presente implica que las fases producen campos magnéticos desbalanceados y que muy probablemente tiene cortos entre vueltas o espiras. También como parte de la prueba se toman valores de resistencia, si excede un valor predeterminado indica que pueden existir conexiones de alta resistencia en el circuito hacia el motor o en las juntas de soldado.

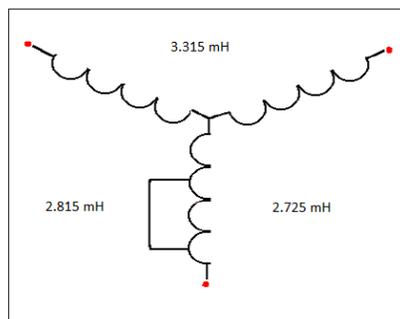


Figura 7.4 Desbalance inductivo – corto entre espiras⁹⁰

⁹⁰ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

La prueba dinámica con motor energizado identifica una falla en el estator tomando mediciones de voltaje y corriente por fase y calculando la impedancia en cada una. Si una fase tiene problemas en los devanados, el desbalance de impedancia aumenta.

Rotor

En un rotor se deben de revisar; las barras, laminaciones y los anillos de corto circuito. Debido a que un 10 por ciento de fallas en motores se debe al rotor, una barra rota genera un calor intenso en la zona de ruptura y puede destruir el aislamiento cercano a las laminaciones y el devanado estático colapsara.

Desdichadamente, muchas veces, los problemas en las barras del rotor no son fácilmente detectables con tecnologías comunes y se obvia como causa-raíz. Por esta razón muchas empresas que rebobinan varias veces un motor sin saber que la raíz del problema en el devanado estaba en el rotor.

Se puede detectar un problema en el rotor mediante la prueba del Rotor Influence Check (RIC), esta prueba es estática y relaciona el magnetismo entre el rotor y el estator. La prueba se realiza al rotor en incrementos específicos (determinados por el número de polos del motor) y tomando la lectura en el cambio de inductancia para cada fase.

El RIC de un motor normal tiene la forma de la ilustración 10 y el RIC de un rotor con barras rotas muestra valores de inductancia erráticos y periódicos causados por la distorsión del flujo alrededor de la barra rota.

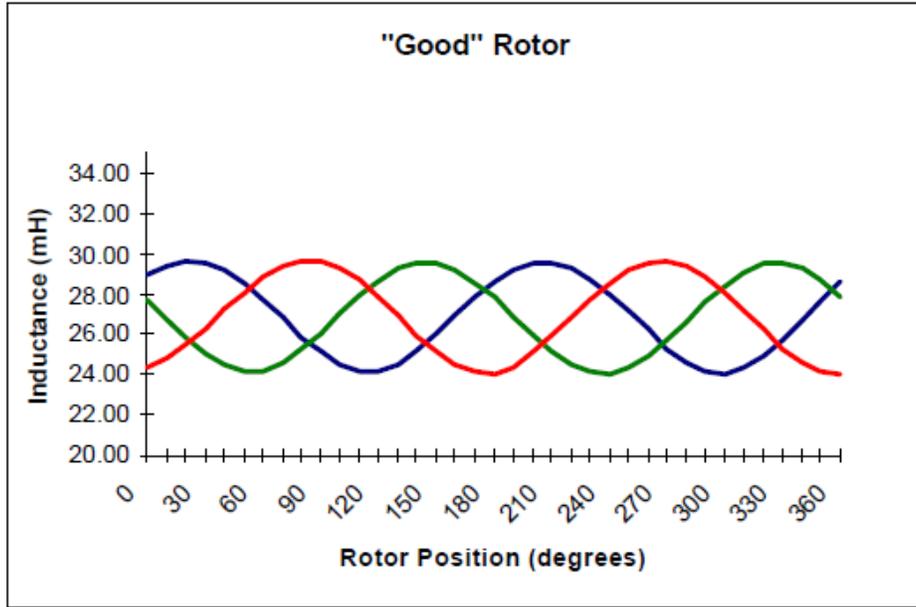


Figura 7.5 muestra un rotor en buen estado⁹¹

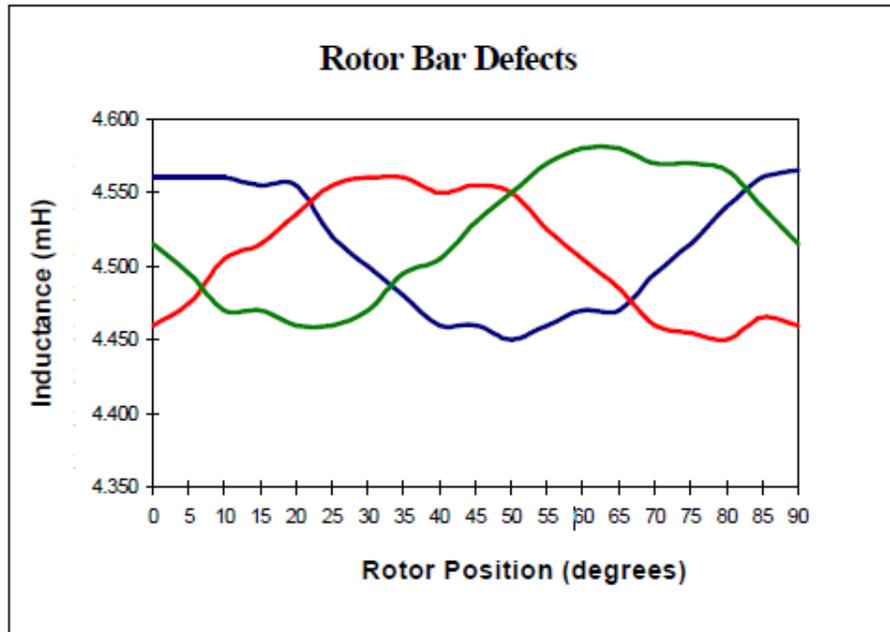


Figura 7.6 muestra un rotor en mal estado⁹²

Rotor

⁹¹ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

⁹² GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

El rotor de un motor / generador debe estar centrado, existe un claro entre estos denominado “Air Gap”, si este Air Gap no está bien distribuido en los 360° del motor se producen campos magnéticos desiguales.

Se ha discutido ampliamente el efecto adverso que provocan estos campos magnéticos desiguales que a la larga resultará en una falla en el aislamiento y falla en los rodamientos. Este problema se le conoce como excentricidad, existen básicamente dos tipos, la estática en la cual el rotor esta descentrado pero fijo en un lugar generalmente este tipo de problemas es causado cuando los alojamientos de los roles están desalineados, por un inadecuado alineamiento o porque la carcasa del motor fue deformada cuando se instaló en su base.

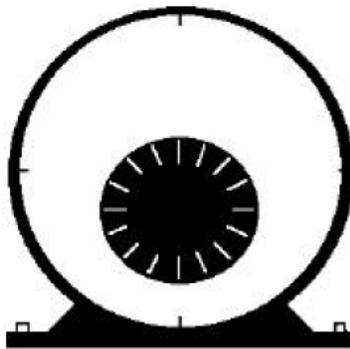


Figura 7.7 Excentricidad estática⁹³

El otro tipo de excentricidad es la dinámica, y como resultado el rotor se balancea dentro del estator, por lo tanto la inductancia varía. La excentricidad dinámica es producida por una deflexión en el eje generalmente.

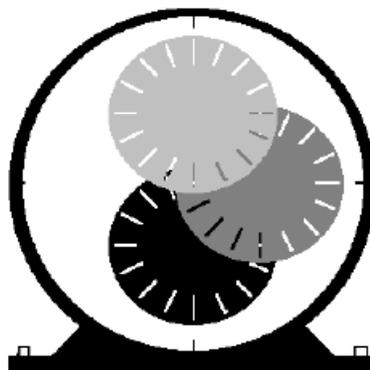


Figura 7.8 muestra como es la excentricidad dinámica⁹⁴

⁹³ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

⁹⁴ GRUPO TERMOGRAM, Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos, Costa Rica.

CAPITULO 8

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

8.1 Estudio Económico

8.1.1 Antecedentes

- Los costos presentados en la elaboración de este Proyecto fueron asumidos por los Estudiantes ejecutores del proyecto.
- Ya que el proyecto es una Ingeniería Conceptual netamente de investigación donde los beneficiados directos son los estudiantes que pueden tomar como referencia para la elaboración de futuros proyectos.

8.1.2 Costos del Proyecto

8.1.2.1 Costos Directos

El costo de la ingeniería de los dos ejecutores y sus respectivos directores para la realización del proyecto durante los 14 meses que duró el mismo es el siguiente:

COSTOS DE REMUNERACIONES			
No	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	Director de Tesis	500,00	500,00
1	Codirector de Tesis	500,00	500,00
2	Estudiantes	300,00	600,00
Total			1600,00

Tabla 8.1 Costo de Remuneraciones

8.1.2.2 Costos Indirectos

Dentro de este rubro se contempla: software, recopilación de información, impresión de memoria técnica y planos.

COSTOS INDIRECTOS	
Descripción	Costo Total
Libros, revistas, catálogos	600,00
Software, Hardware	500,00
Transporte	350,00
Suministros de oficina	50,00
Impresiones y Plotter	200,00
Imprevistos	200,00
Total	1900,00

Tabla 8.2 Lista de Costos indirectos

8.1.3 Costo Total del Proyecto

El costo total del proyecto una vez culminada toda la investigación resulta de la sumatoria de todos los costos antes mencionados:

Costo total del Proyecto = costos directos + costos indirectos

Costo Total del Proyecto = \$1600,00+ \$1900,00

Costo Total del Proyecto = \$ 3500,00

8.2 Estudio Financiero

8.2.1 Tasa Interna de Retorno, Valor presente neto, Beneficio Costo, en base a la vida útil del sistema

Es importante aclarar que en los análisis de estos ítems se los realizarán desde el punto de vista del propietario de un bus urbano común y corriente. En donde la prioridad es verificar si es o no viable modificar el bus en comparación con los buses híbridos existentes en el mercado.

La tabla 8.3 y 8.4 muestran los costos de implementación del sistema híbrido lo cual se consideraría como la inversión inicial que se haría en el bus para modificarlo.

Elementos	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
Motor Eléctrico	1	5000	5000
Generador	1	5000	5000
Baterías	2	2000	4000
Inversor	1	3700	3700
Unidad de Control	1	3000	3000
Otros		1000	1000
		TOTAL	21700

Tabla 8.3 Costos de elementos del Sistema Híbrido

Costos de implementación	Mano de obra	Material	
Generador	500	200	
Motor Eléctrico	600	300	
Baterías	400	200	
Programación de U. Control	10000	0	
Otros	200	200	TOTAL
	11700	900	12600

Tabla 8.4 Costos de mano de obra

Sumando los costos de los elementos y mano de obra dan: **34300** dólares, que se consideraría la inversión inicial.

TIPO DE BUS	GASTOS ANUALES				TOTAL	
	MANTENIMIENTO		COMBUSTIBLE			
	km	\$	gl.	\$		
COMÚN	60000	5073	16620	19944	25017	
HÍBRIDO	60000	3689	11481	13777	17466	
					7551	Ahorro

Tabla 8.5 Gastos anuales en mantenimiento y combustible

La tabla 8.6 muestra los gastos generados por la unidad en un año tanto en mantenimiento como en combustible. El valor **17466** es el costo que genera la unidad híbrida que para el análisis del VAN y TIR es la inversión realizada anualmente.

Años	Inversión	Actual	Acumulada
0	\$ (34.300,00)	\$ (34.300,00)	
1	\$ 17.466,00	\$ 15.500,53	\$ 15.500,53
2	\$ 17.466,00	\$ 13.756,24	\$ 29.256,77
3	\$ 17.466,00	\$ 12.208,24	\$ 40.091,20
4	\$ 17.466,00	\$ 10.834,43	\$ 50.925,64
5	\$ 17.466,00	\$ 9.615,22	\$ 60.540,86
	VAN	27614,66	
	TIR	42%	
	TMAR	12%	
		0,12	

Tabla 8.6 Datos de cálculo de VAN, TIR

Años	Inversión	Actual	Acumulada
0	\$ (34.300,00)	\$ (34.300,00)	
1	\$ 17.466,00	\$ 15.594,64	\$ 15.594,64
2	\$ 17.466,00	\$ 13.923,79	\$ 29.518,43
3	\$ 17.466,00	\$ 12.431,95	\$ 41.950,38
4	\$ 17.466,00	\$ 11.099,96	\$ 53.050,34
5	\$ 17.466,00	\$ 9.910,68	\$ 62.961,02
	Costo/ Beneficio	\$ 3,34	

Tabla 8.7 Cálculo de Costo Beneficio

La Tabla 8.6 y 8.7 muestran que la inversión inicial de 34.300 dólares se recupera en el tercer año, por lo que se puede concluir que el proyecto es viable.

- Análisis de costos de un bus nuevo modificado en comparación con un bus híbrido existente en el mercado.

	CHASIS	CARROCERÍA	MODIFICACIÓN	COSTO TOTAL
COSTO	50000	40000	34300	124300

Tabla 8.8 Costo de un bus nuevo híbrido

La tabla 8.8 muestra los principales costos que representaría la adquisición de un bus en el mercado nacional, modificarlo y convertirlo en un bus híbrido.

Dado que en el mercado nacional no existen aún buses híbridos, y en vista que los mismos fabricantes son muy esquivos en cuanto a la información de características y costos de un bus híbrido que ya existen y están en pleno funcionamiento en otros países como: Brasil, España, Inglaterra, se puede mencionar que los costos en comparación con un bus tradicional son por lo general entre un 50 y 60 por ciento por encima de los tradicionales lo cual para nuestro medio sería que la unidad híbrida costaría entre 135.000 y 144.000 dólares. Lo cual en comparación al estudio presentado el proyecto en mención ahorraría al consumidor 10.000 y 20.000 dólares.

Años	Inversión	Actual	Acumulada
0	\$ (112.300,00)*	\$ (112.300,00)	
1	\$ 17.466,00	\$ 15.500,53	\$ 15.500,53
2	\$ 17.466,00	\$ 13.756,24	\$ 29.256,77
3	\$ 17.466,00	\$ 12.208,24	\$ 41.465,01
4	\$ 17.466,00	\$ 10.834,43	\$ 52.299,44
5	\$ 17.466,00	\$ 9.615,22	\$ 61.914,66
6	\$ 17.466,00	\$ 8.533,21	\$ 70.447,87
7	\$ 17.466,00	\$ 7.572,96	\$ 78.020,83
8	\$ 17.466,00	\$ 6.720,77	\$ 84.741,60
9	\$ 17.466,00	\$ 5.964,47	\$ 90.706,07
10	\$ 17.466,00	\$ 5.293,28	\$ 95.999,35
11	\$ 17.466,00	\$ 4.697,62	\$ 100.696,97
12	\$ 17.466,00	\$ 4.169,00	\$ 104.865,97
13	\$ 17.466,00	\$ 3.699,85	\$ 108.565,82
14	\$ 17.466,00	\$ 3.283,51	\$ 111.849,33
15	\$ 17.466,00	\$ 2.914,01	\$ 114.763,34
	VAN	2463,34	
	TIR	13%	
	TMAR	12%	
		0,12	

* Valor con beneficio del Plan RENOVA impulsado por el MIPRO

Tabla 8.9 Cálculo del TIR, VAN para un bus nuevo modificado

Años	Inversión	Actual	Acumulada
0	\$ (112.300,00)*	\$ (112.300,00)	
1	\$ 17.466,00	\$ 15.594,64	\$ 15.594,64
2	\$ 17.466,00	\$ 13.923,79	\$ 29.518,43
3	\$ 17.466,00	\$ 12.431,95	\$ 41.950,38
4	\$ 17.466,00	\$ 11.099,96	\$ 53.050,34
5	\$ 17.466,00	\$ 9.910,68	\$ 62.961,02
6	\$ 17.466,00	\$ 8.848,82	\$ 71.809,84
7	\$ 17.466,00	\$ 7.900,73	\$ 79.710,57
8	\$ 17.466,00	\$ 7.054,22	\$ 86.764,80
9	\$ 17.466,00	\$ 6.298,41	\$ 93.063,21
10	\$ 17.466,00	\$ 5.623,58	\$ 98.686,80
11	\$ 17.466,00	\$ 5.021,06	\$ 103.707,85
12	\$ 17.466,00	\$ 4.483,09	\$ 108.190,94
13	\$ 17.466,00	\$ 4.002,76	\$ 112.193,70
14	\$ 17.466,00	\$ 3.573,89	\$ 115.767,59
Costo/ Beneficio		\$ (1,76)	

* Valor con beneficio del Plan RENOVA impulsado por el MIPRO

Tabla 8.10 Cálculo del Costo Beneficio para un bus nuevo modificado

CAPITULO 9

ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. Técnicos

Los buses híbridos pueden reducir las emisiones contaminantes al utilizar menos combustible y operar el motor en un margen determinado de velocidades y cargas.

Sumado a esto, el freno regenerativo permite almacenar energía en las baterías que de no ser así se perdería al frenar. Todas estas características son propias de todos los vehículos híbridos pero el principal problema está en elegir la mejor configuración del tren de tracción de acuerdo al tipo de trabajo, uso, carga, entre otros factores que influyen de sobremanera en la elección.

Para el estudio y elaboración de éste proyecto ha sido seleccionado la configuración en serie por las siguientes razones:

- Proporciona un funcionamiento híbrido del bus en todo momento.
- Al utilizar la mayor cantidad de componentes del bus diesel convencional la modificación es menos costosa y compleja.
- El peso del bus no es incrementado en gran medida ya que existen componentes que al ser removidos aminoran en gran medida el peso como: el eje, el embrague, caja de cambios.

Con esta configuración y según los cálculos realizados:

- El consumo de combustible se reduciría en un 30 por ciento
- La emisión de partículas contaminantes se reducen de entre un 20 a 30 por ciento dependiendo del modo de conducción y estado del bus.
- Los gastos operacionales se reducen en un 30 a 40 por ciento lo cual implica un ahorro considerable para el propietario.

9.2. Económicos

A nivel mundial se estima que el costo de un bus híbrido sea un 50 por ciento más que el costo de un bus diesel convencional esto se debe principalmente a las siguientes causas:

- El sistema o unidad de control.- debido a que esta es el que gobierna todo el funcionamiento del bus híbrido.
- Las baterías.- los costos de éstas son muy elevados en vista que se busca almacenar energía en dispositivos de la manera más eficiente y en la mayor cantidad posible para que la autonomía del vehículo sea la más extensa, por esta razón esta tecnología es muy costosa.
- El motor eléctrico.- que es el que va a generar la propulsión del bus, este tiene que ser resistente y de las mejores características operacionales.
- La recuperación de inversiones en las investigaciones para llegar a crear esta tecnología.

Por otro lado, como se ha presentado en el presente proyecto es posible la modificación y conversión de un bus diesel en un bus híbrido, desde un punto de vista funcional y técnico, éste bus híbrido va a lograr que las emisiones y el consumo de combustible disminuyan de gran manera, y los costos como se presenta en el capítulo económico y financiero van de un 20 a 40 por ciento menos que un bus híbrido existente en el mercado.

El principal beneficio que se tiene al modificar un bus diesel es que la mayoría de componentes de éste son útiles y necesarios en el funcionamiento de un bus híbrido por lo que

solamente se adquiriría unos componentes adicionales exclusivos del sistema eléctrico de propulsión.

Actualmente en La Ley Régimen Tributario no consta que los repuestos o componentes propios para vehículos híbridos también gocen de la exoneración de impuestos por lo que en el presente proyecto se estiman valores de mercados internacionales, lo cual indica que estos costos de los componentes extras no excedan los \$ 25.000 dólares, pero de existir un beneficio en la exoneración de impuestos para estos componentes el gasto podría ser de entre un 30 y 40 por ciento menos.

Pero realizando la simulación de recuperación de inversión se estima que ésta se puede recuperar al tercer año de funcionamiento, porque el ahorro en costos operacionales esta entre un 20 a 30 por ciento menos que un bus diesel, y también la vida de servicio es mucho más extensa, lo cual indica que el proyecto es muy viable.

9.3. Sociales

El transporte urbano en nuestra sociedad es uno de los factores importantes para el desenvolvimiento de una población debido a que por medio de este, se trasladan una gran cantidad de personas a sus diferentes puntos de trabajo, hogares y demás lugares, por lo que este tipo de transporte tiene que cumplir con diferentes tipos de normas, características técnicas, seguridad, comodidad entre otras.

Pero uno de los aspectos más importantes es el comportamiento de este con el ambiente por lo que se puede mencionar que:

Los buses híbridos ofrecen reducidas emisiones de ciclo de conducción en relación con buses diesel convencional. Según datos obtenidos por proyectos en otros países se confirmaron significativos beneficios de economía de combustible. Debido a que los vehículos híbridos tienen el potencial para usar menos combustible, su uso puede también llevar a menores emisiones de gas de efecto invernadero comparado a los buses diesel convencional. Los primeros híbridos utilizados en otros países redujeron las emisiones contaminantes de calentamiento global desde un tercio hasta un 50 por ciento, y modelos posteriores pueden cortar las emisiones por un margen mayor.

A continuación se muestra en la figura 9.1 una proyección de la calidad del aire en Quito para los siguientes 5 años, si el 20 por ciento de los buses urbanos fuese modificado anualmente.

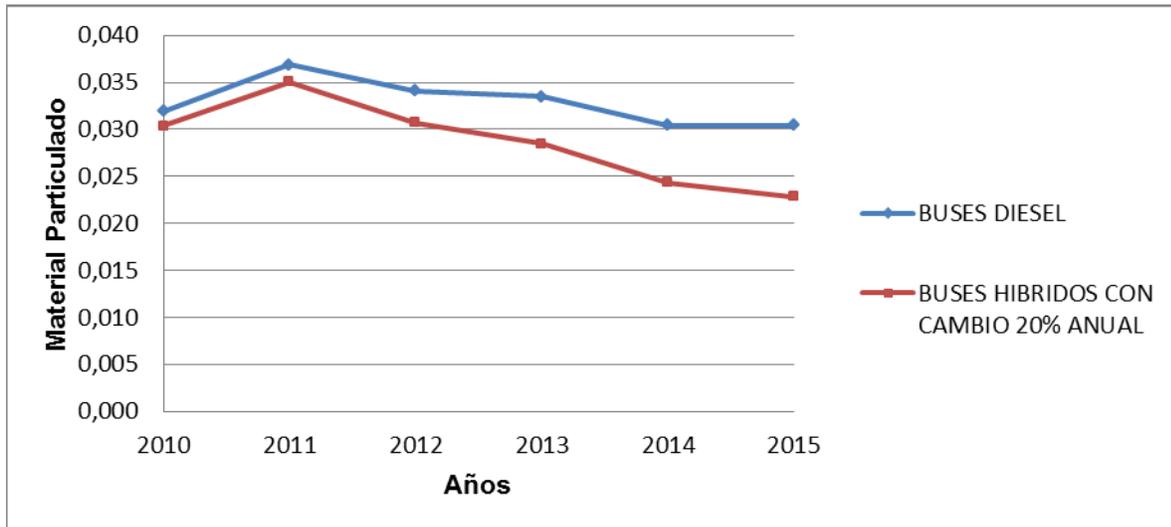


Figura 9.1 Material Particulado Contaminante anualmente

Como se puede observar la disminución en la cantidad de material particulado sería significativa y por lo mismo la calidad del aire mejoraría notablemente.

Por otro lado, la contaminación acústica que producen los buses híbridos también disminuye entre un 20 y 30 por ciento debido a que la fricción entre sus componentes es mucho menor porque tiene un régimen de trabajo reducido.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Una vez realizada la ingeniería conceptual de este proyecto se puede concluir que el modificar el tren de tracción de un bus convencional de transporte de pasajeros a una configuración híbrido-eléctrica en serie es viable ya que de los resultados obtenidos se demostró que el consumo de combustible, la emisión de material particulado por los gases de escape y los gastos operativos se redujeron considerablemente, logrando recuperar la inversión a corto plazo, obteniendo así un transporte más amigable con el ambiente y el usuario.
- Se identificó que los medios de transporte masivo de pasajeros son: bus urbano, interparroquial, escolar, intercantonal e interprovincial. De lo cual se concluye según datos de LA EMMOP (Empresa Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas) que aproximadamente el 79 por ciento está representado por buses urbanos, convirtiéndola en el medio más común y más contaminante.
- Dentro del transporte urbano existen: el bus tipo, bus especial, buses articulados de corredores exclusivos, para la realización del proyecto se eligió el bus tipo. Basándose en datos proporcionados por La CORPAIRE (Corporación para el mejoramiento del aire de Quito), de las pruebas de opacidad realizadas en la revisión vehicular, se obtuvo que el modelo más contaminante dentro de los más representativos es el Volkswagen 17.210 OD, el cuál fue objeto de estudio.
- En un sistema híbrido de transporte la mayor cantidad de elementos son los mismos utilizados en un sistema convencional, sin embargo los elementos dependerán de la configuración que se elija. Los elementos propios del sistema de tracción híbrido eléctrico son: Generador, Inversor, Unidad de Control, Baterías, Motor Eléctrico.

- En el presente proyecto se eligió la configuración del tren de tracción en serie, según esta configuración el elemento que se pueden modificar de un bus convencional es: El Motor de Combustión. Por otro lado, existen elementos que tienen que ser removidos como: el sistema de embrague, el eje de transmisión, caja de cambios.
- Los elementos que se implementaron en el tren de tracción son los propios de un sistema Híbrido, los cuales por ser parte de una tecnología nueva y en desarrollo tienen costos muy elevados principalmente las baterías y la Unidad de Control, la cual dependerá de las condiciones de operación y configuración elegida.
- Basándose en los cálculos realizados para el diseño del tren de tracción híbrido en serie se obtuvieron los parámetros de operación para la selección del motor eléctrico y demás componentes, en base a estos resultados se modificó el régimen de operación del motor de combustión interna para que el mismo trabaje en su régimen de operación más óptimo.
- Para el diseño del tren de tracción híbrido se tomaron en cuenta las condiciones de manejo en ciudad y autopista, en el sistema tradicional los picos a los cuales era sometido el motor de combustión eran frecuentes debido a que las condiciones de manejo variaban la velocidad del motor constantemente y esto derivaba en un consumo elevado de combustible, contaminación, y desgaste de todos sus elementos. Pero en el sistema híbrido en serie el motor de combustión trabaja a un determinado número de revoluciones cercanas a su punto óptimo de operación y donde el consumo de combustible sea el menor. Por lo que se puede concluir que el desempeño teórico del nuevo sistema cubre las necesidades y requerimientos del sistema tradicional pero con los beneficios descritos anteriormente.
- Este proyecto muestra que la contaminación generada por un sistema híbrido es 30 por ciento menor en cuanto a gases contaminantes, consumo de combustible y contaminación acústica, que el de un sistema tradicional, por lo que se entiende que si este sistema es adaptado a las unidades de transporte urbano se obtendría un gran beneficio para la comunidad.

- Al reducir el consumo de combustible no solamente se aminora la contaminación por los gases de escape, sino también la contaminación indirecta producida por la explotación de tierras para la extracción de combustibles fósiles, lo cual incentiva la investigación de nuevas fuentes de energía más limpias.

Recomendaciones

- Para la elección de la configuración del tren de tracción híbrido eléctrico se debe analizar el servicio que este va a prestar, ya que para que el sistema tenga un buen desempeño este es diseñado para satisfacer la demanda de energía necesaria para cumplir un tipo de trabajo.
- Se recuerda que para el diseño del tren de tracción híbrido eléctrico se debe analizar los modos de conducción en carretera y en paradas frecuentes “stop and go”, buscando siempre satisfacer las demandas de energía más críticas de ambos modos de conducción.
- Las estrategias de control dependen exclusivamente del diseñador, de su gusto y del modo de funcionamiento que el desee que el tren de tracción tenga, sin embargo es importante recordar que un sistema híbrido lo que busca es maximizar el aprovechamiento de energía por lo que se recomienda contar con un modo de funcionamiento de frenos regenerativos dentro de la estrategia de control y así recuperar la energía generada en el desaceleramiento y en el frenado.
- Los cálculos realizados para el diseño de este proyecto pueden variar dependiendo de las estrategias de control definidas por el diseñador, por lo que es importante realizar un recalcu lo del diseño del tren de tracción y verificar que los resultados alcanzados satisfagan los nuevos requerimientos establecidos.
- Los costos de mano de obra y materiales establecidos para las adaptaciones de los nuevos elementos del tren de tracción podrían variar debido a que son procedimientos fuera de lo normal, por lo que los proveedores que establecieron estos precios señalaron que los mismos solo se podrían determinar una vez terminado el trabajo, por lo que se sugiere proyectar un gasto mayor para estas modificaciones en caso de cualquier imprevisto.

- Establecidas las bases para el diseño de un tren de tracción híbrido y la modificación de un tren de tracción convencional se recomienda realizar proyectos que permitan aprovechar esta información y plasmar este tipo de proyectos en una realidad.
- Con el afán de seguir reduciendo los gases de escape y el consumo de combustible se recomienda analizar alternativas de combustibles como el biodiesel, el cual es perfectamente adaptable a este proyecto, con las modificaciones obligadas por el cambio de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

- EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; E. GAY, Sebastien; EMADI, Ali; “Modern Electric, Hibrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, theory, and design” CRC PRESS, Boca Raton- Florida 2005.
- SPERLING, Daniel; “Future Drive: Electric Vehicles and Sustainable Transportation” Island Press Washington, DC.
- EMADI, Ali; “Vehicular Electric Power Systems” Marcel Dekker, New York.
- BOSCH; “Manual de la Técnica del Automóvil” Editorial Reverté S.A., Barcelona.
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 038:2008, “Bus Urbano” Primera Edición.
- Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034:2008, “Elementos de Seguridad” Primera Edición.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 205:2002, “Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos” Primera Edición.
- Norma Ecuatoriana de calidad del aire-ambiente, 2003.
- Reglamento a la Ley Orgánica de Régimen Tributario Interno.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2202:2000, “Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Determinación de la Opacidad de Emisiones de Escape de motores de diesel mediante la prueba estática. Método de aceleración libre”.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2207:2002, “Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de diesel”.
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE 0960:1984 Vehículos automotores. Determinación de la potencia neta del motor.
- http://www.corpaire.org/siteCorpaire/rma_main.jsp
- http://www.emsat.gov.ec/zona_transportistas.html
- <http://www.emopq.gov.ec/web/guest/home>
- <http://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/insumosagropecuarios/ganaderos/vehic/mercedes-benz/buses/urbano-of-1721-59.htm>

- <http://www.vwcamionesybuses.com.pe/Modelos/Volksbus/volksbus2.htm>
- <http://www.volvobuses.com/bus/brazil/esbr/productos/urbanos/B7R%20urbano/Pages/especificaciones.aspx>
- <http://www.geindustrial.com>
- <http://www.scania.com/media/hybrid/>
- http://www.toyota.com.ec/HIBRIDOS/PRIUS_HIBRIDO/home_503.html
- <http://www.mecanicavirtual.org/>

ANEXOS

Anexo A

Cuadro de Mantenimiento de bus urbano

Anexo B

Cuadro de Costos de Mantenimiento Bus Urbano

ITEMS DE MANTENIMIENTO	Costo de mano de obra	Costo de Repuestos	Costo total
ACEITE DE CAJA	3,36	61,60	64,96
ACEITE DE DIRECCIÓN	0,00	22,40	22,40
ACEITE DE MOTOR	3,36	92,96	96,32
AMORTIGUADORES	22,40	229,54	251,94
BALLESTAS (4 HOJAS)	22,40	722,40	744,80
BANDA DEL VENTILADOR	6,72	41,44	48,16
BATERIAS	0,00	448,00	448,00
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA	380,80	0,00	380,80
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR	33,60	0,00	33,60
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES	22,40	436,80	459,20
CARROCERIA	2,51	501,76	504,27
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE	95,20	0,00	95,20
ENGRASE COMPLETO	0,00	26,88	26,88
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	0,00	12,00	12,00
FILTRO DE AIRE	2,80	44,80	47,60
FILTRO DE COMBUSTIBLE	0,00	16,80	16,80
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	2,80	24,64	27,44
FILTRO SECADOR DE AIRE	2,80	39,20	42,00
GOMAS DE SUSPENSIÓN	5,60	188,16	193,76
GOMAS DE DIRECCIÓN	5,60	108,64	114,24
LAVADO MOTOR/ CHASIS	44,80	0,00	44,80
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMATICO	0,00	0,00	0,00
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA	201,60	0,00	201,60
MANTENIMIENTO DE TURBO	40,32	901,60	941,92
NEUMÁTICOS	8,96	1344,00	1352,96
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN	16,80	453,60	470,40
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)	0,00	112,00	112,00
REFRIGERANTE DE MOTOR	0,00	67,20	67,20
REPARACION DE LA BOMBA	26,88	985,60	1012,48
REPARACIÓN DEL MOTOR	224,00	5101,60	5325,60
REPARACIÓN DE CAJA	168,00	1030,40	1198,40
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL	78,40	616,00	694,40
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE	28,00	224,00	252,00
RÓTULAS DE DIRECCIÓN	16,80	392,00	408,80
SISTEMA DE EMBRAGUE (JUEGO)	56,00	560,00	616,00
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	28,00	0,00	28,00
ZAPATAS DELANTERAS	22,40	89,60	112,00
ZAPATAS POSTERIORES	22,40	89,60	112,00

Anexo C

Cuadro y costo de mantenimiento de bus urbano de acuerdo al kilometraje recorrido

ITEMS DE MANTENIMIENTO	Costo total	KILOMETRAJE X 1000																								
		5	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	150	200	300	
ACEITE DE CAJA	64,96						64,96									64,96						64,96	64,96	64,96	64,96	
ACEITE DE DIRECCIÓN	22,40																							22,4		22,4
ACEITE DE MOTOR	96,32	96,32		96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	96,32	
AMORTIGUADORES	251,94															251,94										
BALLESTAS (4 HOJAS)	744,80																									
BANDA DEL VENTILADOR	48,16							48,16							48,16						48,16		48,16		48,16	
BATERIAS	448,00																448						448		448	
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA	380,80																						380,8		380,8	
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR	33,60											33,6										33,6	33,6	33,6	33,6	
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES	459,20																									
CARROCERIA	504,27																						504,3			
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE	95,20																	95,2								
ENGRASE COMPLETO	26,88			26,88		26,88		26,88		26,88		26,88		26,88		26,88		26,88		26,88		26,88	26,88	26,88	26,88	
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	12,00	12		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
FILTRO DE AIRE	47,60							47,6								47,6					47,6		47,6		47,6	
FILTRO DE COMBUSTIBLE	16,80		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8					
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	27,44	
FILTRO SECADOR DE AIRE	42,00							42							42					42			42		42	
GOMAS DE SUSPENSIÓN	193,76																193,8						193,8		193,8	
GOMAS DE DIRECCIÓN	114,24																114,2						114,2		114,2	
LA VADO MOTOR/ CHASIS	44,80			44,8		44,8		44,8		44,8		44,8	44,8		44,8		44,8		44,8		44,8		44,8		44,8	
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMÁTICO	0,00					0				0					0				0			0		0	0	
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA	201,60																									
MANTENIMIENTO DE TURBO	941,92																									
NEUMÁTICOS	1352,96															1352,96										
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN	470,40																									
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)	112,00																									
REFRIGERANTE DE MOTOR	67,20																					67,2		67,2	67,2	
REPARACION DE LA BOMBA	1012,48																									
REPARACIÓN DEL MOTOR	5325,60																									
REPARACIÓN DE CAJA	1198,40																									
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL	694,40																									
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE	252,00																									
RÓTULAS DE DIRECCIÓN	408,80																408,8						408,8		408,8	
SISTEMA DE EMBRAGUE (JUEGO)	616,00																						616		616	
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	28,00	28		28		28		28		28		28		28		28		28		28		28	28	28	28	
ZAPATAS DELANTERAS	112,00				112					112					112						112		112		112	
ZAPATAS POSTERIORES	112,00									112														112		112
COSTO TOTAL DE MANTENIMIENTO		163,8	44,24	235,4	152,6	347,4	217,5	373,2	152,6	459,4	152,6	334	197,4	440,4	1802,3	190,6	1427	509,8	197,4	328,4	197,4	513,2	3115	625,2	2835	

Anexo D

Cuadro de Mantenimiento General de Motores Eléctricos

COMPONENTE	DIARIAMENTE	SEMANALMENTE	CADA 3 MESES	ANUALMENTE	CADA 3 AÑOS
MOTOR COMPLETO	Inspección de ruido y de vibración		Drenar agua (si hay)	Ajustar tornillos	Desmontar motor completamente y revisar partes
BOBINAS DEL ESTATOR Y ROTOR				Medir resistencia de aislamiento	Inspeccionar fijación de bobinas, medir resistencia.
SOPORTES	Control de ruido	Engrasar según especificaciones			Inspección de soportes, pista de desliz.
CAJAS DE CONEXIÓN				Ajustar tornillos	Ajustar tornillos
ACOPLAMIENTO		Verificar fijación y alineamiento		Verificar fijación y alineamiento	Verificar fijación y alineamiento
DISPOSITIVOS DE MONITORIZACIÓN		Verificar valores de medición			Realizar pruebas de funcionamiento
AREA DE LAS ANILLAS		Limpieza		Limpieza	
ANILLAS		Limpieza			
ESCOBAS		Limpieza y sustitución cuando distancia sea mayor a 4mm			

Anexo E

Cuadro de Mantenimiento de Bus Híbrido de acuerdo al kilometraje recorrido

ITEMS DE MANTENIMIENTO	Número de kilómetros recorridos																								
	6500	10400	13000	19500	20800	26000	31200	32500	39000	41600	45500	52000	58500	62400	65000	71500	72800	78000	83200	84500	91000	93600	97500	104000	130000
ACEITE DE MOTOR	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
ENGRASE GENERAL			x			x			x			x			x			x			x			x	
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
FILTRO DE AIRE									x									x							
FILTRO DE COMBUSTIBLE		x			x		x			x		x		x			x		x			x			
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
FILTRO SECADOR DE AIRE									x																
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMATICO				x					x				x					x					x		
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE																								x	
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR															x										x
REFRIGERANTE DE MOTOR																									x
LLANTAS															x										x
ZAPATAS DELANTERAS				x					x				x					x						x	
ZAPATAS POSTERIORES									x									x							
BATERIAS																	x								
BANDA DEL VENTILADOR									x									x							
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)																								x	
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE																									
AMORTIGUADORES															x										x
GOMAS DE SUSPENSIÓN																	x								
GOMAS DE DIRECCIÓN																	x								
RÓTULAS DE DIRECCIÓN																	x								
BALLESTAS (4 HOJAS)																									
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN																									
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA																									
MANTENIMIENTO DE TURBO																									
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES																									
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA																									
REPARACION DE LA BOMBA																									
REPARACIÓN DEL MOTOR																									
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL																									
CAMBIO A CEITE DIRECCION																									
ARREGLO DE CARROCERIA																									
INSPECCIÓN DE BOBINAS	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
INSPECCIÓN DE SOPORTES DE MOTOR ELECTRICO	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
DISPOSITIVOS DE MONITORIZACIÓN														x											x
INSPECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
REVISIÓN Y AJUSTE DE ESCOBILLAS	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	
INSPECCIÓN DE RODAMIENTOS	x		x	x		x		x	x		x	x	x		x	x		x		x	x		x	x	

Anexo F

Cuadro y costo de mantenimiento de Bus Híbrido de acuerdo al kilometraje recorrido

ITEMS DE MANTENIMIENTO	Kilómetros Recorridos																								
	6500	10400	13000	19500	20800	26000	31200	32500	39000	41600	45500	52000	58500	62400	65000	71500	72800	78000	83200	84500	91000	93600	97500	104000	130000
ACITE DE MOTOR	92,96		92,96	92,96		92,96		92,96	92,96		92,96	92,96	92,96		92,96	92,96		92,96		92,96	92,96		92,96	92,96	
ENGRASE GENERAL			26,88			26,88		26,88			26,88				26,88			26,88		26,88				26,88	
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	12		12	12		12		12	12		12	12	12		12	12		12		12	12		12	12	
FILTRO DE AIRE								44,8										44,8							
FILTRO DE COMBUSTIBLE		16,8			16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		16,8		
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	24,64		24,64	24,64		24,64		24,64	24,64		24,64	24,64	24,64		24,64	24,64		24,64		24,64	24,64		24,64	24,64	
FILTRO SECADOR DE AIRE								39,2										39,2							
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMATICO				0				0				0						0					0		
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE																								0	
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR															0										0
REFRIGERANTE DE MOTOR																									67,2
LLANTAS															1344										1344
ZAPATAS DELANTERAS				89,6				89,6				89,6						89,6						89,6	
ZAPATAS POSTERIORES								89,6										89,6							
BATERIAS																	448								
BANDA DEL VENTILADOR								41,44										41,44							
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)																								112	
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	0		0	0		0		0	0		0	0	0		0	0		0		0	0		0	0	
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE																									
AMORTIGUADORES															229,5										229,54
GOMAS DE SUSPENSIÓN																	188,2								
GOMAS DE DIRECCIÓN																	108,6								
RÓTULAS DE DIRECCIÓN																	392								
BALLESTAS (4 HOJAS)																									
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN																									
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA																									
MANTENIMIENTO DE TURBO																									
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES																									
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA																									
REPARACIÓN DE LA BOMBA																									
REPARACIÓN DEL MOTOR																									
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL																									
CAMBIO ACEITE DIRECCION																									
ARREGLO DE CARROCERIA																									
INSPECCIÓN DE BOBINAS	0		0	0		0		0	0		0	0	0		0	0		0		0	0		0	0	
INSPECCIÓN DE SOPORTES DE MOTOR ELECTRICO	0		0	0		0		0	0		0	0	0		0	0		0		0	0		0	0	
DISPOSITIVOS DE MONITORIZACIÓN														0											0
INSPECCIÓN DEL NIVEL DE AISLAMIENTO	0		0	0		0		0	0		0	0	0		0	0		0		0	0		0	0	
REVISIÓN Y AJUSTE DE ESCOBIILLAS	10		10	10		10		10	10		10	10	10		10	10		10		10	10		10	10	
INSPECCIÓN DE RODAMIENTOS	0		0	0		0		0	0		0	0	0		0	0		0		0	0		0	0	
	139,6	16,8	166,5	229,2	16,8	166,5	16,8	139,6	471,1	16,8	139,6	183,3	229,2	16,8	1740	139,6	1154	471,1	16,8	139,6	166,5	16,8	139,6	368,08	1641

Anexo G

Cuadro de Mantenimiento e ingreso de parámetros de bus urbano obtenido en el programa para determinar La Vida Útil de Transporte Público realizado por la ESPE

INGRESO DE PARÁMETROS

INGRESE VALOR DE LA UNIDAD (\$) \$ 90.000,00
 INGRESE KM/DÍA 300
 INGRESE DÍAS TRABAJADOS AL AÑO 220
 Km RECORRIDO AL AÑO 66.000
 INFLACIÓN (%) 8,8%



COMISIÓN NACIONAL
 DEL TRANSPORTE TERRESTRE,
 TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL

ITEMS	KILÓMETROS	KILÓMETROS	MANO DE OBRA(\$)	M. O. (\$)	REPUESTOS (\$)	REPUESTOS (\$)
ACEITE DE MOTOR	5000	5000	3,36	3,36	92,96	92,96
ACEITE DE CAJA	25000	25000	3,36	3,36	61,60	61,60
ENGRASE GENERAL	5000	5000	0,00	0,00	26,88	26,88
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	5000	5000	0,00	0,00	12,00	12,00
FILTRO DE AIRE	30000	30000	2,80	2,80	44,80	44,80
FILTRO DE COMBUSTIBLE	8000	8000	0,00	0,00	16,80	16,80
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	5000	5000	2,80	2,80	24,64	24,64
FILTRO SECADOR DE AIRE	30000	30000	2,80	2,80	39,20	39,20
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMÁTICO	20000	20000	0,00	0,00	0,00	0,00
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE	80000	80000	95,20	95,20	0,00	0,00
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR	50000	50000	33,60	33,60	0,00	0,00
REFRIGERANTE DE MOTOR	100000	100000	0,00	0,00	67,20	67,20
LLANTAS	64000	64000	8,96	8,96	1344,00	1344,00
ZAPATAS DELANTERAS	20000	20000	22,40	22,40	89,60	89,60
ZAPATAS POSTERIORES	40000	40000	22,40	22,40	89,60	89,60
SISTEMA DE EMBRAQUE (JUEGO)	150000	150000	56,00	56,00	560,00	560,00
BATERIAS	75000	75000	0,00	0,00	448,00	448,00
BANDA DEL VENTILADOR	30000	30000	6,72	6,72	41,44	41,44
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)	104000	104000	0,00	0,00	112,00	112,00
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	5000	5000	28,00	28,00	0,00	0,00
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE	640000	640000	28,00	28,00	224,00	224,00
AMORTIGUADORES	64000	64000	22,40	22,40	229,54	229,54
GOMAS DE SUSPENSIÓN	75000	75000	5,60	5,60	188,16	188,16
GOMAS DE DIRECCIÓN	75000	75000	5,60	5,60	108,64	108,64
RÓTULAS DE DIRECCIÓN	75000	75000	16,80	16,80	392,00	392,00
BALLESTAS (4 HOJAS)	500000	500000	22,40	22,40	722,40	722,40
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN	400000	400000	16,80	16,80	453,60	453,60
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA	140000	140000	201,60	201,60	0,00	0,00
MANTENIMIENTO DE TURBO	250000	250000	40,32	40,32	901,60	901,60
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES	250000	250000	22,40	22,40	436,80	436,80
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA	150000	150000	380,80	380,80	0,00	0,00
REPARACIÓN DE LA BOMBA	480000	480000	26,88	26,88	985,60	985,60
REPARACIÓN DEL MOTOR	800000	800000	224,00	224,00	5101,60	5101,60
REPARACIÓN DE CAJA	720000	720000	168,00	168,00	1030,40	1030,40
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL	720000	720000	78,40	78,40	616,00	616,00
LAVADO MOTOR/ CHASIS	10000	10000	44,80	44,80	0,00	0,00
CAMBIO ACEITE DIRECCION	150000	150000	0,00	0,00	22,40	22,40
ARREGLO DE CARROCERIA	150000	150000	2,51	2,51	501,76	501,76

IR ABAJO

IR A ARRIBA

VOLVER A MENU PRINCIPAL

RESULTADOS

Anexo I

Cuadro de Mantenimiento, costos de mano de obra y repuestos de acuerdo al kilometraje recorrido, sugerido para un bus híbrido obtenido en el programa para determinar La Vida Útil de Transporte Público realizado por la ESPE

INGRESO DE PARÁMETROS

INGRESE VALOR DE LA UNIDAD (\$) \$ 90.000,00

INGRESE KM/DÍA 300

INGRESE DÍAS TRABAJADOS AL AÑO 220

Km RECORRIDO AL AÑO 66.000

INFLACIÓN (%) 8,8%



COMISIÓN NACIONAL
DEL TRANSPORTE TERRESTRE,
TRANSITO Y SEGURIDAD VIAL

ITEMS	KILÓMETROS	KILÓMETROS	MANO DE OBRA(\$)	M. O. (\$)	REPUESTOS (\$)	REPUESTOS (\$)
ACEITE DE MOTOR	6500	6500	3,36	3,36	92,96	92,96
ACEITE DE CAJA	0	0	3,36	3,36	61,60	61,60
ENGRASE GENERAL	6500	6500	0,00	0,00	26,88	26,88
FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	6500	6500	0,00	0,00	12,00	12,00
FILTRO DE AIRE	39000	39000	2,80	2,80	44,80	44,80
FILTRO DE COMBUSTIBLE	10400	10400	0,00	0,00	16,80	16,80
FILTRO SEPARADOR DE AGUA	6500	6500	2,80	2,80	24,64	24,64
FILTRO SECADOR DE AIRE	39000	39000	2,80	2,80	39,20	39,20
MANTENIMIENTO SISTEMA NEUMÁTICO	26000	26000	0,00	0,00	0,00	0,00
CHEQUEO DE COMPRESOR DE AIRE	104000	104000	95,20	95,20	0,00	0,00
CALIBRACIÓN DE VÁLVULAS MOTOR	65000	65000	33,60	33,60	0,00	0,00
REFRIGERANTE DE MOTOR	130000	130000	0,00	0,00	67,20	67,20
LLANTAS	64000	64000	8,96	8,96	1344,00	1344,00
ZAPATAS DELANTERAS	20000	20000	22,40	22,40	89,60	89,60
ZAPATAS POSTERIORES	40000	40000	22,40	22,40	89,60	89,60
SISTEMA DE EMBRAQUE (JUEGO)	0	0	56,00	56,00	560,00	560,00
BATERIAS	75000	75000	0,00	0,00	448,00	448,00
BANDA DEL VENTILADOR	39000	39000	6,72	6,72	41,44	41,44
RECTIFICACIÓN TAMBORES (JUEGO)	104000	104000	0,00	0,00	112,00	112,00
SISTEMA ELÉCTRICO (MTO)	6500	6500	28,00	28,00	0,00	0,00
REPARACIÓN MOTOR DE ARRANQUE	640000	640000	28,00	28,00	224,00	224,00
AMORTIGUADORES	64000	64000	22,40	22,40	229,54	229,54
GOMAS DE SUSPENSIÓN	75000	75000	5,60	5,60	188,16	188,16
GOMAS DE DIRECCIÓN	75000	75000	5,60	5,60	108,64	108,64
RÓTULAS DE DIRECCIÓN	75000	75000	16,80	16,80	392,00	392,00
BALLESTAS (4 HOJAS)	500000	500000	22,40	22,40	722,40	722,40
PINES Y BOCINES DE DIRECCIÓN	400000	400000	16,80	16,80	453,60	453,60
MANTENIMIENTO DE CUBOS DE RUEDA	140000	140000	201,60	201,60	0,00	0,00
MANTENIMIENTO DE TURBO	325000	325000	40,32	40,32	901,60	901,60
CAMBIO DE TOBERAS DE INYECTORES	325000	325000	22,40	22,40	436,80	436,80
CALIBRACIÓN DE LA BOMBA	195000	195000	380,80	380,80	0,00	0,00
REPARACION DE LA BOMBA	624000	624000	26,88	26,88	985,60	985,60
REPARACIÓN DEL MOTOR	1040000	1040000	224,00	224,00	5101,60	5101,60
REPARACIÓN DE CAJA	0	0	168,00	168,00	1030,40	1030,40
REPARACIÓN DEL DIFERENCIAL	720000	720000	78,40	78,40	616,00	616,00
LAVADO MOTOR/ CHASIS	10000	10000	44,80	44,80	0,00	0,00
CAMBIO ACEITE DIRECCION	150000	150000	0,00	0,00	22,40	22,40
ARREGLO DE CARROCERIA	150000	150000	2,51	2,51	501,76	501,76

IR ABAJO

IR A ARRIBA

VOLVER A MENÚ PRINCIPAL

Anexo J

Cálculos

DISEÑO DEL TREN DE TRACCIÓN HIBRIDO ELECTRICO EN SERIE

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

PARÁMETROS

$M_v := 16800\text{kg}$	Masa total del vehículo
$f_r := 0.01$	Coefficiente de resistencia a rodar
$C_d := 0.7$	Coefficiente de resistencia aerodinámico
$A_f := 7.5\text{m}^2$	Área Frontal del Vehículo
$\eta_f := 0.9$	Eficiencia de la Transmisión (marcha única)
$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Gravedad
$\rho_a := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del aire

Dimensionamiento del Motor de tracción

$t_a := 22\text{s}$	Tiempo de Aceleración de 0 a 40 km/h
$V_b := 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad Base
$V_f := 11.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad Final
$\delta_k := 1.04 + [0.0025(\eta_f)]^2$	Factor de Masa del Vehículo
$\delta_k = 1.04$	

$$P_t := \frac{\delta_k \cdot M_v}{2t_a} \cdot (V_f^2 + V_b^2) + \left(\frac{2}{3} \cdot M_v \cdot g \cdot f_r \cdot V_f \right) + \frac{1}{5} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_f^3$$

Potencia Nominal del motor de Tracción

$$P_t = 62944.49\text{W}$$

Diseño de la relación de la transmisión

$\eta_{m\max} := 2600 \frac{1}{\text{s}}$	Revoluciones Máxima del motor
$r := 0.5715\text{m}$	Radio de la rueda
$V_{\max} := 24 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad máxima del vehículo (según FTP 75 urban)
$i_g := \frac{\pi \cdot \eta_{m\max} r}{30V_{\max}}$	Relación de la Transmisión
$i_g = 6.48$	

Verificación del rendimiento de la aceleración

$$T_p := 657\text{N}\cdot\text{m}$$

Torque de salida de la fuente de energía

$$i_o := 1$$

Relación de transmisión (entre entrada y salida)

$$F_t := \frac{T_p \cdot i_g \cdot i_o \cdot \eta_f}{r}$$

Fuerza de tracción

$$F_t = 6708.09\text{N}$$

$$V_m := 22.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad máxima permitida de circulación en ciudad para buses

$$F_w := \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_d \cdot (V_m)^2$$

Fuerza aerodinámica

$$F_w = 1539.88\text{N}$$

$$d := \frac{F_t - F_w}{M_v \cdot g}$$

Factor de rendimiento del vehículo

$$d = 0.031$$

$$\sin \alpha := \left(\frac{d - fr \cdot \sqrt{1 - d^2 + fr^2}}{1 + fr^2} \right)$$

$$\sin \alpha = 0.021$$

$$\alpha := \text{asin}(\sin \alpha)$$

$$\alpha = 0.02 \quad \text{Ángulo de pendiente}$$

Dimensionamiento del MCI

$$\eta_t := 0.85$$

$$V_1 := 27.1 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Máxima velocidad en carretera (según FTP75 highway)}$$

$$P_{eg} := \frac{V_1}{\eta_t \cdot \eta_f} \cdot \left(M_v \cdot g \cdot fr + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_1^2 \right)$$

$$P_{eg} = 140314.54\text{W}$$

Potencia Media

$$V_0 := 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_f = 11.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D := 402.336 \text{ m} \quad \text{Distancia de prueba 1/4 milla}$$

$$t := 22 \text{ s} \quad \text{Tiempo de (0-40)km/h bus urbano Norma INEN}$$

$$a := \frac{g}{\delta k} \cdot (d - fr)$$

$$a = 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$V_2 := 7.75 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_{ave} := \frac{1}{t} \int_0^t \left[(Mv \cdot g \cdot fr \cdot V_2) + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_2^3 \right) + (\delta k \cdot Mv \cdot V_2 \cdot a) \right] dt$$

$$P_{ave} = 41519.838 \text{ W}$$

Dimensionamiento de la Fuente de Energía

$$P_{fe} := \frac{P_t}{\eta_t} - P_{eg}$$

$$P_{fe} = -66262.2 \text{ W} \quad \text{Energía sobrante}$$

$$P_b := -P_{fe}$$

$$P_b = 66262.2 \text{ W} \quad \text{Mínima Capacidad de la Fuente de energía}$$

Modo de Tracción Híbrido

$$P_d := P_{eg} + P_b$$

$$P_d = 206576.74W \quad \text{Potencia demandada por el conductor}$$

Modo de Tracción por Batería

$$P_d := P_b$$

$$P_d = 66262.2W \quad \text{Potencia demandada por el conductor}$$

Modo de Tracción por Motor / Generador

$$P_d := P_{eg}$$

$$P_d = 140314.54W \quad \text{Potencia demandada por el conductor}$$

Modo de Carga de Batería por Motor Generador

$$P_d := P_{eg} - P_b$$

$$P_d = 74052.34W \quad \text{Potencia demandada por el conductor}$$

DISEÑO DEL TREN DE TRACCION HIBRIDO ELECTRICO EN PARALELO

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

PARÁMETROS

$A_f := 7.5$ (m ²)	Área Frontal
$M_v := 1680$ (Kg)	Masa total del vehículo
$f_r := 0.01$	Coefficiente de resistencia al rodamiento
$C_d := 0.7$	Coefficiente de resistencia aerodinámica
$T_p := 657$ (Nm)	@1700 rpm Torque de salida del motor
$g := 9.81$ (m/s ²)	Gravedad
$\rho_a := 1.20$ (Kg/m ³)	Densidad del aire
$r_d := 0.5715$ (m)	Radio de la rueda
$t_a := 22$ (s)	Tiempo de aceleración 0-60 km/h
$V_b := 0$ (m/s)	
$V_f := 11.11$ (m/s)	(40km/h)
$\alpha := 40$	Angulo de carretera apto para la circulación en Quito
$i := \sin(\alpha)$	
$i = 0.745$	
$N_{tf} := 0.9$	Relación combinada entre caja y grupo
$\delta := 1.04 + 0.0025 N_{tf}^2$	Formula 3.16 Libro "Tratado de automóviles"
$\delta = 1.042$	Constante de factor de masa (Relación entre masas)
$V_{wv} := 7.75$ (m/s)	Velocidad constante capítulo 7 tabla 7.1 de FTP 75
$n_{tm} := 0.9$	Eficiencia de transmisión a ruedas
$n_{te} := 0.9$	Eficiencia de transmisión de motor a ruedas

DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR DE TRACCION

$$P_t := \left(\frac{\delta \cdot M_v}{2 \cdot t_a} \right) \cdot (V_f^2 + V_b^2) + \left(\frac{2}{3} \cdot M_v \cdot g \cdot f_r \cdot V_f \right) + \left(\frac{1}{5} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot V_f^3 \right)$$

$$P_t = 63043.856 \quad \text{W}$$

POTENCIA DE CARGA MEDIA

$V1 := 27.1$ Velocidad máxima según FTP75

$i_x := 0.05$ Mínima inclinación

$$Pe := \frac{V1}{1000nte} \cdot \left[(Mv \cdot g \cdot fr) + \left[\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot Cd \cdot Af \cdot (V1)^2 \right] + (Mv \cdot g \cdot i) \right]$$

$Pe = 367.412$ (Kw) Potencia de motor CI a Velocidad constante

POTENCIA MEDIA

Nota. según el reglamento de tránsito Ecuatoriano la velocidad máxima permitida para el transporte urbano es de 40km/h

$Vf := 11.11$ m/s

$Vo := 0$ m/s

$D := 402.33$ m Distancia de prueba 1/4 milla

$t := 22$ (s) Tiempo de (0-40)km/h bus urbano Norma INEN

$ig := 9.01$ Relación de transmisión bus normal

$Tp := 657$ (Nm) Torque de salida de la fuente de energía

$io := 1$ Relación de transmisión (entre entrada y salida)

$Ft := \frac{Tp \cdot ig \cdot io \cdot nte}{rd}$ Fuerza de tracción

$Ft = 9322.157$

$Vm := 22.11$ $\left(\frac{m}{s} \right)$ Velocidad máxima permitida de circulación en ciudad para buses

$Fw := \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot Af \cdot Cd \cdot (Vm)^2$ Fuerza aerodinámica

$Fw = 1539.884$

$d := \frac{Ft - Fw}{Mv \cdot g}$

$d = 0.047$

$a := \frac{g}{\delta} \cdot (d - fr)$ $a = 0.35$ (m/s²)

$T := 22$ (s) Tiempo de análisis de 0-40 km/h

$$Pave := \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[(Mv \cdot g \cdot fr \cdot V) + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot Cd \cdot Af \cdot V^3 \right) + (\delta \cdot Mv \cdot V \cdot a) \right] dt$$

$Pave = 61778.894$ W

CONDICION DE FUNCIONAMIENTO

$P_{ave} > P_e$ Si cumple

POTENCIA MEDIA CON MAX. ACELERACIÓN

$P_{max} := P_e$

$$P_{max_ace} := \frac{1}{T} \cdot \int_0^T P_{max} dt$$

$P_{max_ace} = 367.412$ KW

POTENCIA A UN T_a , V_o , V_f ESPECIFICOS

$$P_m := \frac{\delta \cdot Mv}{2 \cdot ntm \cdot t_a} \cdot (V_f^2 + V_b^2)$$

$P_m = 54565.778$ (W)

POTENCIA RESTANTE PARA ACELERAR EL VEHICULO

$P_e = P_r$ Consideración Cap.2.8.2

$P_r := 1073.27$ (w)

$P_e := 54565.778$ (w)

$t_a = 22$ (s)

$t_i := 0$ (s)

$$P_{ea} := \frac{1}{t_a - t_i} \cdot \int_{t_i}^{t_a} (P_e - P_r) dt$$

$P_{ea} = 53492.507$ W

Dimensionamiento de la Fuente de Energía

$$P_{fe} := \frac{P_t}{ntm}$$

$P_{fe} = 70048.729$ Energía sobrante

$P_b := P_{fe}$

$P_b = 70048.729$ Mínima Capacidad de la Fuente de energía

MODO DE TRACCION HIBRIDO

POTENCIA DEMANDADA MAS CRITICA

$$P_{fe} := \frac{P_t}{\eta_{tm}} - P_e$$

$$P_{fe} = 15482.951 \quad \text{w}$$

$$P_{demandada} := P_e + P_{fe}$$

$$P_{demandada} = 70048.729 \quad \text{kw}$$

2. MODO DE TRACCION SOLO CON ENERGIA DE BATERÍAS

$$P_{demandada} := P_{fe}$$

$$P_{demandada} = 15482.951 \quad \text{w}$$

3. MODO DE TRACCION ALIMENTADO UNICAMENTE POR MCI

$$P_{demandada} := P_e$$

$$P_{demandada} = 54565.778 \quad \text{w}$$