

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCION

MAESTRÍA EN INGENIERIA VIAL



Propuesta de

Evaluación de un sistema de Transporte Personal Rápido (PRT) entre los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados, en la provincia de San José de Costa Rica, como caso de estudio

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Máster en Ingeniería Vial
grado académico de Maestría

Realizado por:

Mario Grant Sáenz

Cartago, junio de 2020

ACTA DE APROBACIÓN DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Con fundamento en lo establecido por la Maestría en Ingeniería Vial, el Tribunal Examinador del Proyecto Final de Graduación denominado:

Evaluación de un sistema de Transporte Personal Rápido (PRT) entre los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados, en la provincia de San José de Costa Rica, como caso de estudio.

Y, habiendo analizado el resultado del trabajo presentado por el(los) estudiante(s):

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. de carné
GRANT	SAENZ	MARIO HUMBERTO	2015183123

Se emite el siguiente dictamen el día 03 de junio del 2020:

<input checked="" type="checkbox"/> Aprobado	<input type="checkbox"/> Reprobado <input type="checkbox"/> Se recomienda <input type="checkbox"/> No se recomienda <i>Brindarle una nueva oportunidad para Defensa Pública.</i> Nueva fecha: _____
---	---

Dando fé de lo acá expuesto firmamos,

<p>HENRY HERNANDEZ VEGA (FIRMA) Firmado digitalmente por HENRY HERNANDEZ VEGA (FIRMA) Fecha: 2020.06.04 20:58:24 -06'00'</p> <p>Ing. Henry Hernández Vega, Profesor Tutor</p>	<p>CARLOS FEDERICO CORONADO DEJUK (FIRMA) Firmado digitalmente por CARLOS FEDERICO CORONADO DEJUK (FIRMA) Fecha: 2020.06.05 23:12:15 -06'00'</p> <p>Ing. Carlos Coronado Dejuk, Profesor Lector</p>
<p>GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA) Firmado digitalmente por GUSTAVO ADOLFO ROJAS MOYA (FIRMA) Fecha: 2020.06.04 07:53:17 -06'00'</p> <p>Ing. Gustavo Rojas Moya, Director Escuela de Ingeniería en Construcción</p>	<p>GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA) Firmado digitalmente por GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA) Fecha: 2020.06.04 07:45:00 -06'00'</p> <p>Ing. Giannina Ortiz Quesada, Coordinadora Unidad de Posgrado</p>

“Muchos especialistas coinciden en la necesidad de priorizar el transporte público. Pero algunas medidas necesarias difícilmente serán pacíficamente aceptadas por la sociedad sin una mejora sustancial de ese transporte, que en muchas ciudades significa un trato indigno a las personas debido a la aglomeración, a la incomodidad o a la baja frecuencia de los servicios y a la inseguridad.”

Papa Francisco, en su encíclica por el Ambiente, Laudato si' Sobre el Cuidado de la Casa Común, 24 de mayo de 2015.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS	10
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ABREVIATURAS	20
RESUMEN	22
ABSTRACT	23
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	24
1.1. Antecedentes	24
1.2. Planteamiento del problema	25
1.3. Justificación del Estudio	28
1.4. El sistema de Transporte Personal Rápido	30
1.5. Objetivos	36
1.5.1. Objetivo General	36
1.5.2. Objetivos Específicos:	36
1.5.2.1. Objetivo Específico 1	36
1.5.2.2. Objetivo Específico 2	36
1.5.2.3. Objetivo Específico 3	36
1.5.2.4. Objetivo Específico 4	36
1.5.2.5. Objetivo Específico 5	36
1.6. Alcance y limitaciones	37
1.6.1. Alcance	37

1.6.2.	Limitaciones	37
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO		38
2.1.	Concepto de Transporte	38
2.1.1.	Modos de transporte terrestre	38
2.1.2.	Colas	39
2.1.3.	Análisis de carreteras	39
2.1.3.1.	Capacidad de una carretera continua	40
2.2.	Cinemática	43
2.2.1.	Movimiento rectilíneo uniforme	43
2.2.2.	Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado	43
2.2.3.	Movimiento rectilíneo con variación de la aceleración.....	44
2.2.4.	Control de vehículos automáticos en una vía	45
2.3.	El sistema de Transporte Personal Rápido	47
2.3.1.	Definición de sistemas de Transporte Personal Rápido	48
2.3.2.	Diferenciación entre sistemas automáticos de transporte publico	48
2.3.2.1.	Transbordo de Circuito Cerrado.....	48
2.3.2.2.	Transporte Grupal Rápido	51
2.3.3.	Historia de los sistemas PRT	52
2.3.3.1.	Legislación y apoyo gubernamental	52
2.3.3.2.	Consolidación institucional del transporte en los EEUU y desarrollo de sistemas PRT.....	58
2.3.3.3.	Sistemas desarrollados de Transporte Personal Rápido	59

2.3.4.	¿Por qué no se han construido más sistemas PRT?.....	102
2.3.5.	Estado del arte y PRT de alta capacidad	104
2.3.5.1.	Capacidad del PRT.....	104
2.3.5.2.	Suspensión, propulsión, rodamientos, sistemas de guía y frenado.....	105
2.3.5.3.	Condiciones de seguridad.....	111
2.3.5.4.	Sistemas PRT en desarrollo	114
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....		115
3.1.	Objetivo Específico 1	115
3.1.1.	Conceptualización del sistema de transporte PRT para la GAM.....	115
3.1.1.1.	Definir las características del sistema de transporte PRT, mediante investigación bibliográfica y un proceso de selección de alternativas.....	115
3.1.2.	Calcular la capacidad de transporte de pasajeros del sistema PRT, de acuerdo con las características definidas en el punto 3.1.1.1.....	118
3.1.3.	Definir el recorrido del sistema PRT.	118
3.1.4.	Modelar una sección de la red PRT con el programa PARAMICS o SIMTRAFFIC, para revisar la correcta interacción entre los diferentes vehículos.	118
3.2.	Objetivo Específico 2	118
3.3.	Objetivo Específico 3	119
3.4.	Objetivo Específico 4	119
3.5.	Objetivo Específico 5	120
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....		121
4.1.	Conceptualización del sistema de transporte PRT para la GAM	121

4.1.1.	Selección de componentes del sistema PRT.....	121
4.1.1.1.	Vía exclusiva para los vehículos PRT	121
4.1.1.2.	Estaciones	130
4.1.1.3.	Resumen de características del sistema PRT.	135
4.2.	Capacidad del sistema PRT.....	137
4.2.1.	Velocidades de operación.....	137
4.2.2.	Comodidad de los pasajeros	138
4.2.3.	Separación entre los vehículos.....	143
4.2.3.1.	Condiciones de seguridad.....	147
4.2.4.	Capacidad de la vía continua PRT	153
4.2.5.	Capacidad de las estaciones PRT.....	159
4.2.5.1.	Acceso a las estaciones.....	164
4.2.5.2.	Configuración típica de estaciones.....	167
4.2.6.	Capacidad teórica del Sistema PRT	169
4.2.7.	Capacidad teórica de una carretera	169
4.2.8.	Comparación entre la capacidad de una carretera y el sistema PRT.....	170
4.3.	Trazado del sistema PRT	171
4.4.	Mercado de usuarios potenciales del Sistema PRT	179
4.4.1.	Matriz de generación de viajes (Matriz Origen-Destino).....	179
4.5.	Tamaño de la flotilla.....	183
4.6.	Estimación de costos.....	185
4.6.1.	Costos del sistema PRT.....	185

4.6.1.1.	Costo de componentes básicos.....	186
4.6.1.2.	Equipo especial	186
4.6.1.3.	Costo de cada tipo de estación.	187
4.6.1.4.	Costo por kilómetro del sistema PRT.....	189
4.6.1.5.	Costo de mantenimiento y operación de sistemas PRT	190
4.6.2.	Costo de financiamiento del sistema PRT.....	192
4.6.2.1.	Condiciones de financiación.....	192
4.6.2.2.	Distribución modal.....	194
4.6.2.3.	Número proyectado de viajes del sistema PRT.....	197
4.6.3.	Costo de construcción de una carretera.....	200
4.6.3.1.	Costo de la obra civil.....	201
4.6.3.2.	Costo del derecho de vía.....	201
4.6.3.3.	Costo total de la carretera	202
4.6.4.	Comparación de costos entre una carretera y el sistema PRT	202
4.6.4.1.	Comparación entre el costo de construir una carretera y construir el sistema PRT 202	
4.6.4.2.	Costo de mantenimiento de una carretera.....	203
4.6.4.3.	Comparación entre el costo de mantener una carretera y mantener el sistema PRT	203
4.7.	Vehículos particulares que dejarían de circular.....	206
4.8.	Modelación de una sección de la red PRT	207
4.9.	Comparación del sistema PRT con otros sistemas de transporte.....	212

4.9.1.	Capacidad de otros sistemas de transporte.	212
4.9.2.	Comparación de costos.....	213
4.9.3.	Comparación de modos.	214
4.9.4.	Ámbitos de uso del sistema PRT	216
4.9.5.	Promoción de viajes multimodales	217
4.9.6.	Aplicación móvil.....	217
4.9.7.	El uso del sistema PRT como alimentador de otros modos de transporte.	218
4.9.8.	Creación de estaciones en sitios públicos y privados.....	218
4.9.9.	Conocimiento de los patrones de viajes	219
4.9.10.	Transporte de mercancías	219
4.9.11.	Uso de la red con vehículos de emergencia.	219
4.9.12.	Crecimiento orgánico y planificado de la red PRT	220
4.9.12.1.	Etapa 1. Desarrollo de prototipo operacional de la Red PRT.	220
4.9.12.2.	Etapa 2. Inicio de aplicación comercial.....	220
4.9.12.3.	Etapa 3. Calibración paulatina de los parámetros de funcionamiento.....	220
4.9.12.4.	Etapa 4. Expansión de la red entre nodos importantes.	221
4.9.12.5.	Etapa 5. Expansión hacia nuevos nodos primarios.	221
4.9.12.6.	Etapa 6. Integración intermodal.	221
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		227
5.1.	Conclusiones	227
5.1.1.	Capacidad de transporte del sistema PRT	227
5.1.2.	Mercado de usuarios potenciales	227

5.1.3.	Cantidad de vehículos particulares que pueden dejar de circular	227
5.1.5.	Costo de construcción del sistema PRT	228
5.1.6.	Estrategias de uso del sistema PRT.....	228
5.2.	Recomendaciones	230
5.2.1.	Inversión en el desarrollo del sistema PRT en Costa Rica	230
5.2.3.1.	Sector inicial del sistema PRT	231
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		232

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Capacidad de los sistemas PRT instalados.	104
Cuadro 2. Capacidad de los sistemas PRT no construidos.	104
Cuadro 3. Tiempo de activación de frenado de los sistemas PRT desarrollados.	109
Cuadro 4. Sistemas PRT en proceso de desarrollo.	114
Cuadro 5. Ejemplo de evaluación de opciones para un componente del sistema PRT.	115
Cuadro 6. Evaluación de opciones para la ubicación del carro en la vía PRT.	117
Cuadro 7. Evaluación de opciones para el tipo de material de la vía PRT.	122
Cuadro 8. Evaluación de opciones para el tipo de viga de la vía PRT.	124
Cuadro 9. Evaluación de opciones para la ubicación del carro en la vía PRT.	127
Cuadro 10. Evaluación de opciones para los tipos de vehículo del sistema PRT.	128
Cuadro 11. Evaluación de opciones para la ubicación de estaciones PRT.	132
Cuadro 12. Evaluación de opciones para el tipo de estación PRT.	135
Cuadro 13. Niveles de aceleración para varios vehículos de pasajeros.	138
Cuadro 14. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 6 metros de radio.	141
Cuadro 15. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 12 metros de radio.	141
Cuadro 16. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 35 metros de radio.	142
Cuadro 17. Disminución de distancia intervehicular al frenar el vehículo delantero con deceleraciones de 0.2g, 0.3g y 0.4g, antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.	146
Cuadro 18. Disminución de distancia intervehicular al frenar el vehículo delantero con deceleraciones de 0.5g, 0.6g y 0.7g, antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.	146
Cuadro 19. Separación entre vehículos de 4 m para diferentes velocidades e intervalos de entre 3 y 0.75 seg.	155

Cuadro 20. Intervalo de seguimiento y separación entre vehículos de 4 m para diferentes velocidades e intervalos entre 0.6 y 0.3 seg.	155
Cuadro 21. Capacidad de la vía a 60 Km/hora para diferentes intervalos de seguimiento (H).	158
Cuadro 22. Capacidad de las vías del sistema PRT.	159
Cuadro 23. Distancias de aceleración de 0 a 30 Km/hora.	165
Cuadro 24. Distancias de aceleración de 30 Km/hora a 60 Km/hora.....	165
Cuadro 25. Distancias de aceleración de 0 a 60 Km/hora.	165
Cuadro 26. Distancias de frenado de 60 Km/hora a 0.....	166
Cuadro 27. Distancias de frenado de 60 Km/hora a 30 Km/hora.	166
Cuadro 28. Distancias de frenado de 30 Km/hora a 0.....	166
Cuadro 29. Personas viajando en automóvil entre zonas seleccionadas de Desamparados y San José, 2017.	181
Cuadro 30. Personas viajando en bus entre zonas seleccionadas de Desamparados y San José, 2017.	182
Cuadro 31. Peso y costo de los componentes de viga del sistema PRT.....	186
Cuadro 32. Equipo especial de cada estación.	187
Cuadro 33. Costo de una estación paralela con un andén.	188
Cuadro 34. Costo de una estación paralela de un andén, con retorno.	188
Cuadro 35. Costo de un kilómetro instalado de viga simple.	188
Cuadro 36. Costo de columnas de soporte por cada kilómetro para una vía.	189
Cuadro 37. Resumen de costos para 1 kilómetro de línea PRT en una dirección.....	189
Cuadro 38. Resumen de costos para 1 kilómetro de línea PRT en dos direcciones.....	190
Cuadro 39. Costo de construcción y mantenimiento del sistema PRT.....	193
Cuadro 40. Viajes necesarios con diferentes tarifas para autofinanciar el sistema PRT.....	194
Cuadro 41. Parámetros para calcular los atributos de funciones de utilidad.	195
Cuadro 42. Cálculo atributos de costo y de tiempo de los modos de transporte.....	196

Cuadro 43. Asignación de viajeros por modo de transporte.....	197
Cuadro 44. Número de viajes PRT generados con las diferentes tarifas.....	198
Cuadro 45. Número de vehículos y estaciones por zona; porcentaje de uso de andenes.	199
Cuadro 46. Costo de construcción de carreteras nuevas en Costa Rica, al año 2017.	200
Cuadro 47. Costo de construcción de carretera con la capacidad de una vía PRT, al año 2017.....	202
Cuadro 48. Costo de diferentes intervenciones de carreteras en Costa Rica.	203
Cuadro 49. Cálculo del costo anual de circular por 1 Km de carretera de 4 carriles por sentido. ...	204
Cuadro 50. Comparación de costos de operación y mantenimiento.	205
Cuadro 51. Cambio proyectado en el uso de modo de transporte.	206
Cuadro 52. Capacidad de sistemas de transporte público para llevar pasajeros.	212
Cuadro 53. Costo de construcción y mantenimiento de sistemas de transporte público.	213
Cuadro 54. Capacidad máxima teórica de vía PRT para varias velocidades de operación.	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Gran Área Metropolitana en Costa Rica.....	24
Figura 2. Patrón radial de la red vial de San José, Costa Rica. (crhoy.com, 2013)	25
Figura 3. Tránsito en San José, Costa Rica. Figura 4. Avenida Segunda de San José.	26
Figura 5. Espacio ocupado por pasajeros y por modo de transporte: autobús, bicicleta y auto particular. (www.cyclingpromotion.com.au)	27
Figura 6. Distribución típica de vías en un sistema BRT.	28
Figura 7. Cambio de uso de carriles de vehículos particulares para el BRT.	29
Figura 8. Prototipo de vehículo PRT.....	31
Figura 9. Ejemplo de estación paralela al flujo.	31
Figura 10. PRT a nivel de suelo. Masdar City, Abu Dhabi.	32
Figura 11. Prototipo de PRT sobre y bajo una viga elevada.	33
Figura 12. PRT en Morgantown, West Virginia.....	34
Figura 13. Skytrain. Aeropuerto de Düsseldorf.	34
Figura 14. Definición gráfica de Intervalo o “Headway”.....	41
Figura 15. Transbordo de circuito cerrado (SLT). (Irving, J., 1978).	49
Figura 16. Vías elevadas del tren automático Yurikamome de Odaiba, Tokio. (Foto del autor)	49
Figura 17. Tren automático Yurikamome en Odaiba, Tokio. (http://muza-chan.net).....	50
Figura 18. Cabina del tren Yurikamome, sin conductor. (Foto del autor).	50
Figura 19. Tarimas móviles y transbordador ferroviario. (Merritt, W., 1993)	56
Figura 20. Enlace intraurbano de alta velocidad. (Merritt, W., 1993)	57
Figura 21. Monocab de Vero Inc. Figura 22. Monocab de Rohr.	59
Figura 23. Monocab de Rohr en Trans Expo 72, exponiendo el módulo de propulsión dentro de la viga de soporte. (www.advancedtransit.org)	60

Figura 24. Dos vehículos ROMAG de Rohr con suspensión magnética, en Chula Vista, California. (www.staff.washington.edu/jbs/itrans/romag.htm).....	61
Figura 25. Vehículo ROMAG de Rohr con suspensión magnética, en Chula Vista, California. (www.staff.washington.edu/jbs/itrans/romag.htm).....	62
Figura 26. Prototipo del Sistema PRT Hovair de TTI. (Wahl, P., 1971)	63
Figura 27. Sistema Otis-Hovair. Centro Médico Universidad de Duke, Durham, Carolina del Norte. (Ildar Sagdejev. www.specious.github.io)	63
Figura 28. Alden staRRcar en su versión de modo dual.	64
Figura 29. Alden staRRcar en su versión de modo cautivo en vía exclusiva, en la pista de pruebas de Bedford, Massachusetts. (Whal, P., 1971)	65
Figura 30. Chasis del Alden staRRcar, en su versión de modo cautivo en vía exclusiva.	65
Figura 31. Las dos etapas planeadas para el PRT de Morgantown. (Robertson, A., 2015)	66
Figura 32. Estación de Ingeniería del sistema PRT de Morgantown en 2012.	67
<i>Figura 33. Panel de control del sistema PRT de Morgantown.</i> (Robertson, A., 2015).....	67
Figura 34. Vehículo del sistema PRT de Morgantown en 2012.	68
Figura 35. Bendix-Dashaveyor en Transpo ‘72.....	69
Figura 36. Bendix-Dashaveyor en el Zoológico de Toronto.	70
Figura 37. Propuesta de Cabtrack en el West End de Londres.	71
Figura 38. Pruebas de separación intervehicular con el prototipo PRT ARAMIS de 4 pasajeros. (www.advancedtransit.org , 2013).....	72
Figura 39. Estación adjunta en pista de pruebas del PRT ARAMIS y su forma de operar. (www.orfe.princeton.edu)	73
Figura 40. Láser y sensor óptico de ARAMIS; separación intervehicular de 30 cm. (www.orfe.princeton.edu)	74
Figura 41. Prototipo GRT ARAMIS de 10 pasajeros. (www.orfe.princeton.edu).....	74

Figura 42. Prototipo de tren maglev interciudades Tranrapid, de Krauss-Maffei. (www.orfe.princeton.edu)	75
Figura 43. Prototipo del maglev GRT urbano Transurban, de Krauss-Maffei. (www.railforthevalley.com)	76
Figura 44. Pista de pruebas de Cabinentaxi en Hagen.	77
Figura 45. Modelo de estación Cabinentaxi en Hagen.....	78
Figura 46. Modelo de estación Cabinentaxi en Hagen.....	79
Figura 47. Pista de pruebas Cabinentaxi en Hagen.....	79
Figura 48. Bifurcación en pista de pruebas Cabinentaxi en Hagen.	80
Figura 49. Tránsito en dos niveles de la viga Cabinentaxi, en Hagen.....	81
Figura 50. Pista de pruebas de CVS en Higashimurayama, Tokio, Japón.	82
Figura 51. Pista de pruebas de CVS en Higashimurayama, Tokio, Japón.	83
Figura 52. Pista de pruebas de CVS en Okinawa. (Furman B., 2014).....	84
Figura 53. Portada del libro Fundamentals of Personal Rapid Transit. (Irving, J., 1978).....	85
Figura 54. Fotomontaje ilustrando el sistema PRT de Aerospace Corp. en Los Ángeles.	86
Figura 55. Propuesta de estación del sistema PRT de Aerospace Corporation al centro de la calle. (Irving, J., 1978)	87
Figura 56. Propuesta de estación del sistema PRT de Aerospace Corporation al lado de la calle. (Irving, J., 1978)	87
Figura 57. Modelo a escala del sistema PRT de Aerospace Corporation en un entorno urbano. (Irving, J., 1978).....	88
Figura 58. Modelo a escala del sistema PRT de Aerospace Corporation en un entorno urbano. (Irving, J., 1978).....	88
Figura 59. Modelo funcional del sistema PRT de Aerospace Corporation en escala 1:10.....	89
Figura 60. Modelo funcional del sistema PRT de Aerospace Corporation en escala 1:10.....	90
Figura 61. Modelo de Taxi 2000 escogido por la RTA de Illinois Noreste. (Anderson J., 2009)	91

Figura 62. Modelo de PRT 2000 desarrollado por Raytheon. (Anderson J., 2009).....	92
Figura 63. Modelo a escala real de PRT 2000 desarrollado por Raytheon. (Furman B., 2014).....	92
Figura 64. Prototipo de Taxi 2000 en la Feria Estatal de Minnesota de 2003. (Anderson J., 2016)..	93
Figura 65. Prototipo de Taxi 2000 en la Feria Estatal de Minnesota de 2003. (Anderson J., 2016)..	93
Figura 66. Pista de pruebas de ULTra PRT en Cardiff. (www.ultraglobalprt.com)	94
Figura 67. Vehículo en pista de pruebas de ULTra PRT en Cardiff. (www.ultraglobalprt.com).....	94
Figura 68. Vehículos Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow. (www.ultraglobalprt.com)	95
Figura 69. Terminal de Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow. (www.ultraglobalprt.com)	95
Figura 70. Sala de control de Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow.	96
Figura 71. ParkShuttles de 2getthere en servicio en el Aeropuerto de Schiphol entre 1997 y 2004. (www.2getthere.eu).....	97
Figura 72. Microbuses de 24 pasajeros de 2getthere en el parque industrial Rivium, Rotterdam. (www.2getthere.eu).....	97
Figura 73. Estación PRT en Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu)	98
Figura 74. Estación PRT en Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu)	98
Figura 75. Recorrido de los vehículos PRT en sótanos y túneles; Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu).....	99
Figura 76. Recorrido de los vehículos PRT en sótanos y túneles; Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu).....	99
Figura 77. Prototipo del sistema Vectus en la pista de pruebas de Uppsala, Suecia. (www.prtconsulting.com).....	100
Figura 78. Sistema Vectus Sky Cube en Suncheon Bay, Corea del Sur. (www.prtconsulting.com)	101

Figura 102. Estación sobre la vía principal.	131
Figura 103. Estación sobre vía paralela a la principal.	131
Figura 104. Vista lateral de una estación al nivel de la calle.	132
Figura 105. Estación al nivel de la calle.	133
Figura 106. Estación sin edificación. El vehículo es descendido hasta el nivel de la calle.	133
Figura 107. Estación elevada sobre el nivel de la calle.	134
Figura 108. Fuerzas que actúan sobre los vehículos al transitar por curvas.	140
Figura 109. Disminución de la distancia intervehicular cuando desacelera el vehículo frontal.	143
Figura 110. Frenada de emergencia del vehículo frontal.	147
Figura 111. Intervalo de separación entre vehículos.	153
Figura 112. Línea de vehículos a 60 Km/h, con un intervalo $H = 0.3$ seg.; con espacios libres para convergencias y vehículos vacíos.	158
Figura 113. Tiempo de elevación de la cabina.	162
Figura 114. Ejemplo de estación pequeña paralela a la vía principal.	167
Figura 115. Ejemplo de estación pequeña paralela a la vía principal, con retorno.	167
Figura 116. Ejemplo de estación múltiple paralela a la vía principal, con retorno.	168
Figura 117. Ejemplo de estación en vía secundaria de 30 Km/h, dentro de barrios, con retorno. ...	168
Figura 118. Disposición típica de vía con estaciones.	173
Figura 119. Trazado de la Red PRT San José – Desamparados.	174
Figura 120. Sección 1 de la Red PRT San José – Desamparados.	175
Figura 121. Sección 2 de la Red PRT San José – Desamparados.	176
Figura 122. Sección 3 de la Red PRT San José – Desamparados.	177
Figura 123. Detalle de red PRT en Desamparados Centro.	178
Figura 124. Zonas generadoras y atractoras de viajes.	180
Figura 125. Comparación de cargas sobre la viga entre los sistemas PRT y SIPEM.	185
Figura 126. Sección de una carretera con la misma capacidad que la vía PRT.	200

Figura 127. Edición de la sección Norte de la Red PRT en el programa Synchro 6.....	207
Figura 128. Sección Norte de la red PRT simulada en Sim Traffic 6.	208
Figura 129. Sección de la red con el mayor flujo de vehículos modelada en Synchro 6.	209
Figura 130. La misma sección simulada en Sim Traffic 6.	209
Figura 131. Formación de pelotones de vehículos.....	210
Figura 132. Convergencia de flujos en la intersección más transitada.....	211
Figura 133. Convergencia de flujos sin formación de colas.....	211
Figura 134. Comparación conceptual del espectro Accesibilidad-Capacidad para varios modos de transporte, de acuerdo con la distancia que deben recorrer los viajeros.	214
Figura 135. Mercado meta del sistema PRT.....	216
Figura 136. Vía PRT en una calle estrecha típica, con un sentido de circulación PRT.	224
Figura 137. Dos vías PRT paralelas, con doble sentido de circulación.	225
Figura 138. Dos líneas PRT de media velocidad, una de baja velocidad y estación sin edificación.	225
Figura 139. Estación PRT en edificio alto y vías PRT en varios niveles.	226
Figura 140. Líneas eléctricas de media y alta tensión sobre columnas PRT.	226

ABREVIATURAS

a	Aceleración lineal, en unidades de m/seg^2 .
ABS	<i>Antiblockiersystem, Anti-lock Braking System</i> , sistema de frenado antibloqueo de ruedas.
AGRT	<i>Advanced Group Rapid Transit</i> , transporte grupal rápido avanzado.
APM	<i>Automatic People Mover</i> , sistema automático de transporte de personas.
ATS	<i>Automatic Transport System</i> , sistema automático de transporte.
AVE	Alta Velocidad Española, tren de alta velocidad de la empresa española RENFE.
d	Distancia.
DOT	<i>US Department of Transportation</i> , Departamento del Transporte de los EEUU.
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i> , Administración Federal de Aviación de EEUU.
g	Aceleración de la gravedad terrestre, $9.81m/seg^2$.
GAM	Gran Área Metropolitana de Costa Rica.
GRC	<i>General Research Corporation of Santa Barbara</i> , Corporación de Investigaciones Generales de Santa Bárbara, California, EEUU.
GRT	<i>Group Rapid Transit</i> , transporte grupal rápido.
HUD	<i>Department of Housing and Urban Development</i> , Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano de los EEUU.

ICE	<i>Inter City Express</i> , expreso inter-ciudades, tren rápido de Deutsche Bahn, en Alemania.
J	<i>Jerk</i> , variación en el tiempo de la aceleración lineal, en unidades de m/seg^3 .
LRT	<i>Shuttle Loop Transit</i> , transbordo de circuito cerrado.
m	Metro, unidad de longitud.
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica.
PRT	<i>Personal Rapid Transit</i> , transporte personal rápido.
PRUGAM	Planificación Regional Urbana de la Gran Área Metropolitana.
seg	Segundos, unidad de tiempo.
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana.
SIPEM	<i>Siemens People Mover</i> , Transporte de personas de Siemens. Monorraíl desarrollado por Siemens de Alemania.
t	Tiempo.
TGV	<i>Train á Grand Vitesse</i> , tren de gran velocidad de la compañía francesa SNCF.
UMTA	<i>Urban Mass Transportation Administration</i> , Administración del Transporte Masivo Urbano, de los EEUU.
v	Velocidad.
WVU	<i>West Virginia University</i> , Universidad de Virginia Oeste, EEUU.

RESUMEN

El transporte dentro de las ciudades modernas se ha topado con grandes desafíos, que han variado conforme cambiaron las condiciones de las vías: Cuando las calles no tenían un pavimento durable, las velocidades en vehículo a motor eran muy bajas; cuando se tuvo un buen pavimento, una flota pequeña y las velocidades aumentaron, el mayor problema fue la gran cantidad de accidentes de tráfico; ahora, en Costa Rica, los pavimentos son aceptables, la flota de vehículos es muy grande y se produce una gran congestión de las vías durante gran parte del día, agravada por el crecimiento constante del número de vehículos privados.

Las soluciones a este problema de congestión ensayadas hasta ahora en este país son: La construcción de más superficie de carretera, la promoción del transporte público y, la restricción temporal al uso del vehículo privado en la zona central de la ciudad de San José, la capital. La primera de ellas se ejecuta con lentitud, debido al alto costo de expropiar tierras para el derecho de vía y de los trabajos de construcción; la segunda apenas empieza a tomar impulso mediante un proceso de sectorización de las rutas de autobuses y la mejora gradual del muy antiguo servicio de trenes interciudades y, la última solución aplicada cubre apenas una pequeña parte de la red vial en esa ciudad; por tales razones, sus efectos sobre la congestión aún no se han notado.

El proceso de sectorización de rutas de autobús puede reducir aún más el espacio vial disponible para los vehículos privados, lo que agravará súbitamente la congestión vial. Para ayudar a mitigar las demoras generadas por esa congestión, se busca una alternativa de transporte público que resulte atractiva para el usuario de vehículo privado, ofreciendo: privacidad, viaje directo sin paradas entre el origen y el destino; velocidad de crucero durante todo el viaje y tarifa de viaje mayor que la del autobús y menor que la del taxi.

En este trabajo se muestra un concepto para tal sistema de transporte, llamado *Personal Rapid Transit* (PRT) o Transporte Personal Rápido, que incluye todos los elementos deseables mencionados en el párrafo anterior, además de: tener un potencial ecológico mayor que los modos de transporte actuales por ser accionado mediante energía de la red de electricidad, de ser más silencioso que los vehículos con motor de combustión interna; de ser más seguro por circular a un nivel separado de los demás vehículos de la calle, de ser un alimentador de los demás modos de transporte masivo de pasajeros y, además, de no requerir un derecho de vía adicional a la red de calles existente. Por último, se calcula que tal sistema no requerirá de subsidios de tarifa para su operación, mantenimiento, ni amortización del equipamiento.

Palabras clave: Transporte Personal Rápido, PRT, transporte público, transporte elevado, transporte ecológico, seguridad, viaje sin escalas, viaje rápido, privacidad, no subsidiado, sustituir vehículo privado.

ABSTRACT

Transportation inside of modern cities has been met with big challenges, which have evolved as the conditions of the roads also changed: When the streets had no pavement, the motor vehicle speeds were very low; when a good pavement was available, with a small motorcar fleet and the travelling speeds increased, the biggest problem was the high number of traffic accidents; nowadays in Costa Rica, the condition of pavements is acceptable, the motorcar fleet is very big and it creates a big congestion on the roads during most of the day, aggravated by the constant increase on the number of private vehicles.

The solutions to this road congestion problem tried up until now in this country are: The construction of more road surface, the promotion of public transport and, the temporal restriction to the use of private vehicles on the central area of the city of San José, the capital. The first of those measures is executed slowly, because of the high cost of expropriating the lands for the right of way and the road construction process; the second is just starting to get momentum through a process of sectorization of bus routes and the gradual improvement of the very old inter-cities train service and, the last applied solution covers just a small part of the road network of that city; for all those reasons, their effect on traffic congestion have not been noticed yet.

The process of bus routes sectorization can reduce even more the road lanes available for private vehicles, which will suddenly aggravate traffic congestion. To help mitigate the delays generated by that congestion, there is a search for a public transport alternative that can be attractive for the private vehicle user, offering: privacy, direct non-stop travel between trip origin and destination; cruising speed all along the way, and a travel fare that is higher than the bus's and lower than taxis'.

This paper presents a concept for such a transport system, called Personal Rapid Transit (PRT), that includes all the desirable elements mentioned on the previous paragraph, and besides of: having a bigger ecological potential than the current modes of transportation, because it will be motivated by energy from the electrical power grid; being more silent than the vehicles with an internal combustion engine; being more safe by travelling on a separate level than the rest of the vehicles on the Street; being a passenger feeder for all the other mass transport systems and, not requiring an additional right of way, besides the current road network. And last, it has been calculated that such a system will not require of a subsidized fare to support its operation, maintenance, nor amortization of equipment.

Key words: Personal Rapid Transit, PRT, public transport, elevated transport, ecological transport, safety, non-stop travel, fast travel, privacy, non-subsidized, private vehicle substitution.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

En Costa Rica, la zona de mayor desarrollo se encuentra al centro del país, repartida entre los valles Central y El Guarco. Se le ha denominado Gran Área Metropolitana o GAM, por sus siglas (Plan Metropolitano GAM, 1983). Allí se concentra la mayoría de la población, de sedes de instituciones gubernamentales y de la actividad comercial y económica del país; en un área extensa y con una densidad poblacional de 1,153 habitantes/Km² (INEC, 2011).

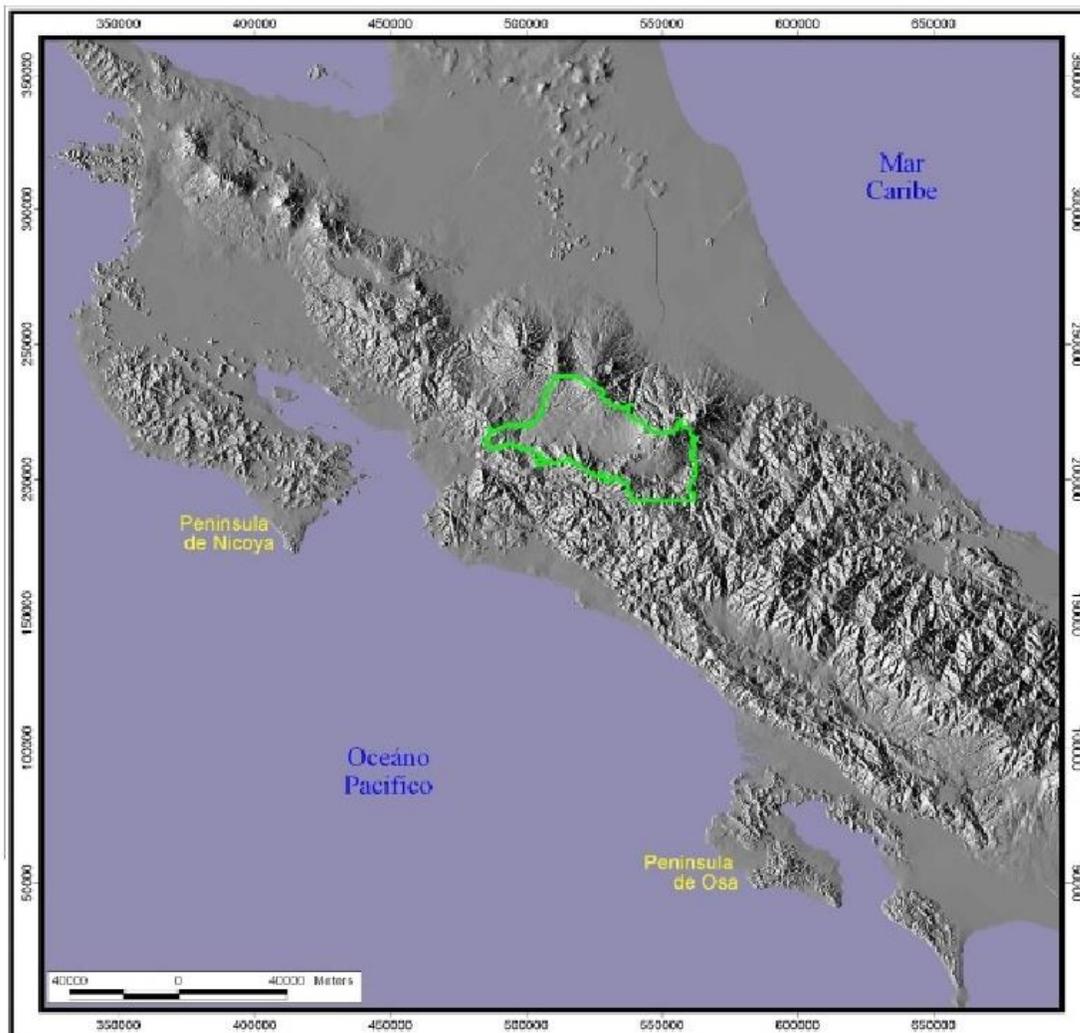


Figura 1. Ubicación de la Gran Área Metropolitana en Costa Rica.
(www.lahistoriaconmapas.com)

La movilidad de personas en el país se ha orientado al uso de líneas colectivas de transporte público desde la periferia hasta el centro mismo de la Gran Área Metropolitana (GAM), taxis y servicios

individuales de transporte público, así como de automóviles particulares que comparten, todos, las mismas vías terrestres.

El transporte de personas y mercancías se moviliza por una red de carreteras que convergen de manera radial en la GAM. Dentro de las ciudades de esta zona, la mayoría de caminos poseen uno o dos carriles de circulación por sentido y son utilizados simultáneamente por el transporte público de pasajeros, el transporte de carga, los vehículos particulares y las motocicletas.

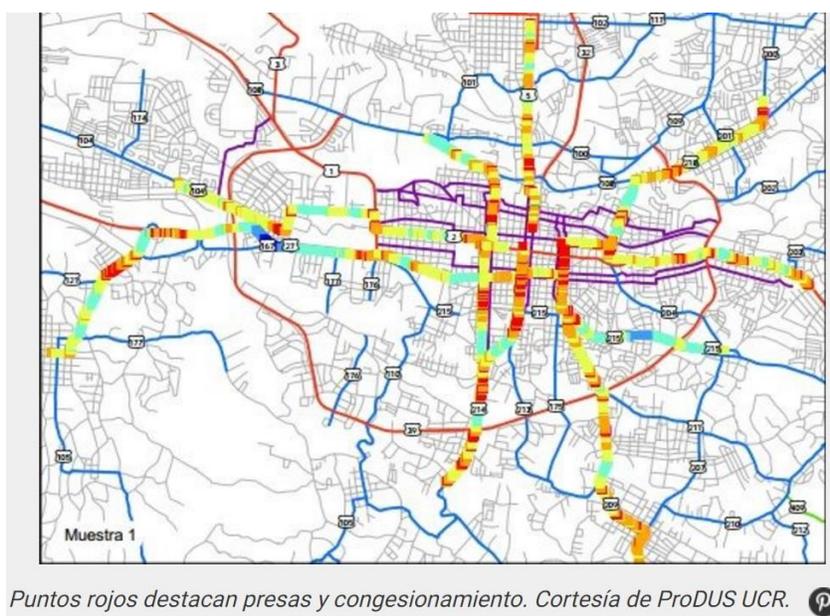


Figura 2. Patrón radial de la red vial de San José, Costa Rica. (crhoy.com, 2013)

1.2. Planteamiento del problema

El transporte de personas en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM) se ha realizado tradicionalmente por medio de:

- Autobuses, que transportan a la mayoría de los viajeros con un presupuesto limitado.
- Automóvil privado y taxi, para quienes desean viajar con mayor rapidez y comodidad.
- Bicicleta.
- Desplazamientos a pie.

Entre los años 1980 y 2014, se ha visto aumentar la flota de vehículos privados en un 914.4 % (Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (Costa Rica), 2015), también los autobuses han aumentado su cantidad de líneas de transporte y de unidades; todo esto sin que el Estado haya podido realizar mayores ampliaciones en la red vial. Con tantos vehículos compitiendo por un espacio en la red de caminos, se ha generado una situación de congestión vial en las horas

punta de tráfico, especialmente en las ciudades de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica; una situación que, ante la falta de acciones efectivas, empeora año con año y genera, entre otras, las siguientes externalidades:

- Pérdida de tiempo en viajar, que deja menos espacio para el trabajo y la vida familiar.
- Estrés provocado por encontrarse inmovilizado en los embotellamientos del tráfico.
- Un alto gasto en combustibles, contaminación e impacto sobre la naturaleza.
- Gran cantidad de accidentes en las calles, con lesiones y muertes que impactan la vida y las finanzas de las personas.
- Un descenso en la calidad de vida de las personas.



Figura 3. Tránsito en San José, Costa Rica.
(La Tribuna de Honduras. 13 de julio 2016)



Figura 4. Avenida Segunda de San José.
(Diario Extra. 03 de octubre 2015)

Dentro del análisis en busca de soluciones que disminuyan o eliminen las molestias apuntadas, se identifican algunos aspectos básicos:

- La flota de vehículos privados utiliza más espacio en las vías y transporta menos pasajeros que aquellos del transporte público.
- El espacio vial es escaso y su ampliación resulta costosa y lenta.
- Las vías públicas deben ser de utilidad para la mayor cantidad de habitantes y por eso es deseable promover los sistemas de transporte que movilicen a la mayor cantidad de personas en el menor espacio posible, con rapidez, seguridad y comodidad. La siguiente figura muestra cuánto espacio demandan tres modos de transporte para movilizar la misma cantidad de personas: autobús, bicicleta y vehículo particular. El vehículo particular demanda mucho más espacio vial para transportar la misma cantidad de personas que el transporte público.

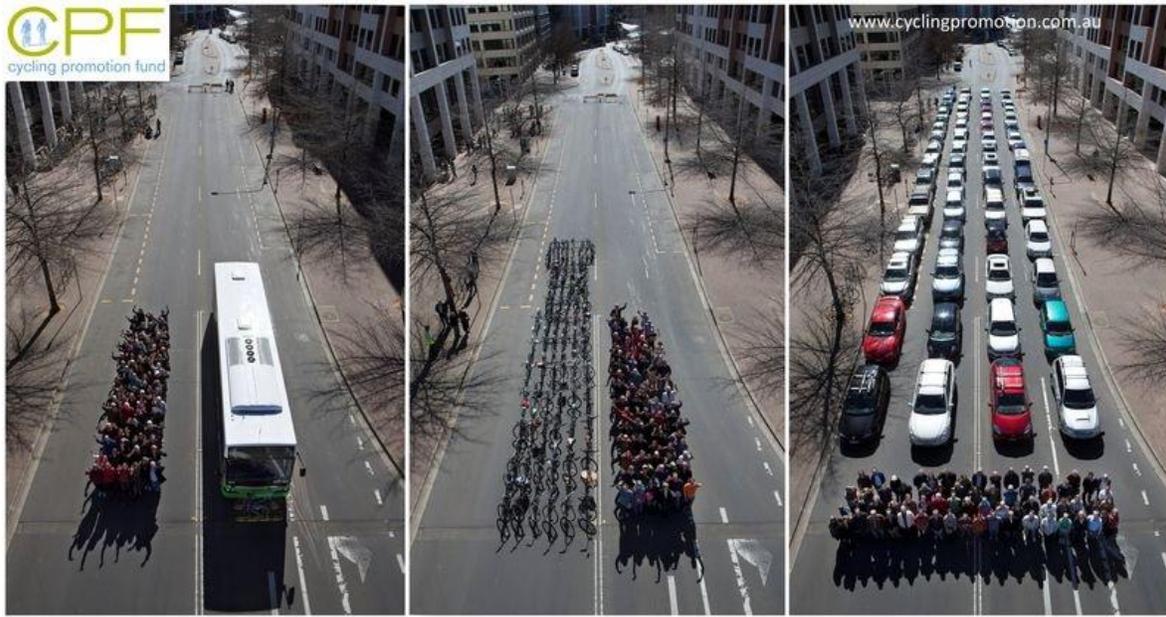


Figura 5. Espacio ocupado por pasajeros y por modo de transporte: autobús, bicicleta y auto particular. (www.cyclingpromotion.com.au)

En años recientes se han propuesto varias soluciones, unas modernas y otras más tradicionales, para controlar mejor el uso de los espacios viales, disminuir la congestión y bajar los tiempos de viaje de los usuarios, por ejemplo (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, 2006):

- La sectorización o agrupamiento de las líneas de servicio de transporte público en un solo operador por sector, para evitar la duplicidad de sus recorridos y la congestión que provoca el exceso de unidades de autobús en el centro de las ciudades; incluyendo la creación de vías y carriles exclusivos para autobuses. Estos sistemas se conocen internacionalmente como “Transporte Rápido por Autobús” (Bus Rapid Transit ó BRT).
- La construcción de pequeños proyectos viales que ayuden a disolver los embotellamientos de tráfico en puntos específicos; se denominan por el acrónimo inglés TOPICS, que son las siglas de “Traffic Operations Program for Increasing Capacity and Safety” (Programa de Operaciones de Tráfico para Incrementar la Capacidad y la Seguridad).
- Las operaciones policiales para regular el uso del espacio vial, como el control y el cobro del estacionamiento sobre la calzada.
- Tarificación vial en zonas de las ciudades en las que habría que pagar por ingresar en vehículo particular.
- Escalonamiento de los horarios de entrada y salida de trabajos y centros de estudio, para evitar la simultaneidad en los desplazamientos de la población.
- Restricción vehicular, que impide el ingreso a zonas restringidas de cierto tipo de vehículos, normalmente definidos por el número de la placa que se asocia con un día de la semana en el que no pueden hacer ingreso.



Figura 6. Distribución típica de vías en un sistema BRT.
(www.daimler.com)

Luego de varios estudios que coinciden en la necesidad de las obras de sectorización, aún no se ha alcanzado en Costa Rica la concertación de intereses políticos y económicos necesaria para implementar las propuestas técnicas y la congestión vial continúa en aumento, ante el crecimiento anual de la flota vehicular. Algunos de esos estudios han sido: “*Reorganización del Transporte Público en el Área Metropolitana de San José*” (L.C.R. Logística S.A, 1999); “*Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos PRU-GAM, Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica*” (L.C.R. Logística S.A, 2007); “*Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011 - 2035*” (MOPT, 2011); “*Reorganización del Transporte Público Urbano en el Subsector Operativo Desamparados*” (L.C.R. Logística S.A, 2013); “*Apoyo al modelo general de Sectorización del transporte público de San José, Costa Rica*” (Consortio EPYPSA – SIGMA GP, 2015).

1.3. Justificación del Estudio

La situación tan crítica de congestión vial en las ciudades de la GAM, hace necesario introducir nuevos sistemas de transporte que complementen los sistemas tradicionales de transporte masivo e individual/privado y que mejoren:

- La movilidad de la población, con viajes más directos y más rápidos.
- La calidad de vida, con menos tiempo gastado en atascamientos del tráfico.

Y que disminuyan:

- El costo y la duración de los viajes.
- El estrés sobre los viajeros.
- El gasto de recursos que demanda el sistema de transporte actual.
- La contaminación ambiental y paisajística de la red de caminos.

- El impacto de las actividades humanas sobre la naturaleza.

En la mayoría de ciudades del mundo con problemas de transporte de pasajeros, se introducen sistemas de transporte masivo, desde lo más simple a lo más complejo y costoso: primero con autobuses en un sistema BRT, luego con tranvías y, por último, con trenes urbanos.

Cuando se introducen sistemas BRT, se construyen nuevos carriles exclusivos para el autobús o se segregan carriles de las vías existentes (como será el caso más probable en Costa Rica), lo que disminuye aún más la capacidad de las vías para circular en vehículos privados (Figura 7).

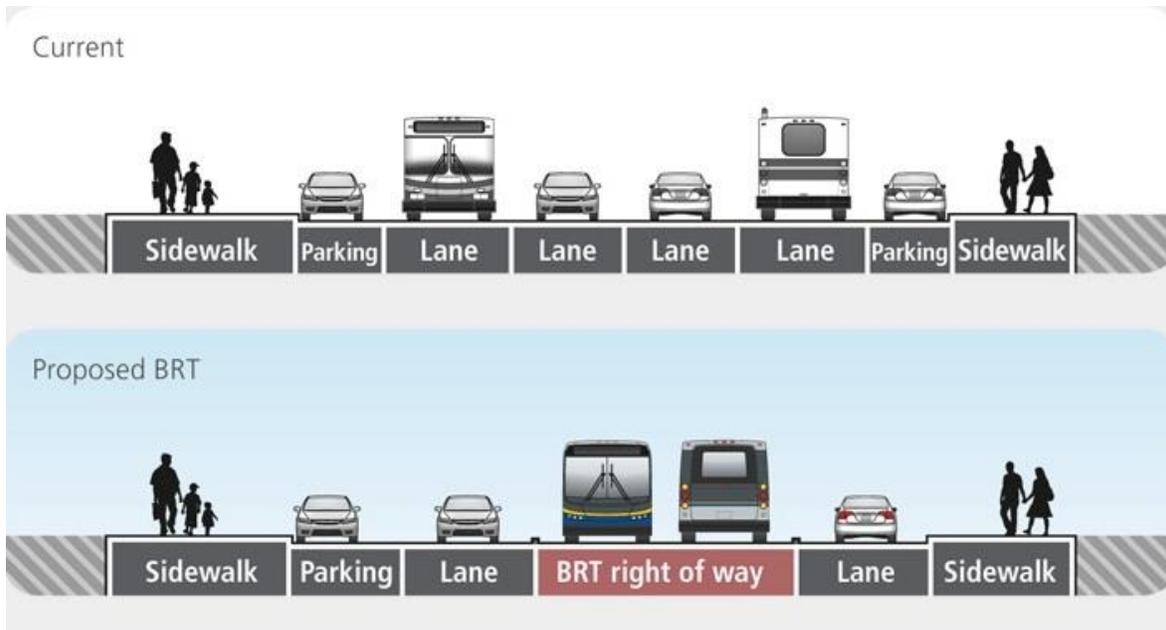


Figura 7. Cambio de uso de carriles de vehículos particulares para el BRT.
(The South Fraser Blog).

Es fácil concluir que, si se instalara un sistema BRT en la GAM, muchos usuarios actuales de vehículo privado deberán usar el sistema BRT, ante la escasez de vías para viajar en su auto y por la mayor rapidez relativa del bus BRT en su carril exclusivo. La velocidad promedio en una de las principales carreteras urbanas de San José de Costa Rica, medida por la Dirección General de Ingeniería de Tránsito en el año 2016, es de 13.40 Km/h (Grant, M., 2016); las velocidades de los BRT de ciudad en el mundo oscilan entre los 16 y 35 Km/h, cuando se incluyen los tiempos de las paradas intermedias dentro de cada viaje (Cervero R., 2013). El precio del viaje en BRT también es mundialmente más bajo que viajar en vehículo privado o en taxi. Sumando todo lo anterior, viajar en BRT se vuelve mucho más atractivo que el prospecto de estar atascado en un embotellamiento en el propio auto.

Más, a pesar de las ventajas de un menor costo y menor tiempo de viaje del BRT, éste tiene, a su vez, algunas desventajas para el viajero con respecto al vehículo privado:

- Los sistemas de transporte público masivo llevan grupos de viajeros que deben recorrer juntos una ruta, realizando recorridos y paradas que son del interés de sólo algunos de ellos, añadiendo demoras al viaje de cada individuo, comparado con un viaje directo del origen al destino de cada viajero.

- Los buses son de alta capacidad, con pocos asientos, y llevan a la mayoría de pasajeros de pie, con poco espacio individual y escasa comodidad.
- La última etapa del viaje, entre la ruta del BRT y el destino final, debe realizarse en otro modo de transporte.
- Históricamente, el vehículo privado había sido percibido en Costa Rica como un símbolo de alto estatus social y, por ende, deseable.

Estos aspectos mantendrán un fuerte atractivo sobre el uso del vehículo particular que, en teoría, permite un viaje directo entre el origen y el destino de cada viajero. También, a pesar del balance de las ventajas y desventajas del BRT sobre el auto particular en tiempo de viaje y en precio, siempre existe una cantidad de usuarios para quienes el BRT no satisface sus necesidades de transporte y, por ello, no lo usarán:

- Personas que realizan una ruta de visita a varios destinos sucesivos, en distintos sectores de una ciudad.
- Usuarios transportando paquetes grandes.
- Personas con ciertas discapacidades físicas.
- Viajeros que deben ir juntos en grupo desde el mismo origen al mismo destino.
- Viajeros que deben desplazarse en horarios donde no hay servicio de autobús, porque la baja demanda de viajeros no permite mantener un servicio regular.
- Ciclistas que no pueden abordar el bus con su bicicleta.
- Aquellos que desean viajar en comodidad, privacidad y mayor seguridad.
- Viajeros que deben llegar a su destino más rápido de lo que les permite el BRT y los otros modos combinados.

1.4. El sistema de Transporte Personal Rápido

Para satisfacer simultáneamente las necesidades anotadas en el apartado anterior 1.3: ... *“se hace necesario introducir nuevos sistemas de transporte que complementen los sistemas tradicionales de transporte masivo e individual/privado, que mejoren:*

- *La movilidad de la población, con viajes más directos y más rápidos.*
- *La calidad de vida, con menos tiempo gastado en atascamientos del tráfico.*

Y que disminuyan:

- *El costo y la duración de los viajes.*
- *El estrés sobre los viajeros.*
- *El gasto de recursos que demanda el sistema de transporte actual.*
- *La contaminación ambiental y paisajística de la red de caminos.*
- *El impacto de las actividades humanas sobre la Naturaleza. ...”*

El concepto de Transporte Personal Rápido (Personal Rapid Transit o PRT), podría satisfacer estas condiciones. Es un sistema de transporte por medio de pequeños vehículos individuales automatizados, semejante a un sistema automático de taxis, con las siguientes características:

- Una capacidad y comodidad semejantes a las de un auto particular.
- Que viaja sin chofer, controlado por computadoras.
- Va desde un punto de origen a un punto de destino, sin escalas intermedias y a velocidad de crucero.
- Los viajeros se mueven entre estaciones, ubicadas en vías paralelas a la vía principal, así la corriente de tráfico no se ve afectada por los vehículos que suben y bajan pasajeros (Schweizer, Mantecchini, & Greenwood, 2011).
- De propulsión eléctrica, para evitar la contaminación atmosférica de las ciudades y simplificar la mecánica de los vehículos.



Figura 8. Prototipo de vehículo PRT.
(www.prtconsulting.com)

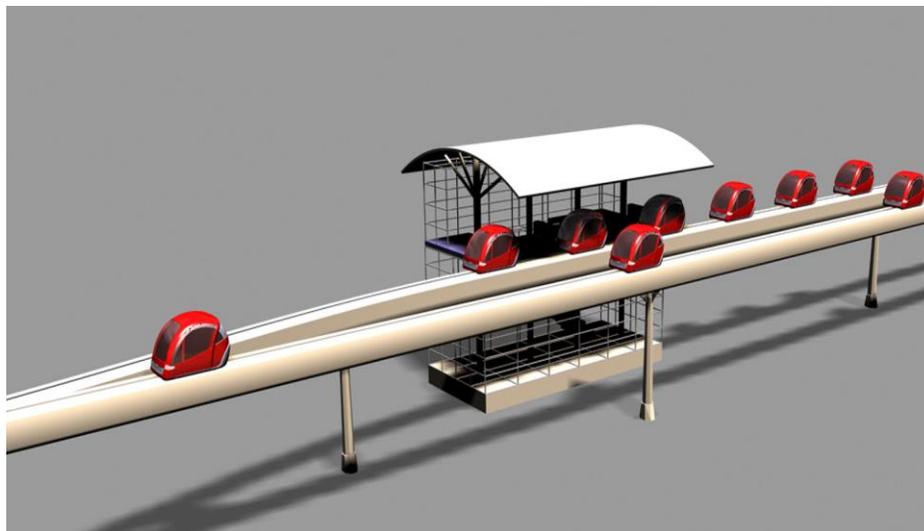


Figura 9. Ejemplo de estación paralela al flujo.
(www.prtconsulting.com)

En los sistemas de Transporte Personal Rápido (PRT), los vehículos se desplazan por un medio exclusivo para ellos, para separarlos del flujo de tránsito regular y permitir una operación sin escalas; normalmente se habla de un PRT que puede operarse en:

- Un derecho de vía a ras del suelo.
- Una viga o calzada elevada.
- Túneles subterráneos.



Figura 10. PRT a nivel de suelo. Masdar City, Abu Dhabi.
(www.2getthere.eu)

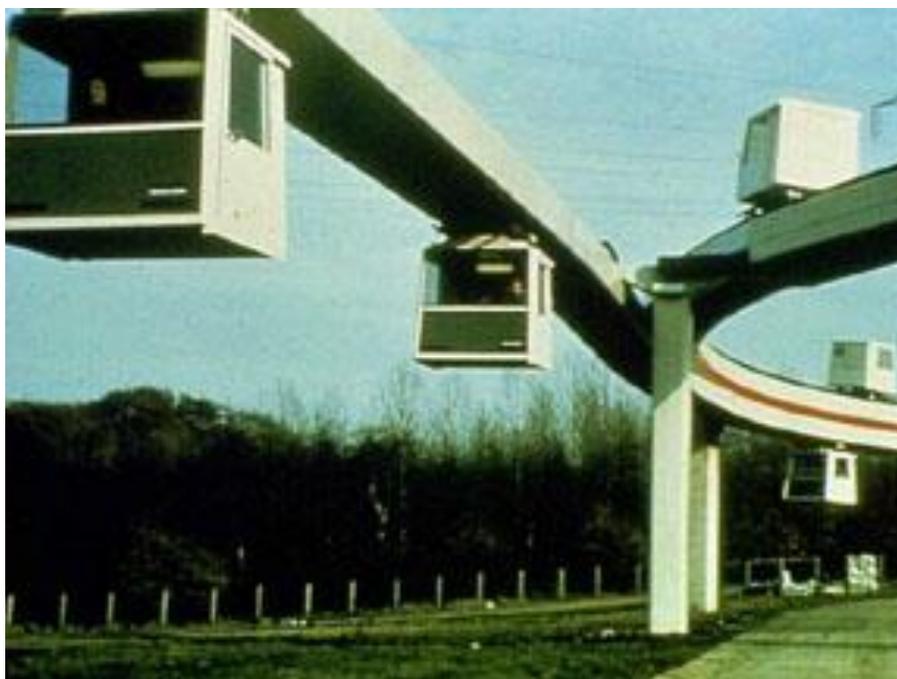


Figura 11. Prototipo de PRT sobre y bajo una viga elevada.
(www.prtconsulting.com)

Ya existen ejemplos de sistemas PRT en operación, aunque su desarrollo estuvo limitado por la poca capacidad computacional de los vehículos y sistemas de control hasta los años 90 y porque los municipios y agencias de transporte de los diferentes países han preferido el desarrollo continuado de los sistemas de tranvías y trenes subterráneos, algunos de ellos automatizados, porque son tecnologías más conocidas (Bly & Teychenne, 2005).

En el mundo, sólo 3 ciudades cuentan con sistemas PRT (Gustafsson, Lohmann y Lawson, 2013):

- Masdar City, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos, desde el año 2010. Fabricado por “2getthere”. Tiene 1.76 km de recorrido, cinco estaciones y 13 vehículos.
- Suncheon Bay, Corea del Sur, inaugurado en 2013. Fabricado por “Vectus”. Tiene 9.60 kilómetros y 40 vehículos.
- Aeropuerto Heathrow de Londres, Inglaterra (2011). Sistema fabricado por “ULTra PRT”. Tiene 3.83 kilómetros de vías, tres estaciones y 21 vehículos.

Otros sistemas existentes de transporte y que utilizan el control automatizado de los vehículos, no son del tipo Transporte Personal, sino Transporte Grupal Rápido o Group Rapid Transit-GRT (Irving, J., 1978):

- Universidad de West Virginia, Morgantown, West Virginia, EEUU (1975).
- Universidad de Dortmund, Renania del Norte-Westfalia, Alemania (1984).
- Aeropuerto de Dusseldorf, Renania del Norte-Westfalia, Alemania (2002).

El sistema de Morgantown tiene la capacidad de operar como PRT (transporte personal) y también se usa como transporte grupal (GRT), con itinerarios y paradas fijas en horas pico; opera desde 1975 entre los campus de la Universidad de West Virginia en, EEUU y tiene cinco estaciones.



Figura 12. PRT en Morgantown, West Virginia.
(<http://transportation.wvu.edu/prt>)



Figura 13. Skytrain. Aeropuerto de Düsseldorf.
(<http://www.railway-technology.com>)

Esta investigación servirá para calcular la capacidad de transporte de pasajeros de un sistema PRT, aportando elementos objetivos para valorar la conveniencia de esta inversión, introduciendo criterios de eficiencia:

- Tiempos de espera.
- Tiempos de viaje.
- Tiempos de abordaje/desabordaje del sistema PRT.

Los resultados obtenidos servirán para evaluar la inversión en el desarrollo y en la construcción de un sistema de transporte del tipo “Transporte Personal Rápido” (Personal Rapid Transit ó PRT) en Costa Rica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar una propuesta de un sistema de Transporte Personal Rápido (Personal Rapid Transit ó PRT) entre los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados, en la provincia de San José de Costa Rica, a manera de caso de estudio, para decidir la conveniencia, o no, de desarrollar un sistema PRT en Costa Rica que ayude a sustituir el uso del vehículo privado por un servicio público.

1.5.2. Objetivos Específicos:

1.5.2.1. Objetivo Específico 1

Determinar la capacidad de transporte de pasajeros de un sistema PRT.

1.5.2.2. Objetivo Específico 2

Estimar la potencial demanda de pasajeros del sistema PRT en el corredor San José-Desamparados.

1.5.2.3. Objetivo Específico 3

Calcular la cantidad de vehículos particulares que pueden dejar de circular en el corredor San José-Desamparados con la puesta en marcha de un sistema PRT.

1.5.2.4. Objetivo Específico 4

Comparar la capacidad de transportar pasajeros que tendría el sistema PRT con la capacidad del transporte individual por automóvil en carretera.

1.5.2.5. Objetivo Específico 5

Estimar los costos de construcción y operación que tendría el sistema PRT y compararlos con los costos de construcción y operación de una carretera típica en Costa Rica.

1.6. Alcance y limitaciones

1.6.1. Alcance

Este proyecto evalúa aspectos de capacidad operativa y el costo probable del desarrollo, construcción y operación de un sistema de Transporte Personal Rápido (PRT) en una sección de la Gran Área Metropolitana (GAM) que comprende los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados; comparar esos datos obtenidos con las mediciones que ya se han hecho de capacidad y costo de la red de carreteras de Costa Rica, para recomendar, o no, el desarrollo de un sistema PRT en Costa Rica.

1.6.2. Limitaciones

Este estudio es de tipo exploratorio, por tanto, no incluye:

- Diseños constructivos, cálculos estructurales ni planes de inversión para el desarrollo de un sistema PRT.
- Análisis ni recomendaciones para optimizar la gestión de la red vial de transporte existente.
- Análisis ni recomendaciones para mejorar la infraestructura vial existente.
- Comparación exhaustiva con otras modalidades de transporte, como el autobús o el metro.
- La propuesta aquí presentada no incluye una revisión exhaustiva de regulaciones urbanísticas, de construcción, de retiros (por ejemplo, al tendido eléctrico), normas municipales, impactos paisajísticos, entre otros, que puedan afectar la viabilidad del proyecto.
- Costos de reubicación de servicios públicos afectados por la implementación del sistema, ni de adecuaciones arquitectónicas a estructuras afectadas por el sistema.
- Tarifas calculadas con los modelos de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos de Costa Rica (ARESEP).

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Concepto de Transporte

El transporte consiste en el traslado de personas o cosas desde un punto geográfico de origen hasta un punto de destino. El traslado se realiza en una base o medio, que puede ser la superficie del suelo, el agua, el aire o infraestructura construida para ese fin. El modo de transporte es la manera de realizar el traslado: Con fuerza humana, caminando o nadando; con un vehículo terrestre, acuático o aéreo.

Normalmente, un sistema de transporte de pasajeros utiliza:

- Un medio o infraestructura para realizar la actividad.
- Un modo o vehículos para el traslado de personas.
- Un operador para cada vehículo.
- Normas bien establecidas para realizar la actividad con seguridad y eficiencia.

2.1.1. Modos de transporte terrestre

Cada modo de transporte terrestre requiere de una zona para transitar: Aceras para el caminante, rieles para los trenes y tranvías y, calzadas para vehículos sobre ruedas.

- Transporte a pie.
- Transporte con animales.
- Bicicleta.
- Automóvil.
- Autobús.
- Tranvía.
- Tren.

Cada uno de estos modos tiene una forma particular de mejorar, con procedimientos y políticas de operación, el desempeño de su función de transporte, para lograr balancear dos conceptos:

- Oferta de Transporte: Es el conjunto de medios y modos de transporte disponibles para los viajeros que utilizan cada modo de transporte.
- Demanda de transporte: Es el número de usuarios que desean transportarse por cada modo.

2.1.2. Colas

Cuando la demanda es baja, la infraestructura y el equipo de transporte pueden atender toda la demanda y tienen capacidad extra sin utilizar. En cambio, cuando la demanda de transporte es muy alta y excede la oferta, se empieza a acumular un grupo de usuarios no atendidos, que forma una cola de usuarios que deben esperar su turno para viajar y sufrir una demora adicional al tiempo de viaje.

2.1.3. Análisis de carreteras

Las agencias de transporte de los distintos países y municipios, escogen una metodología de análisis para caracterizar la operación de los sistemas de transporte.

En Costa Rica, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, a través de la Dirección General de Ingeniería de Tránsito, utiliza la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras (TRB, 2010) desarrollada por la Junta de Investigación en Transportes de los EEUU (Transportation Research Board, o TRB, por sus siglas), para el análisis de carreteras y sus componentes, versión del año 2010.

En el caso de las carreteras, se analizan varios parámetros básicos (Cal y Mayor, R., 2007):

- Volumen: Es el número de vehículos que pasan por un punto en un periodo determinado.
- Tasa de Flujo: Es la frecuencia a la que pasan vehículos por un punto en periodos que sean menores a una hora. Se utiliza en el cálculo de coeficientes de ajuste de volúmenes.
- Demanda: En el caso de las carreteras, se define como el número de vehículos que desean pasar por un punto de una carretera en un periodo determinado.
- Capacidad: Es la oferta vial disponible. Es el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto de una carretera en un periodo específico.

Además, existen otros parámetros conocidos como Medidas de Efectividad, que ayudan a determinar si un sistema de caminos está funcionando apropiadamente o no, entre los que destacan:

- Longitud de colas: Es una medida en metros, o en vehículos, de las colas que se forman en tramos de carretera o en intersecciones.
- Demoras: Es la sumatoria de todos los tiempos de retraso que sufre un vehículo por verse obligado a detenerse en medio de un viaje entre un origen y un destino.
- Nivel de Servicio (Level of Service, o LOS): Es una medida cualitativa, dentro de un patrón arbitrario establecido por TRB, para describir las condiciones de operación de un flujo vehicular; cuanto más libre sea el flujo de tránsito, mejor es el Nivel de Servicio (LOS), en

una escala que va desde A para el mejor, pasando por B, C, D, E y, finalmente, F para las carreteras en situación de congestión (Cal y Mayor, R., 2007).

En esta investigación se compara la capacidad de una carretera con vehículos privados contra un sistema de Transporte Personal Rápido (PRT) que viaja por su vía exclusiva.

Para realizar tal comparación, se analiza el sistema PRT con los mismos parámetros que una carretera de un solo carril. Luego se comparará el resultado obtenido con el cálculo de capacidad de una carretera. Se utiliza la metodología que la TRB ha definido en el Manual de capacidad de Carreteras, versión 2010.

2.1.3.1. Capacidad de una carretera continua

La capacidad de una vía es el número máximo de vehículos que pueden circular por un punto de esa vía en un periodo de tiempo específico (Cal y Mayor, R., 2007), que se expresa como una medida de flujo: vehículos/hora, vehículos/minuto, etc. En condiciones de flujo máximo, todos los vehículos de la sección medida viajan a la misma velocidad.

Para tomar mediciones de flujos vehiculares se define el concepto de intervalo de seguimiento como el tiempo que separa al punto delantero de un vehículo en un flujo, del punto delantero del vehículo siguiente, medida en segundos; en la literatura técnica en inglés se conoce como “headway”. El intervalo depende de la velocidad, de la longitud y de la separación física entre los vehículos.

Si se denomina H al Intervalo o “Headway”, L es la longitud del vehículo y S es la separación entre los vehículos, que viajan a una velocidad V, se define el intervalo por la siguiente fórmula (Irving, J., 1978):

$$H = \frac{L+S}{V} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

El intervalo H es una medida de tiempo, si lo multiplicamos por la velocidad V, se obtiene una cantidad que llamaremos “D”, por “distancia”, que es la representación física de H, como se muestra en la Figura 14, a continuación:

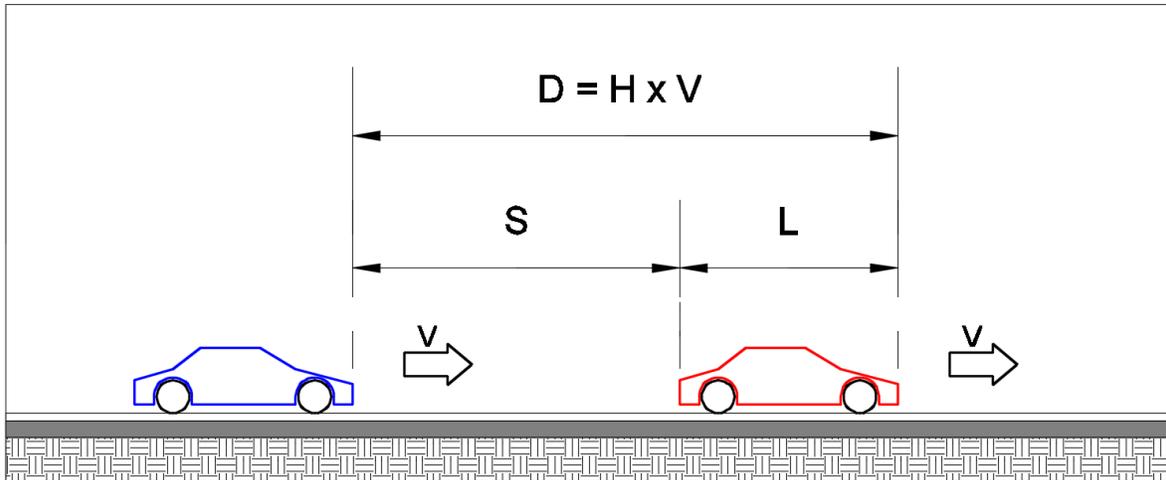


Figura 14. Definición gráfica de Intervalo o “Headway”.

Cuanto más largo sea el vehículo y más separado esté del siguiente, mayor será el intervalo. Cuanto mayor sea la velocidad, más pequeño será el intervalo.

El flujo horario de tránsito Q en un carril de una carretera se puede representar como cuántos intervalos H se pueden incluir dentro de una hora (Irving, J., 1978):

$$Q = \frac{3600 \text{ (seg/hora)}}{H \text{ (seg/veh)}} \quad Q = \frac{3600 \text{ (veh/hora)}}{H} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Cuanto menor sea el intervalo, mayor será la capacidad de la vía.

La reducción del intervalo depende del mecanismo utilizado para mantener la distancia intervehicular:

- **El control manual humano.** Un vehículo responde ante los comandos que le hace su conductor humano, quien tiene unos límites conocidos de percepción del peligro y de reacción ante éste. Es por esta razón que, tradicionalmente, las agencias de tránsito del mundo han recomendado mantener una distancia con el vehículo siguiente, para evitar una embestida si este último frena de súbito, de entre dos y tres segundos en condiciones normales, que se desglosan así:

1 segundo para percibir un peligro	+	1 segundo para reaccionar al peligro y aplicar el freno	+	1 segundo para que el vehículo responda y frene
---------------------------------------	---	---	---	---

En el “Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras” (SIECA, 2011), se utiliza el concepto de “*tiempo de percepción-reacción*” para calcular la “*Distancia de Visibilidad de Parada*” con una fórmula empírica experimental, usando un parámetro conservador de tiempo de percepción-reacción del conductor igual a 2.5 segundos; la distancia necesaria para detener el vehículo se calcula en un segundo término de la fórmula, dependiente de la tasa de desaceleración:

$$d = 0.278Vt + 0.039*V^2/a$$

En donde:

V = Velocidad de diseño, kph.

t = Tiempo de percepción-reacción, 2.5 segundos

a = Tasa de desaceleración, m/seg²

El mismo manual recomienda un valor para la tasa de desaceleración de 3.4 m/seg².

Por ejemplo, para una velocidad de 60 kph, la distancia sería de:

$$d = 0.278*(60)*(2.5) + 0.039*(60)^2/(3.4) = 41.7 \text{ m} + 41.29 \text{ m} = 82.99 \text{ m}$$

Además de esta fórmula, el manual recomienda un tiempo mínimo de 3 segundos para que un vehículo frene y se detenga completamente, como parámetro para diseñar carriles de desaceleración. Con estos datos se puede comparar el modelo de SIECA con la regla de los 3 segundos. Según SIECA:

Tiempo de percepción-reacción = 2.5 seg

Tiempo mínimo de frenado = 3.0 seg

Tiempo total necesario 5.5 seg

Los tiempos de frenado recomendados por el citado manual de SIECA, para vehículos de control manual, son mucho mayores a 3 segundos.

- **Mecanismos de control automático.** Con sensores automatizados, los vehículos que viajan en sucesión pueden mantener pequeñas distancias intervehiculares de forma constante. Se han desarrollado sistemas de control para conducir automóviles o camiones en grupos o pelotones, en una técnica conocida como “*Platooning*”, que se explica con más detalle en el apartado 2.3.6.2. “*Suspensión, propulsión, rodamientos, sistemas de guía y frenado*”, donde un vehículo al frente guía a una fila de vehículos que lo siguen, manteniéndose todos a una distancia constante durante las maniobras de frenado, aceleración y cambio de carril (Anderson, J.,1998), (Bishop, R., 2005). También hay sistemas de frenado de emergencia en vehículos comerciales que, igualmente, monitorean la distancia entre un vehículo y el siguiente para aplicar los frenos cuando se disminuye la separación vehicular a menos de lo aceptable. El tiempo de respuesta de esos sistemas se considera dentro de un rango que va de 0.20 seg. (Irving, J., 1978) o entre 0.12 y 0.20 seg. (Grover, C., 2008).

2.2. Cinemática

Para determinar la capacidad del sistema de transporte PRT, se debe estudiar el comportamiento de los vehículos en movimiento, para lo que se utilizan las siguientes ecuaciones:

2.2.1. Movimiento rectilíneo uniforme

Cuando la posición de un cuerpo cambia en el tiempo, a una tasa constante, se define la velocidad como:

Velocidad: $V = \frac{\text{Distancia}}{\text{Tiempo}}$ Si "x" es distancia medida desde un origen y "t" el tiempo

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

En notación diferencial: $V = \frac{dx}{dt}$ luego $dx = V dt$ y $\int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{t_1}^{t_2} V dt$

$$(x_2 - x_1) = V (t_2 - t_1) \quad \text{si } t_1 = 0 \quad \text{entonces} \quad x_2 = x_1 + Vt \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La posición final es igual a la posición inicial más la velocidad por el tiempo.

2.2.2. Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

Cuando la velocidad varía de manera uniforme en el tiempo, se presenta una aceleración = a.

$$a = \frac{dV}{dt} \quad dV = a dt \quad \text{entonces} \quad \int_{v_1}^{v_2} dV = \int_{t_1}^{t_2} a dt$$

$$(v_2 - v_1) = a (t_2 - t_1) \quad \text{si } t_1 = 0 \quad \text{entonces} \quad v_2 = v_1 + at \quad (\text{Ec. 2.5})$$

La velocidad final es igual a la velocidad inicial más la aceleración por el tiempo.

La posición “x” de un cuerpo en movimiento en un momento “t”, se comienza a calcular con la Ecuación 2.5:

$$v_2 = v_1 + at \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$\frac{dx}{dt} = V = v_1 + at$$

$$\text{Si } dx = (v_1 + at) dt \quad \text{entonces} \quad \int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{t_1}^{t_2} (v_1 + at) dt$$

$$\text{luego} \quad (x_2 - x_1) = v_1 (t_2 - t_1) + \frac{1}{2} a (t_2^2 - t_1^2) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$\text{Si } t_1 = 0 \quad \text{y} \quad \text{entonces} \quad x = x_0 + Vt + \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

2.2.3. Movimiento rectilíneo con variación de la aceleración

Cuando la aceleración varía de manera uniforme en el tiempo, se presenta una cantidad, conocida en la literatura técnica inglesa como “*jerk*” ó J. Generalmente se aplica el cambio de aceleración o *jerk* durante periodos cortos, para transicionar suavemente desde una velocidad constante a un estado de aceleración y nuevamente a velocidad constante

$$J = \frac{da}{dt} \quad da = J dt_j \quad \text{entonces} \quad \int_{a_1}^{a_2} da = \int_{t_1}^{t_2} J dt_j$$

$$(a_2 - a_1) = J (t_2 - t_1) \quad \text{si } t_{1j} = 0 \quad \text{y} \quad a_1 = 0 \quad \text{entonces} \quad a = Jt_j \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$a = \frac{dV}{dt} \quad dV = a dt_j \quad \text{entonces} \quad \int_{V_1}^{V_2} dV = \int_{t_1}^{t_2} a dt_j = \int_{t_1}^{t_2} J t_j dt_j$$

Si $t_{ij} = 0$ entonces $V = V_0 + \frac{1}{2} J t_j^2$ (Ec. 2.9)

$V = \frac{dx}{dt}$ $dx = V dt_j$ entonces $\int_{x_1}^{x_2} dx = \int_{t_1}^{t_2} V dt_j = \int_{t_1}^{t_2} (V_0 + \frac{1}{2} J t_j^2) dt_j$

Si $t_{ij} = 0$ entonces $x = x_0 + V_0 t_j + \frac{1}{6} J t_j^3$ (Ec. 2.10)

En resumen, durante el tiempo en que se aplica una variación de la aceleración con respecto al tiempo, con un valor J:

$a = J t_j$ (Ec. 2.8)

$V = V_0 + \frac{1}{2} J t_j^2$ (Ec. 2.9)

$x = x_0 + V_0 t_j + \frac{1}{6} J t_j^3$ (Ec. 2.10)

2.2.4. Control de vehículos automáticos en una vía

La estrategia de control de los vehículos es un aspecto importante para determinar aspectos de seguridad, capacidad y arquitectura del sistema.

Para esta labor existen básicamente tres métodos:

- **Control sincrónico.**

Modelado con base en los sistemas de control aéreo y de control ferroviario disponibles a finales de los años 60, consiste en imaginar espacios móviles que se desplazan por la vía, con unas dimensiones tales que pueden contener a un vehículo e incluir zonas de frenado; también se acostumbra modelarlo con puntos que se mueven a lo largo de la vía, cada uno posicionado en la nariz de un vehículo y se nombra como “sistema de seguimiento de puntos”. Un

computador central debe asignar una ruta de viaje y uno de esos espacios a cada vehículo de la red; cuando hay una intersección, la computadora instruye a los vehículos cerca de la intersección que se mantengan en su espacio o también puede ordenarles que adelanten o se atrasen hacia otro de los espacios móviles, para asegurarse de que todos tengan un espacio seguro de paso y que no haya colisiones. Este sistema requiere una comunicación constante con el computador central, cuya falla o el corte de la comunicación con él supondría el colapso de la red. Ofrece una capacidad menor a otros sistemas porque, antes de que el vehículo inicie su viaje, la computadora debe reservar todos los espacios móviles en las intersecciones a lo largo de la ruta que le asigna al vehículo, para garantizarle un viaje seguro y el viaje no puede iniciar antes de eso, generando demoras al viajero durante los horarios de mayor demanda, cuando es más difícil reservar todos los espacios seguros en las intersecciones de la ruta.

- **Control cuasi-sincrónico.**

En el sistema de control cuasi-sincrónico, también hay un computador central que se encarga de calcular una ruta inicial óptima para los vehículos, pero la coordinación de los vehículos y la asignación de los espacios móviles es dada por una computadora local que controla el área alrededor de una intersección, pero que no tiene influencia en la vía antes o después de ella. Cuando los vehículos se acercan al área de una intersección, la computadora local toma el control de ellos y los libera una vez que han pasado su zona de influencia. Mientras pasa por su zona, la computadora local actualiza la ruta del vehículo para optimizarla, enviándolo por las vías menos congestionadas. En espacios largos entre intersecciones, fuera de la influencia de las computadoras locales, se puede tener cualquier otro sistema de control (Anderson, J., 2016). Esta forma de re-dirigir los vehículos por nodos locales es similar a como los nodos de la red de internet distribuyen los paquetes de información (www.swedetrack.com).

- **Control asincrónico.**

También aquí se ocupa de un computador central que calcule las rutas más rápidas; éste es el método de control más simple. Consiste en mantener una distancia con el vehículo que se encuentra al frente, que no debe bajar de un mínimo aceptable y que depende de las capacidades de reacción y frenado de los vehículos. Es un modo anárquico de “seguimiento de vehículos” en vez de “seguimiento de puntos”. Guardar una distancia segura y evitar colisiones en las intersecciones depende de sistemas de detección y frenado dentro de los vehículos, para lo que se requieren estrategias de negociación del paso de los vehículos en intersecciones convergentes. El control asincrónico requiere intervalos o “headways” ligeramente mayores que el sistema cuasi-sincrónico, por lo que su capacidad es algo menor que la de éste último (Irving, J., 1978).

2.3. El sistema de Transporte Personal Rápido

¿Por qué es necesario definir un nuevo sistema de transporte público?

El motivo por el cual es necesario un nuevo servicio de transporte es que el transporte público, que es más eficiente en el uso del espacio en las vías y de los recursos materiales, no ofrece la comodidad y la flexibilidad del auto privado. El atractivo del auto particular es esa comodidad teórica de ofrecer un servicio de transporte de puerta a puerta; a pesar de esto, el uso del vehículo particular trae serios problemas de congestión del tráfico, contaminación atmosférica y mantenimiento costoso, por citar solo algunos.

El transporte público utiliza menos espacio y recursos que la flota de vehículos privados pero, a diferencia de los usuarios de estos últimos, un viajero de transporte público se ve enfrentado a situaciones como la siguiente: Un habitante de un suburbio camina de 5 a 10 minutos desde su casa hasta la parada de autobús, allí espera otros 10 minutos, tal vez en medio de la lluvia, hasta que ingresa al bus; si encuentra un asiento libre viajará un poco más cómodo, de lo contrario lo hará de pie en un autobús que se mueve lentamente en medio del tráfico congestionado, que realiza muchas paradas sin relación con este viajero del ejemplo y, si su destino implica viajar a otra zona atendida por otra línea de autobús, deberá repetir de nuevo el proceso de espera y viaje hasta llegar a la parada más cercana a su destino final y caminar hacia este último (Irving, J., 1978). Este escenario se presenta con el actual sistema de transporte público de Costa Rica; si éste se moderniza mediante un proceso de sectorización, que provea de carriles exclusivos para el transporte público, los tiempos de recorrido se reducirán, pero se mantendrán los elementos de incomodidad en el viaje, de caminar hacia, desde y esperar en la parada.

La flota de vehículos privados de Costa Rica ha ido en aumento desde que se redujeron los impuestos a la importación de los vehículos usados, durante el gobierno de Rafael Ángel Calderón Fournier (1990-1994) (Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (Costa Rica), 2015). Si se mantiene la tendencia al uso de transporte por automóvil privado, en un futuro aumentarán los problemas asociados con el crecimiento de la flota de automóviles y, por otro lado, los usuarios de transporte público serán sólo aquellos muy jóvenes para poseer licencia de conducir, muy pobres para comprar un vehículo, muy ancianos o con algún impedimento para manejar.

Actualmente, lo más aproximado a sintetizar el transporte privado y el transporte público es el servicio de taxi, porque es un servicio público, individualizado para el viajero, no requiere de un estacionamiento y va de puerta a puerta; hasta aquí parece el remedio perfecto, pero también mantiene los problemas de producir y sufrir la congestión del tráfico; contaminación y altos costos de operación del automóvil particular, al que debe añadirse el alto costo laboral del chofer que lo maneja; todo esto aleja al servicio de taxis de convertirse en una solución a la necesidad de transporte masivo.

Se necesita un sistema de transporte público que ofrezca las características que atraigan a un número significativo de los viajeros que hoy prefieren usar su automóvil (privacidad, disponibilidad inmediata, acceso puerta a puerta o muy cercano) y que también le dé una mayor movilidad y comodidad a su público ya cautivo (eliminar el transbordo, ofrecer menores tiempos de espera y de viaje entre origen y destino).

El Transporte Personal Rápido es un concepto de transporte que pretende sintetizar las mejores características del transporte público y del automóvil privado.

2.3.1. Definición de sistemas de Transporte Personal Rápido

La definición de Transporte Personal Rápido (Personal Rapid Transit o PRT) se enfoca en satisfacer la mayoría de los requerimientos para un sistema de transporte público, anteriormente apuntados:

El Transporte Personal Rápido se define como un sistema:

- Con una vía separada de las calles actuales para no interferirse con el tráfico automotriz, peatonal ni ciclístico, preferiblemente elevada para no requerir la compra de un nuevo derecho de vía y compartir, a una altura diferente, el derecho de vía existente.
- Con vehículos automáticos, sin chofer.
- Con vehículos pequeños para uso privado y viaje sentado, como en un taxi.
- Servicio de transporte de punto a punto, entre estaciones existentes, sin paradas intermedias.
- Servicio a la demanda del usuario, sin horarios pre-establecidos.
- Suficientes vehículos disponibles, para minimizar los tiempos de espera en las horas de mayor demanda, lo ideal es que el vehículo espere la llegada del usuario y no lo contrario.
- Vehículos de tracción eléctrica, para no generar contaminación ni ruido.

2.3.2. Diferenciación entre sistemas automáticos de transporte público

Existen otros sistemas automáticos de transporte por una vía exclusiva, que deben definirse para diferenciarse del Transporte Personal Rápido o PRT (Irving, J., 1978).

2.3.2.1. Transbordo de Circuito Cerrado

El Transbordo de Circuito Cerrado (Shuttle Loop Transit SLT), consiste en un circuito cerrado de vías en las que se desplaza uno o varios vehículos automáticos, que se detienen en cada estación sobre la misma vía. La distancia entre vehículos debe permitir que cada uno de ellos realice la parada, deje subir y bajar pasajeros y abandone la estación antes de que llegue el siguiente vehículo.

Un ejemplo de este sistema es el tren automático Yurikamome del Distrito de Odaiba en Tokio, Japón, que recorre continuamente un circuito de una vía por sentido, entre el centro de Tokio y los diferentes sectores de Odaiba. En esta definición también se enmarcan los sistemas automáticos de transporte de pasajeros (*Automatic People Movers o APM*) que están en servicio en varios aeropuertos de todo el mundo.

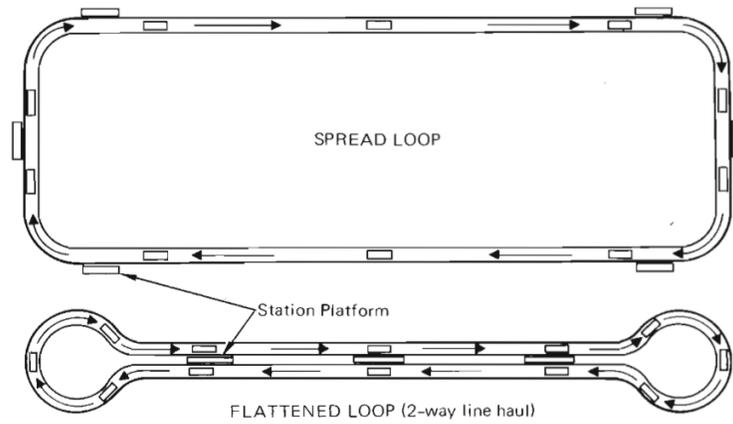


Figura 15. Transbordo de circuito cerrado (SLT). (Irving, J., 1978).



Figura 16. Vías elevadas del tren automático Yurikamome de Odaiba, Tokio. (Foto del autor)



Figura 17. Tren automático Yurikamome en Odaiba, Tokio. (<http://muza-chan.net>).



Figura 18. Cabina del tren Yurikamome, sin conductor. (Foto del autor).

2.3.2.2. Transporte Grupal Rápido

El Transporte Grupal rápido (Group Rapid Transit - GRT) puede ser considerado como un sistema de autobús automático cautivo en una vía exclusiva, porque un pasajero debe esperar el vehículo, compartir el espacio con otros pasajeros y detenerse en las paradas que son del interés sólo de otros viajeros. Se diferencia del Transbordo de Circuito Cerrado en que el vehículo se detiene sólo en aquellas paradas que son del interés de algún pasajero y pasa de largo por las que no (Irving, J., 1978). A diferencia del SLT, las paradas se encuentran separadas de la vía principal, como en el caso del sistema en la Universidad de West Virginia. Existen varios ejemplos de este sistema, mencionados en el apartado 1.4:

- Sistema automático de transporte de la Universidad de West Virginia, Morgantown, West Virginia, EEUU (1975).
- Sistema H-Bahn de la Universidad de Dortmund, Renania del Norte-Westfalia, Alemania (1984).
- Sistema Sky Train del Aeropuerto de Dusseldorf, Renania del Norte-Westfalia, Alemania (2002).

Todos ellos operan como un autobús automatizado.

2.3.3. Historia de los sistemas PRT

La idea del transporte automatizado de pasajeros no es nueva en su formulación ni en su aplicación. Existen sistemas automatizados en trenes urbanos como el sistema BART (1972) en la Bahía de San Francisco, California; el Port Liner (1981) de Kobe, Japón; el tren elevado Docklands Light Railway (1987) al este de Londres, y el ya mencionado Yurikamome de Odaiba (1995) en Tokio, Japón.

La idea de los sistemas PRT comenzó en los EEUU, donde la construcción de una gran red de carreteras después de la 2da. Guerra Mundial y el aumento de la tenencia de automóviles privados generó una acelerada suburbanización; las personas empezaron a vivir cada vez más lejos del centro de las ciudades y a desplazarse diariamente a los centros de trabajo: oficinas y fábricas en los centros urbanos. Desde entonces, se ha visto que las carreteras alcanzan con facilidad el límite de su capacidad durante las horas de mayor afluencia u “horas pico”. La solución ensayada por los encargados de las redes de transporte era la de añadir más carriles a las carreteras, conforme estas se iban saturando, pero la congestión siempre iba un paso delante del aumento en la capacidad de la carretera. Esa situación se mantiene hasta nuestros días en la mayoría de zonas metropolitanas del mundo.

Varias personas, que se mencionarán en el apartado 2.3.3.3. “*Sistemas desarrollados de Transporte Personal Rápido*”, se dedicaron a analizar el problema del transporte de personas desde el inicio de los años 50 del siglo XX y llegaron a la conclusión de que los límites de capacidad de la red de carreteras no hacían del automóvil particular el mejor medio para el transporte masivo de personas y se dedicaron, privadamente, a desarrollar ideas de sistemas que pudieran sintetizar la comodidad del automóvil privado y la capacidad de los medios de transporte masivo.

2.3.3.1. Legislación y apoyo gubernamental

El desarrollo de los sistemas de transporte es algo muy costoso y, generalmente, requiere del apoyo gubernamental para poner a punto un sistema funcional y, por eso, la mayoría de las nuevas ideas que surgieron en los EEUU durante los años 50, se mantuvieron en un plano teórico hasta la siguiente década.

“El soporte financiero gubernamental para un proyecto local de desarrollo y demostración, virtualmente asegura a la compañía contra las pérdidas por inversiones en talleres de producción e ingeniería. Este seguro es un incentivo lo suficientemente fuerte para que un desarrollador explote su sistema comercialmente. La comercialización exitosa es una ventaja para el Gobierno, pues las regalías se le pagan a éste hasta que los avances de efectivo, con los intereses, sean pagados por completo. Por tanto, el gobierno es motivado a inspirar la adopción de nuevos sistemas para asegurarse un retorno de la inversión en el desarrollo inicial.” (Office of Technology Assessment, 1975).

Los nuevos conceptos de transporte llegaron a oídos de algunos políticos de los EEUU a principios de los años 60, en particular del congresista Henry S. Reuss de Milwaukee, Wisconsin, quien incluyó el tema de la necesidad de crear nuevos sistemas de transporte en sus discursos y fue asignado al subcomité que redactó la Ley del Transporte Urbano Masivo de 1964 (Urban Mass Transportation Act). Esta ley creó la Administración del Transporte Masivo Urbano (Urban Mass Transportation Administration o UMTA) como una unidad del Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano (Department of Housing and Urban Development o HUD). La sección 6 de esta ley, titulada “Investigación, Desarrollo y Proyectos Demostrativos”, instruía al secretario de la UMTA a “...llevar a cabo un estudio y preparar un programa de investigación, desarrollo y demostración de nuevos

sistemas de transporte urbano, que llevarán gente y mercancías dentro de las zonas metropolitanas de una forma rápida, segura, sin contaminar el aire y en una manera que contribuirá a la buena planificación de la ciudad...” (Anderson J.E.,1996).

En 1966, HUD patrocinó un Estudio de Verano de Ciencia y desarrollo Urbano en el Instituto Oceanográfico Woods Hole; donde el panel de Transporte recomendó la realización de un estudio que investigara y promoviera la mejor interacción entre los sistemas de transporte y el desarrollo urbano. Con base en este insumo, la UMTA puso en práctica la Sección 6 de la Ley del Transporte Urbano Masivo, diseñó y financió un estudio que atendiera cuatro aspectos fundamentales:

- Descripción de proyectos que pudieran demostrar mejores resultados con tecnologías existentes en un plazo de seis meses a tres años.
- Mejoras evolutivas de tecnologías existentes a desarrollar en un plazo de 3 a 8 años.
- Descripción de soluciones tecnológicas futurísticas basadas en necesidades futuras y cómo incentivarlas.
- Preparación de estudios a profundidad del conocimiento disponible de los patrones de demanda de transporte y de la interrelación entre el transporte con el uso urbano del suelo.

Por instrucción de HUD, la UMTA comisionó 17 estudios de nuevos medios de transporte, con una asignación de \$500,000 para cada uno. Los estudios se publicaron en 1968 y se conocieron como los “Reportes HUD”. Estos estudios inspiraron muchos más programas de investigación a lo largo de los años 60 y 70.

Los desarrolladores de los 17 reportes y los temas analizados en cada uno, fueron los siguientes (Merritt, W., 1993):

- a. **Day & Zimmermann, Inc.:** Mejoras de corto plazo con tecnologías existentes, que podrían realizarse en un plazo de seis meses a tres años.
- b. **Westinghouse Air Brake Co.; Melpar, Inc.; Wilbur Smith and Associates; Institute for Public Administration:** Mejoras evolutivas para el transporte público en un horizonte de tres a ocho años.
- c. **Stanford Research Institute:** Descripciones, evaluaciones, programas de desarrollo e impacto en la vida urbana de soluciones futuristas, a ser desarrolladas en un plazo de 5 a 15 años.
- d. **General Research Corporation of Santa Barbara, California:** Análisis sistémico de ciudades reales en una variedad de casos; examen de políticas y su ritmo de aplicación.
- e. **Battelle Memorial Institute:** BMI realizó un análisis inicial de varios de los estudios presentados y entre ellos detectó proyectos con potencial para investigación y desarrollo.
- f. **Battelle Memorial Institute:** En otro reporte encomendado, BMI examinó el planeamiento y las prácticas del transporte de mercancías en el ambiente urbano. Se desarrolló una metodología para incorporar el estudio del traslado de mercancías como una parte integral del proceso de planeamiento urbano.

- g. Cornell Aeronautical Laboratory, Inc.:** Estudio de un sistema con vehículos bimodales (conducción manual por la calle y automática en una guía) y su aplicación en la ciudad de Buffalo, Nueva York.
- h. North American Rockwell Corporation:** Exploración de tecnologías avanzadas de los campos aeroespacial y militar que podrían ser transferibles al transporte urbano; requerimientos para implementar cuatro sistemas avanzados de transporte.
- i. General Electric Company:** Investigación de sistemas electrónicos de control, análisis de los requerimientos para esos sistemas y 10 propuestas de proyectos de investigación y desarrollo para sistemas de control.
- j. General Motors Corporation:** Investigación y recomendaciones para el análisis de sistemas de transporte; estudio de casos para implementar nuevos conceptos sistémicos, con los que se identificaron y se evaluaron problemas técnicos y metodológicos específicos. Se hicieron recomendaciones para un programa de investigación de nuevos y mejores métodos de planeamiento y evaluación de modos de transporte.
- k. Peat, Marwick, Livingston & Company:** Desarrolló relaciones funcionales para estimar la demanda de transporte de 1965 y para proyectar la demanda de los años 1975 y 1985, en todas las áreas urbanizadas de los EEUU. También diseñó un programa de investigación para desarrollar relaciones de demanda de viajes en las subdivisiones funcionales dentro de un área urbana.
- l. Consad Research Corporation:** Revisión, análisis y evaluación de las técnicas de predicción del uso del transporte público y recomendación de un programa de investigación de ocho tareas para para lograr una mejora significativa en esas técnicas.
- m. Transportation Research Institute of Carnegie-Mellon University:** Investigación de la demanda latente de transporte para grupos y servicios urbanos que no está siendo atendida por los sistemas existentes. Se recomendaron investigaciones adicionales que mejoren la comprensión de las potenciales necesidades de transporte de estos grupos.
- n. Abt Associates, Inc.:** Examinó los efectos de una amplia gama de factores cualitativos en la escogencia de modos de transporte urbano.
- o. Barton-Aschman Associates:** Presentó guías útiles en la selección, desarrollo y planeamiento de nuevos sistemas de transporte urbano. Desarrolló criterios para evaluar sistemas alternativos de transporte urbano; técnicas para coordinar la planeación del transporte con la del uso de la tierra y más temas de investigación fueron identificados. Esta empresa comisionó artículos a 13 investigadores acerca del papel del transporte en la vida moderna.
- p. Regional Economic Development Institute, Inc.:** El estudio se enfocó en cómo el transporte y el uso urbano del suelo se pueden coordinar en nuevas circunstancias. Determinó las necesidades de transporte y el potencial para nuevas soluciones para los problemas de transporte urbano de nuevas y cuidadosamente planeadas comunidades.
- q. Midwest Research Institute:** Ellos examinaron los requisitos especiales de transporte de las ciudades pequeñas, identificando las necesidades de adaptación a los patrones locales de demanda y los potenciales medios para adaptarse a ellos.

De los 17 reportes HUD, el más relevante fue elaborado por la General Research Corporation of Santa Barbara, California (GRC), para modelar computacionalmente sistemas alternativos de transporte en 4 ciudades reales: Boston (ciudad grande con sistema de transporte público desarrollado), Houston (ciudad grande sin transporte público desarrollado), Hartford (ciudad pequeña con transporte público) y Tucson (ciudad pequeña sin transporte público). La conclusión del reporte fue que, si sólo se desarrollaban sistemas convencionales de transporte y, con el crecimiento previsto de la población y de la flota de automóviles, los problemas de las ciudades continuarían empeorando (Hamilton, F. & Nance, D. 1969).

Los reportes HUD fueron resumidos en un informe de 1968, enviado al Congreso de los EEUU por el presidente Lyndon Johnson, llamado “*Tomorrow’s Transportation: New Systems for the Urban Future*”; preparado por William Merritt, entonces Administrador Asociado de Investigación de la UMTA y entregado al Presidente Johnson por el Secretario del Departamento de Vivienda y Desarrollo Urbano (HUD), Robert Weaver. En este informe se presenta la información en cuatro secciones (Merritt, W., 1993):

- a. Urbanización y transporte urbano.
- b. El rol y la responsabilidad de la autoridad federal.
- c. ¿Qué debería hacerse?
- d. Un programa recomendado de investigación y desarrollo.

En el tercer apartado, “¿Qué debería hacerse?”, se explican los 8 sistemas, de entre los muchos presentados, con mayor potencial de aplicación práctica y de solución a los problemas urbanos:

- a. **Public Automobile Service (PAS).** El Servicio Público de Automóviles es una modalidad de vehículos de alquiler para viajes cortos, con pequeños autos eléctricos, de bajo desempeño y capacidad máxima de cuatro pasajeros, que ayudaría a cubrir la “última milla” entre la estación de un transporte masivo y el centro de una población, complementando así el servicio de transporte público. No se estimó apropiado para viajes largos hasta el hogar o en centros de reunión multitudinarios.
- b. **Dial-A-Bus (Bus activado por demanda).** Se propuso como un servicio que combinaría la economía de los buses de tamaño pequeño (12 a 24 pasajeros) con la flexibilidad de los taxis. Los usuarios llamarían con antelación a un centro de reservaciones que les ofrecería las opciones de: un bus exclusivo de puerta a puerta, un bus exclusivo de estación a estación, un servicio grupal hacia un centro de actividad o de trabajo; buses de ruta fija que pueden hacer desviaciones para recoger a un pasajero que no esté demasiado lejos de esa ruta. Un sistema computarizado monitorearía la ubicación de los buses y los pasajeros y determinaría los vehículos con las mejores rutas para cada usuario.
- c. **Transporte Personal Rápido (PRT).** El concepto de PRT de este estudio de nuevos sistemas contiene los siguientes elementos: Viajes ininterrumpidos entre origen y destino; un derecho de vía exclusivo, vehículos usados como taxi de operación automatizada, vehículos ligeros de tamaño pequeño y con la misma capacidad de un automóvil (de 4 a 6 pasajeros), paradas en líneas adyacentes paralelas a la línea principal, para dejar vía libre a los demás vehículos que circulan por ella. El estudio señala dos puntos como críticos: crear una red extensa para que los usuarios no tengan que desplazarse mucho antes de ingresar al sistema y también,

desarrollar sistemas de control que permitan operar los vehículos con una pequeña separación entre ellos, para aumentar la capacidad de transporte del sistema.

- d. **Sistemas de vehículos bimodales.** Serían vehículos pequeños, privados o públicos que podrían ser conducidos manualmente a una guía automatizada, dentro de la cual operarían como un sistema PRT. Una vez cercanos a su destino final, los vehículos saldrían de la guía automatizada y volverían a ser conducidos como un auto normal.
- e. **Bus bimodal automatizado.** Un sistema de autobuses que, en ambientes urbanos operaría como un Dial-A-Bus y, en destinos alejados, viajaría en modo automatizado por una vía exclusiva.
- f. **Tarimas móviles y transbordadores ferroviarios.** Se propone como una forma ágil de llevar a los vehículos desde un centro de población hacia los suburbios y viceversa. El medio de transporte sería un sistema o tren de plataformas que circularían sobre las vías férreas de poco uso en los centros de población o sobre un carril de una autopista; los conductores colocarían su vehículo sobre una plataforma y viajarían distancias cortas y medias dentro de él hasta el punto de desembarco de nuevo a la carretera, donde volverían a tomar el control.

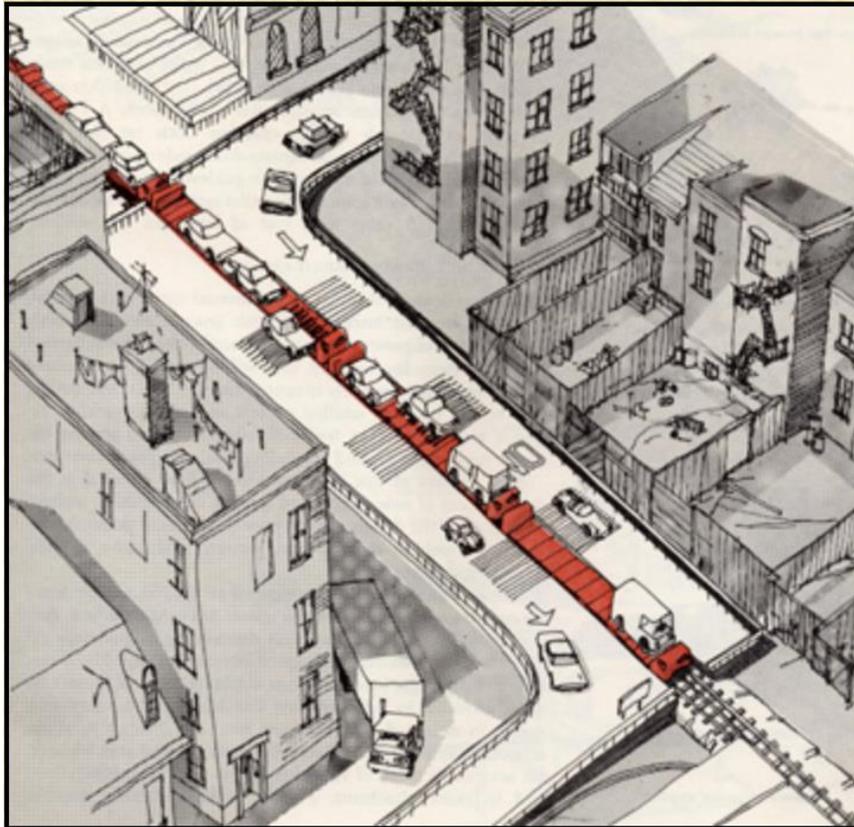


Figura 19. Tarimas móviles y transbordador ferroviario. (Merritt, W., 1993)

- g. Enlaces intraurbanos de transporte rápido.** Consisten en vías exclusivas para la conexión rápida de centros urbanos, donde los vehículos individuales, controlados por un centro automatizado, podrían moverse a modo de convoy por su propia potencia o sobre un medio especial como: carros sobre rieles, plataformas de suspensión neumática o magnética. Siguiendo este concepto en una escala grande, en la actualidad, los trenes de alta velocidad Eurostar transbordan pasajeros y vehículos entre las ciudades de Londres, París y Bruselas, utilizando derechos de vía férrea existentes y el Eurotúnel bajo el Canal de La Mancha; en cuanto al transporte de sólo pasajeros, las redes de trenes de alta velocidad desarrolladas en las últimas décadas cumplen ese rol (TGV, AVE, Shinkansen, ICE).

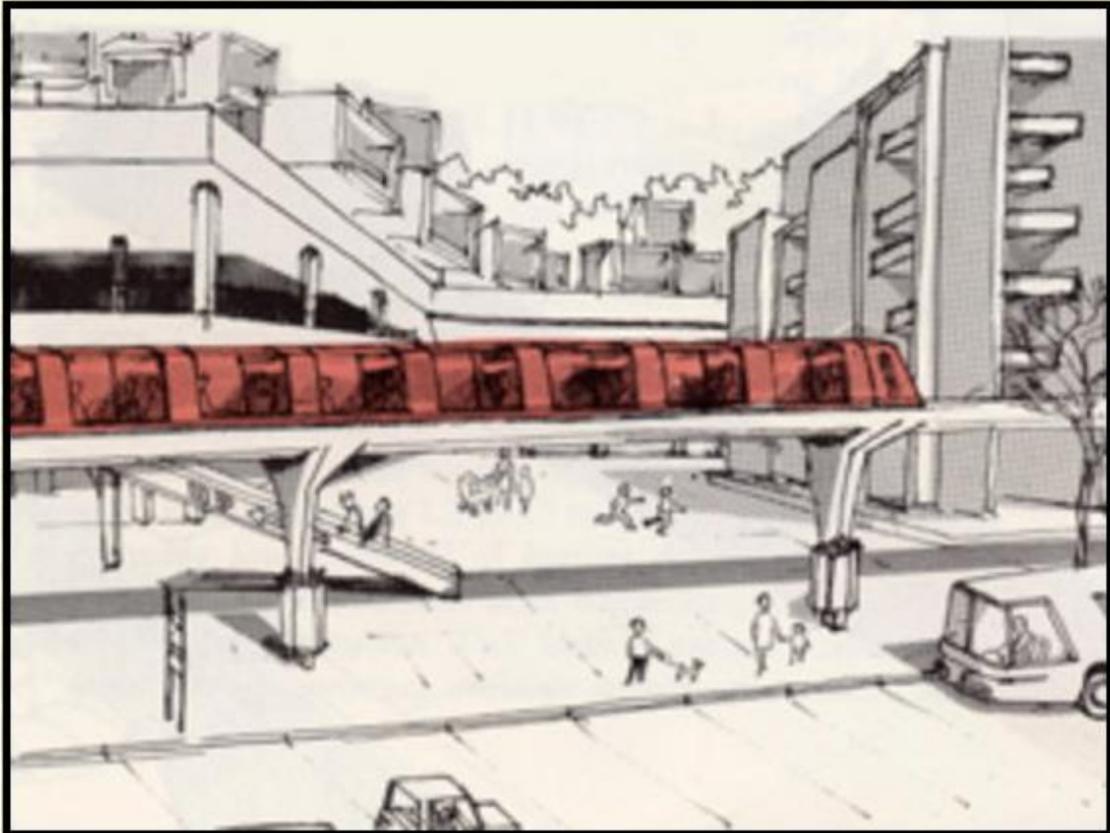


Figura 20. Enlace intraurbano de alta velocidad. (Merritt, W., 1993)

- h. Sistemas para grandes centros de actividades.** Para los lugares con grandes concentraciones de personas, como grandes aeropuertos, centros comerciales, parques industriales, universidades y los distritos de negocios de las ciudades, se propusieron sistemas para mover personas como: bandas transportadoras para peatones, vehículos de transbordo en vía exclusiva en forma de cápsulas individuales o pequeños trenes.

2.3.3.2. Consolidación institucional del transporte en los EEUU y desarrollo de sistemas PRT

En 1965, Najeeb Elías Halaby, director de la Administración Federal de Aviación de EEUU (Federal Aviation Administration o FAA) propuso al presidente Lyndon Johnson que el tema del transporte fuera elevado al nivel del Gabinete, para desarrollar una apropiada política de transporte y que la FAA se incluyera en esa cartera. En consecuencia, en 1966 se aprobó en el Congreso de esa nación la creación del Departamento de Transporte de los EEUU (Department of Transportation o DOT), que absorbió a la FAA en 1966 y también a la UMTA, en 1968 (U.S. Department Of Transportation. 2016).

Los varios programas de investigación que se financiaban hasta 1968 se vieron desacelerados por el cambio de administración en 1968, cuando se cambiaron los directores de la agencia UMTA y su enfoque pasó a disminuir aún más la importancia de la Investigación y Desarrollo, en favor de las tecnologías de transporte existentes (Anderson J.E.,1996).

Dos programas que el DOT y la UMTA intentaron inaugurar en corto tiempo presentaron problemas, que luego fueron solucionados, pero que resultaron muy publicitados en la prensa y contribuyeron al escepticismo del público y de los políticos en las nuevas tecnologías del transporte:

- El sistema automatizado de los trenes BART en San Francisco no detuvo a un tren al final de la línea y éste salió hasta el estacionamiento de la estación, hiriendo a 13 personas (1972).
- El sistema PRT de la Universidad de West Virginia en Morgantown sufrió grandes demoras; se esperaba inaugurarlo en 1972 (antes de la elección presidencial) y se abrió en 1975; además, terminó cuadruplicando su costo estimado.

Entre el 27 de mayo y el 4 de junio de 1972, se realiza la feria U.S Transportation Exposition, también conocida como Transpo '72, en los terrenos del Aeropuerto Internacional Dulles, en Washington D.C. Fue organizada por el Departamento de Transporte de los EEUU (DOT), con un costo de \$10 millones, para mostrar los mayores avances a la fecha en tecnología de transporte; se exhibieron trenes de alta velocidad, aviones de aerolínea con cabina ancha y sistemas automatizados de transporte de pasajeros; 1.2 millones de personas llegaron a la exhibición. La feria tuvo éxito en el apartado aeronáutico, pero en cuanto a los sistemas de transporte automatizado de pasajeros, no se concretó ningún proyecto.

También en 1972, además del apoyo dado previamente a algunos proyectos de desarrollo de sistemas automatizados de transporte, la UMTA crea el programa de financiamiento Advanced Group Rapid Transit (AGRT), que buscaba desarrollar sistemas con especificaciones que los colocaban como una tercera opción entre los transbordadores automatizados de personas (sistemas Shuttle Loop Transit SLT) y el Group Rapid Transit (GRT) y que consistían en vehículos PRT con capacidad de 12 pasajeros y velocidad de crucero de 40 mph (64 kph). Este programa impulsó el desarrollo de varios programas de sistemas PRT en los EEUU (Office of Technology Assessment, 1980). La segunda y última fase de este programa finalizó en 1981, con la llegada al poder de Ronald Reagan.

2.3.3.3. Sistemas desarrollados de Transporte Personal Rápido

A continuación, se presenta un resumen de conceptos y sistemas que tuvieron algún grado de desarrollo:

a. Donn Fichter

Aunque otras personas también pueden haber llegado a conclusiones similares acerca de las necesidades y problemas del transporte de personas, Donn Fichter fue quien primero las divulgó de una forma sistematizada. En 1953, para disminuir los problemas de tránsito que estaba causando la acelerada suburbanización en los Estados Unidos de Norteamérica, el ingeniero del Departamento de Transporte del Estado de Nueva York, Donn Fichter, comenzó a imaginar un sistema de taxis automatizados, sin chofer, que utilizarían una vía exclusiva para transitar separados de los demás vehículos que utilizan los caminos; los vehículos automáticos serían eléctricos, se rentarían como taxis y viajarían sin escalas entre pares de estaciones predeterminadas, a través de la vía exclusiva. En 1964 publicó sus ideas en el libro “Individualized Automated Transit and the City”, pero nunca desarrolló un prototipo operacional (Anderson J.E.,1996).

b. Monocab

El contratista de Texas Edward O. Haltom también comenzó a conceptualizar un sistema, llamado Monocab, en 1953. A diferencia de Fichter, su propósito inicial era el de ofrecer transporte grupal, multitudinario, como en los trenes y monorraíles de hoy, pero luego razonó que, con carros pequeños desplazándose muy cerca unos de otros, podría obtener capacidades de transporte iguales o mayores a las de los sistemas grupales, con infraestructura (vigas y columnas) más liviana y económica. Su proyecto consistía en muchos carros con capacidad de 6 pasajeros controlados automáticamente, viajando suspendidos de una viga a distancias cortas unos de otros. La idea fue comprada por la compañía Vero Inc., de Garland, Texas, quienes construyeron un circuito de pruebas a escala natural en 1969. En esa época, el programa espacial de la NASA ya había alcanzado su objetivo de llevar hombres a la luna, además de que el presidente Richard Nixon buscaba la forma de sacar a los EEUU de la guerra en Vietnam y, por eso, la industria aeroespacial preveía una disminución de sus ingresos, por lo que debía diversificar sus inversiones: Monocab fue adquirido por la empresa aeroespacial Rohr, que en 1971 decidió modificar el diseño y añadir suspensión magnética y motores de inducción lineal, construyendo una pista de pruebas en Chula Vista, California.

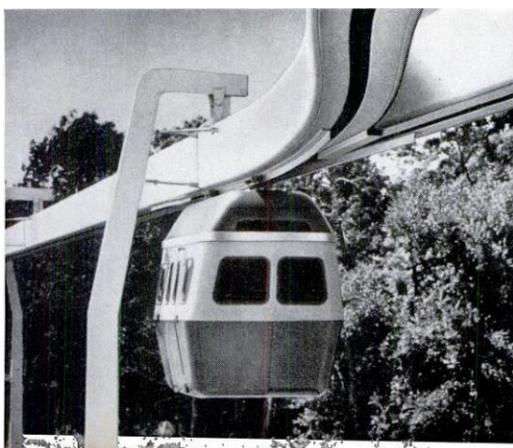


Figura 21. Monocab de Vero Inc.
(Wahl, P., 1971)



Figura 22. Monocab de Rohr.
(Anderson, J.,2009)



Figura 23. Monocab de Rohr en Trans Expo 72, exponiendo el módulo de propulsión dentro de la viga de soporte. (www.advancedtransit.org)

En 1974, Rohr obtiene fondos de desarrollo del programa AGRT de la UMTA, cambia la viga de soporte de acero por una viga de concreto, el sistema de suspensión con ruedas por otro de levitación magnética y los motores rotatorios de propulsión los cambia por motores de inducción lineal, con lo que eliminó la mayoría de partes móviles del sistema, que fue renombrado como ROMAG; además, al concepto de vehículo suspendido se le añadió otro de vehículo apoyado sobre la viga.

Lamentablemente, la crisis petrolera de 1973 y subsiguientes problemas con el valor en bolsa de las acciones, hizo que Rohr perdiera capital y vendiera las patentes a Boeing, empresa que detuvo el programa en 1981, cuando finaliza el programa AGRT (Anderson J.E.,1996), (Rydel E., 2001).



Figura 24. Dos vehículos ROMAG de Rohr con suspensión magnética, en Chula Vista, California.
(www.staff.washington.edu/jbs/itrans/romag.htm)

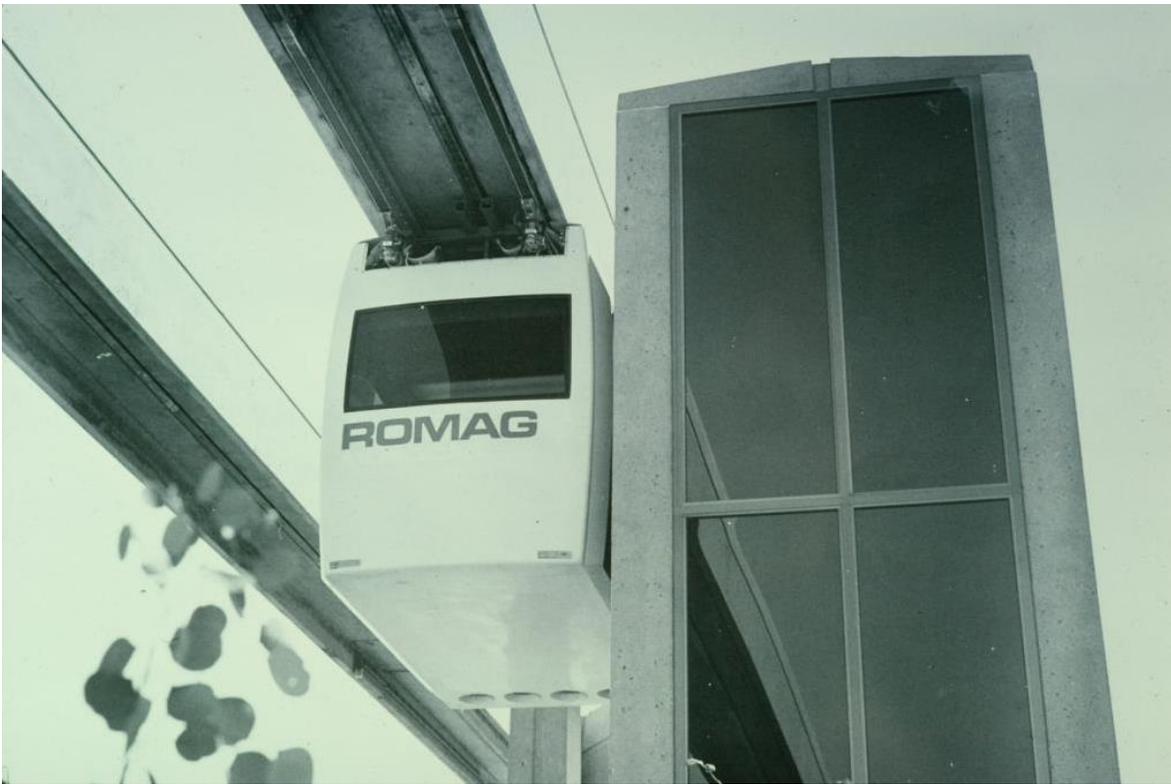


Figura 25. Vehículo ROMAG de Rohr con suspensión magnética, en Chula Vista, California.
(www.staff.washington.edu/jbs/itrans/romag.htm)

c. Hovair

En 1960, un grupo de investigadores de General Motors desarrollaba vehículos de cojín de aire para la milicia estadounidense y vieron que tal sistema podía ser aplicado al transporte de pasajeros, con vehículos pequeños que se desplazarían por una vía exclusiva de concreto en forma de “U”. Como los vehículos no tenían contacto con el camino, se desarrolló un motor eléctrico de inducción lineal al lado de la vía para generar el impulso de avance. Las leyes anti-monopolios de los EEUU le impidieron a General Motors dedicarse a los sistemas masivos de transporte y el grupo desarrollador fundó la compañía Transportation Technology, Incorporated (TTI) para seguir adelante con el sistema, que se llamó Hovair. Desarrollaron prototipos en Detroit, Michigan (1969) y, luego de ser adquiridos por la Compañía de Elevadores OTIS, en 1972 se presentó el prototipo en la exposición internacional de transporte Transpo72 en Denver, Colorado. Luego de ser comprado por OTIS, el sistema dejó de ser un PRT/GRT para transformarse en un transbordador automático entre dos puntos, del tipo Shuttle Loop Transit (SLT), que también se conoce como Automated People Mover (APM). En el sistema Hovair, los vehículos de cojín de aire viajan en una vía de concreto con forma de “U” y son desplazados por un cable de tracción; por eso también se les conoce como “elevadores horizontales”. Entre 1977 y 1979, se construyó en el Centro Médico de la Universidad de Duke en Durham, Carolina del Norte, un sistema Hovair SLT de tres estaciones, tres vehículos y 500 metros de longitud que estuvo en servicio por 30 años hasta que, en 2009, se demolió para ampliar el hospital (Duke TODAY, 2017), (Anderson J.E., 1996).

OTIS ha instalado y están en uso sistemas similares en:

La ciudad de Serfaus, Austria (instalado en 1985); Aeropuerto de Cincinnati, Ohio (1994); Getty Center en Brentwood, Los Angeles, California (1997); Hospital de Huntsville, Alabama (2000); Aeropuerto de Minneapolis-Saint Paul (2001); Aeropuerto Metropolitano del Condado de Wayne en Detroit, Michigan (2002) y en el Aeropuerto de Zurich, Suiza (2003).

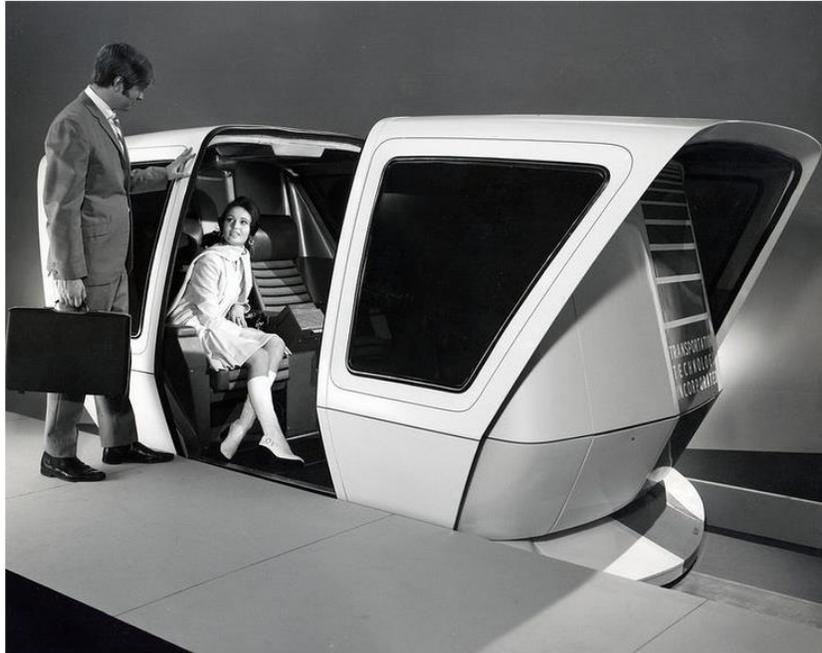


Figura 26. Prototipo del Sistema PRT Hovair, de TTI. (Wahl, P., 1971)



Figura 27. Sistema Otis-Hovair. Centro Médico Universidad de Duke, Durham, Carolina del Norte. (Ildar Sagdejev. www.specious.github.io)

d. Alden staRRcar / Morgantown WVU

En 1955, William Alden, creó una compañía llamada Alden Self-Transit Systems Corporation; ya para 1960 diseñó un sistema PRT que llamó staRRcar (siglas de “*Self-transit Rail and Road car*”), con vehículos pequeños eléctricos de tres asientos y que sería dual: se conduciría como un auto normal desde la casa hasta una guía y ésta lo llevaría de forma automatizada hasta otro punto, donde se separaría de la guía y se conduciría nuevamente en modo manual hasta el destino final. Conforme avanzó el desarrollo, se decidió que era muy complejo implementar el sistema dual y, en 1966, se optó por desarrollarlo con vehículos cautivos en la vía exclusiva. Se cambió la forma de los vehículos, que pasaron a tener 6 asientos, una longitud de 3 metros, ancho de 1.8 m y alto de 1.64 m. La distancia entre los vehículos y las órdenes para los cambios de dirección se daban mediante una computadora central. Se construyó una pista de prueba en Bedford, Massachusetts, en 1968.

Paralelamente, en la Universidad de West Virginia en Morgantown, el profesor de ingeniería industrial Samy Elias impulsó el desarrollo de un sistema PRT para el campus de la universidad y, en 1969, fue capaz de obtener una partida de \$50,000 de parte de la UMTA para realizar un estudio comparativo de tres sistemas de PRT: Monocab, Dashaveyor y Alden staRRcar. El recientemente formado Departamento de transporte de EEUU (DOT) realizó la escogencia, que favoreció al staRRcar (Richards, B., 2001). El DOT tenía la meta de que el sistema estuviese en operación antes de las elecciones presidenciales de EEUU en 1972 (Anderson J.E.,1996). El costo estimado del proyecto oscilaba entre \$15 y \$20 millones.



Figura 28. Alden staRRcar en su versión de modo dual.
(<http://oldconceptcars.com/1930-2004/alden-starrcar-1966/>)



Figura 29. Alden staRRcar en su versión de modo cautivo en vía exclusiva, en la pista de pruebas de Bedford, Massachusetts. (Whal, P., 1971)

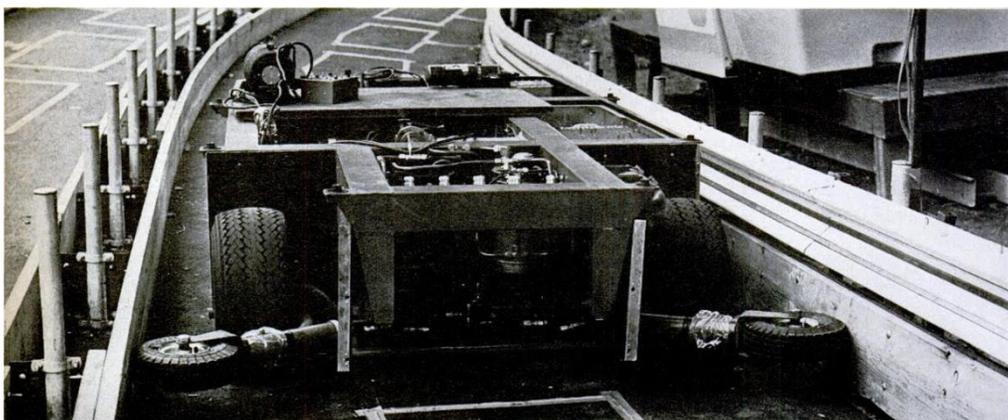


Figura 30. Chasis del Alden staRRcar, en su versión de modo cautivo en vía exclusiva. (Whal, P., 1971)

Cuando funcionarios del DOT inspeccionaron las instalaciones de Alden Self-Transit Systems Corporation, consideraron que era una empresa muy pequeña para hacerse cargo de un Programa Federal de Demostración; el DOT se hizo cargo de la financiación y buscó contratistas que, en su criterio, pudieran cumplir con los plazos escogidos (Anderson J.E., 1996):

- Comisionaron al Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (Jet Propulsion Laboratory o JPL) para manejar el proyecto y firmaron con ellos un contrato en diciembre de 1970.
- El contratista aeroespacial Boeing construiría los vehículos.
- Bendix Corporation supliría los sistemas de control.
- F.R. Harris Engineering Company diseñaría las vías, estaciones y demás infraestructura

El contrato de construcción se firmó en abril de 1971 y las obras comenzaron en octubre de ese año. Un año después, el 24 de octubre de 1972, se realizó una demostración con el Secretario del DOT y la hija del Presidente Nixon (Merritt, W., 1993).

Ninguna de las compañías contratadas tenía experiencia en este tipo de sistemas. JPL pidió dinero al DOT para contratar ingenieros que hicieran un análisis de sistemas, similar al del programa espacial más, el DOT no tenía recursos para ese fin y al cabo, el JPL se desligó del programa en agosto de 1971 (Anderson J.E.,1996).

La vía diseñada es una calle de concreto con rebordes que le dan una sección en forma de “U”. Los carros son construidos sobre un chasis de camión Dodge, tienen motores de tracción eléctricos, capacidad de 8 pasajeros sentados y 12 de pie; viajan a 48 kph y su posición en las vías se monitorea con lazos de inducción magnética que permiten la localización del vehículo. El modo de control es sincrónico.

La prisa impuesta al proyecto generó errores, sobrecostos y retrasos. Un aspecto no considerado al inicio, fue la necesidad de remover la nieve que se acumulaba sobre la vía en invierno; la solución para limpiar la nieve fue la de utilizar una tubería embebida en el concreto de la vía por la que se hace circular una solución caliente de anticongelante glicol. Éste y otros imprevistos incrementaron los costos de construcción y mantenimiento (Raney, S., 2004).

El sistema entró en operación en 1975, con un costo final de \$62 millones, cuatro veces lo estimado en un inicio. Esa primera etapa tenía 8.4 kilómetros de vía, 45 vehículos, 3 estaciones y edificios de mantenimiento. Entre 1978 y 1979 se cerró el sistema para expandirlo a un total de 13.92 Km de vía, 71 vehículos y 5 estaciones, con un costo adicional de \$64 millones, llevando la inversión total a \$131 millones. Opera con una separación o intervalo (headway) de 15 segundos, lo que le da una capacidad máxima teórica de 240 vehículos por hora (Sproule, W., 1991).

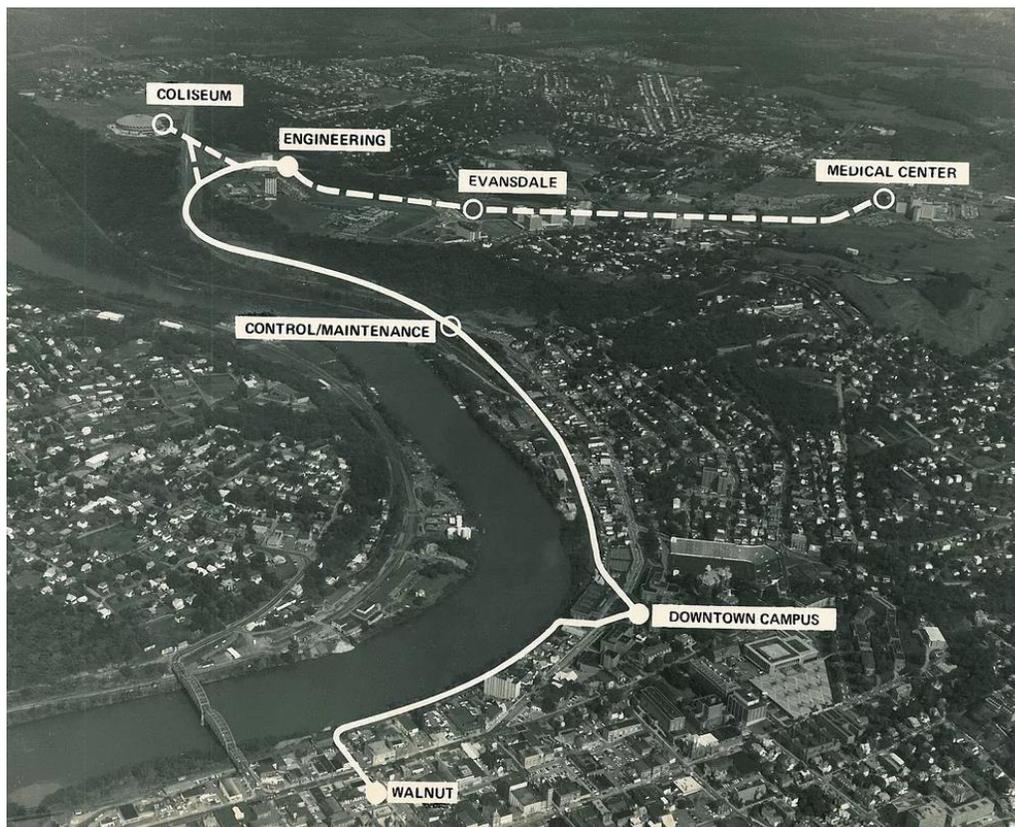


Figura 31. Las dos etapas planeadas para el PRT de Morgantown. (Robertson, A., 2015)



Figura 32, Estación de Ingeniería del sistema PRT de Morgantown en 2012.
(Advanced Transit Association)

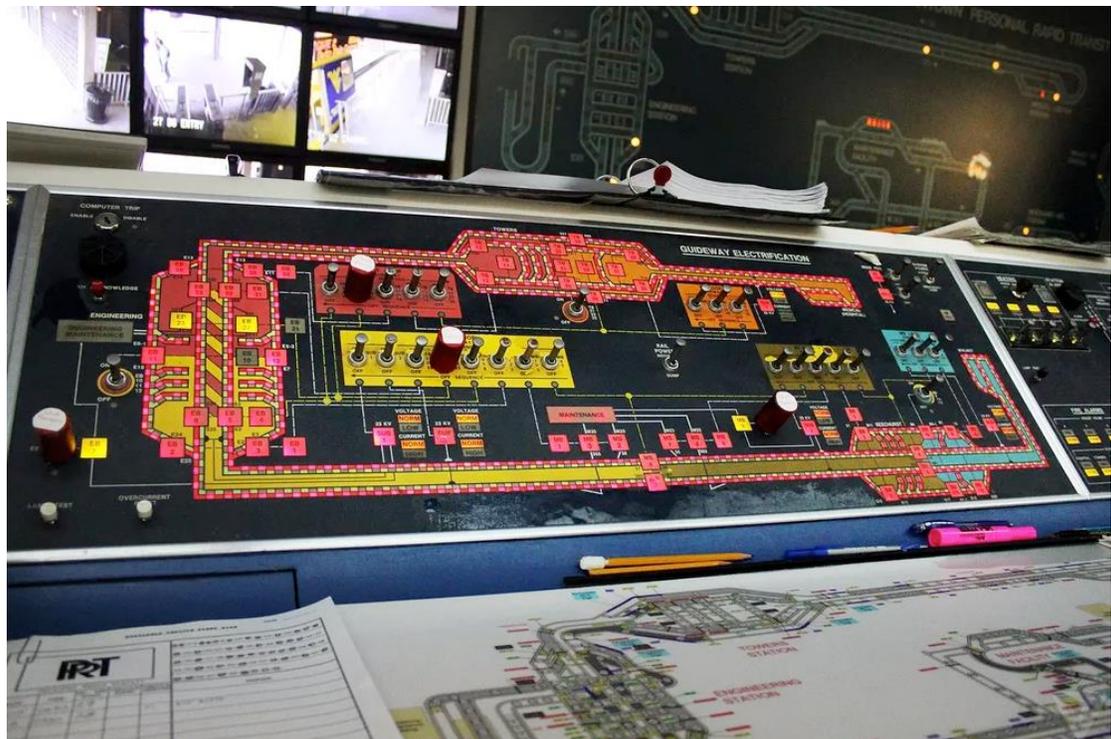


Figura 33. Panel de control del sistema PRT de Morgantown. (Robertson, A., 2015)



Figura 34. Vehículo del sistema PRT de Morgantown en 2012.
(Advanced Transit Association).

El sistema opera en tres modos (Raney, S., 2004):

- Por demanda, como un verdadero PRT. El vehículo es llamado en alguna de las estaciones y se le indica su destino en otra estación. Este modo se trabaja fuera de las horas pico.
- Por horario, como un autobús automático o Group Rapid Transit (GRT). En las horas pico, los vehículos salen en horarios determinados, se detienen sólo en las estaciones indicadas por los pasajeros y pasan de largo por las demás estaciones.
- Modo circulación. Aquí el sistema opera como un Shuttle Loop Transit (SLT), con un número reducido de vehículos que paran en todas las estaciones, durante las horas de menor demanda, por la noche.

e. Dashaveyor

Stanley Dashew fue un inventor que incursionó con éxito y sucesivamente en varias industrias: creación de máquinas para producir tarjetas de crédito plásticas, boyas de anclaje único en alta mar para tanqueros petroleros y boquillas omnidireccionales de empuje para direccionar barcos.

Dashew se puso a investigar el movimiento de contenedores marinos de carga desde un punto de anclaje flotante en alta mar y, para ello, creó en California la Dashaveyor Company en 1963; el sistema que diseñó tenía plataformas que se movían a tracción eléctrica con ruedas de acero sobre

rieles, podía cambiar de dirección al comando de un computador central y se pensó que transportaría los contenedores desde puntos de anclaje flotantes en alta mar, pasando a través de un túnel submarino y, de allí, hasta diferentes sitios de almacenaje y estiba en tierra firme, a velocidades de hasta 130 kph (Radford, A., 1969).

En 1971, la Corporación Bendix compró la Dashaveyor Company, para usar su sistema de plataformas móviles automatizadas en un sistema de transporte de pasajeros y aprovechar el interés generado por los reportes HUD sobre el transporte rápido de personas. Sobre las plataformas se colocaron carrocerías para 31 pasajeros y las ruedas de metal fueron sustituidas por neumáticos; los rieles se cambiaron por una vía de concreto en forma de “U” y la electricidad se proveía por un tercer riel lateral; en todo esto muy semejante al Alden staRRcar (Office of Technology Assessment, 1980).

En 1972, Dashaveyor exhibió su sistema en la feria Transpo '72, compitió para el desarrollo de un sistema de transporte automatizado de personas tipo SLT en el aeropuerto Internacional de Dallas/Fort Worth; también Rohr compitió con su sistema Monocab, pero el concurso fue ganado por la empresa aeroespacial Vought, con un sistema llamado Airtrans.



Figura 35. Bendix-Dashaveyor en Transpo '72.
(ORFE. Princeton University.)

La única aplicación de los equipos Bendix-Dashaveyor se realizó en 1974, en el Zoológico de Toronto, Canadá. El zoológico tenía una extensión de 283 hectáreas y aceptó probar el prototipo de Dashaveyor para movilizar a los visitantes; también Boeing compitió para este contrato con los equipos de Alden staRRcar. En esta aplicación se simplificó mucho el sistema, porque los vehículos no serían automatizados, sino que un conductor manejaría grupos de cuatro vagones por un circuito de 4.8 kilómetros. Consistía en una aplicación de baja capacidad de APM tipo SLT, donde los trenes salían cada 10 minutos y que operó entre los años 1976 y 1994. Dashaveyor esperaba que este

proyecto sirviera de publicidad para ayudarle a conseguir un contrato de instalación de un sistema automatizado de transporte con alguna ciudad, sin embargo, no hubo compradores y la Corporación Bendix cerró el programa en 1976 (Sproule, W., 2016).



Figura 36. Bendix-Dashaveyor en el Zoológico de Toronto.
(<https://flickr.com/photos/24854893@N00/3840843885/>)

El desarrollo de los sistemas PRT estadounidenses y canadienses incitaron el interés de los planificadores de transporte e inventores de otras partes del mundo, especialmente Europa Occidental y Japón. Los ejemplos con mayor desarrollo y más conocidos son los siguientes:

f. Cabtrack

En Inglaterra, Leslie R. Blake, quien trabajaba en la empresa Brush Electrical Company, subsidiaria de Hawker Siddeley, había viajado a los EEUU, adonde conoció los inicios del desarrollo del Alden staRRcar y las ideas detrás de los sistemas PRT. En 1965 conceptualizó un sistema de transporte tipo PRT para Inglaterra. La Corporación Nacional de Investigación y Desarrollo (National Research and Development Corporation NRDC) financió los estudios del sistema desde 1967, que se llamó primero Auto-Taxi y luego se cambió su nombre a Cabtrack en 1968.

Se probaron varios componentes a escala real en el plantel del Royal Aircraft Establishment en Farnborough. Eran vehículos eléctricos de 4 pasajeros, que viajarían de forma automatizada entre estaciones paralelas a una vía exclusiva, a velocidades de entre 56 y 64 kph, con intervalos (headway) de 1 segundo y sin escalas intermedias; todo coincidía con los criterios de los sistemas PRT. En 1971 se realizó un estudio para determinar el impacto visual y arquitectónico de Cabtrack en la sección de Londres conocida como West End. La publicación de unos diseños de estaciones propuestas para

Cabtrack produjeron controversia en la prensa (Office of Technology Assessment, 1975). En el año 1971, también cambió la administración del Ministerio del Ambiente y, entonces, se decidió realizar modificaciones al sistema, porque los políticos estimaron que Cabtrack era muy ambicioso para los fondos y la tecnología disponibles en ese momento (Anderson. J., 2016).



Figura 37. Propuesta de Cabtrack en el West End de Londres.
(Anderson, J., 2016)

El nuevo sistema resultante se llamó Minitram y lo desarrollaron Hawker Siddeley y EASAMS Ltd., subsidiaria de General Electric. Los vehículos de cuatro pasajeros de Cabtrack pasaron a ser de 25, viajando en convoyes de hasta 3 vehículos, que operarían como un SLT, con estaciones en línea y que, posteriormente, podría desarrollarse como un Group Rapid Transit (GRT), al incluir estaciones al lado de la vía.

Se consideró la instalación del Minitram en varios lugares en Inglaterra, incluyendo la zona de los Muelles de Londres (Docklands), la ciudad de Sheffield, entre Croydon y New Addington pero, al final las autoridades de transporte consideraron que el sistema no estaba listo para su implementación; además, se participó en el concurso para dotar una línea rápida de transporte urbano en Toronto con la iniciativa GO-Urban, que fue ganado por la empresa alemana Krauss-Maffei con su sistema Transurban.

El programa fue cerrado por el Ministro de Transporte en 1975 (Office of Technology Assessment, 1975).

g. ARAMIS

En 1967 y con un presupuesto inicial de 10 mil francos, el ingeniero francés Gerard Bardet inicia el diseño de un sistema de transporte con vehículos automatizados de 4 pasajeros que viajen sobre una vía exclusiva en un modo de Transporte Personal Rápido, de punto a punto entre estaciones, con el acrónimo ARAMIS (Agencement en Rames Automatisées de Modules Independents en Stations). En 1970, la empresa aeroespacial Engins MATRA compra las patentes de Bardet para continuar su desarrollo y, a finales de ese año, recibe un contrato para su desarrollo de la agencia gubernamental DATAR (Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Regionale).

Los vehículos eran eléctricos, sobre neumáticos de hule. El concepto de ARAMIS para incrementar la capacidad del sistema era el de disminuir al máximo la distancia intervehicular y hacer que los vehículos se agruparan en pelotones; el vehículo que llegaba a su estación de destino se separaría del pelotón y entraría a una estación al lado de la vía principal. Como algo especial, tenían un sistema de láser, sensores ópticos y ultrasonido para monitorear la separación intervehicular, que se proyectaba se mantuviera constantemente en 30 centímetros. El sistema funcionaba en condiciones secas más, cuando había presencia de agua o nieve en las vías, la adherencia de las llantas de hule disminuía y hacía difícil mantener constante una separación tan pequeña (Anderson J.E.,1996).



Figura 38. Pruebas de separación intervehicular con el prototipo PRT ARAMIS de 4 pasajeros.
(www.advancedtransit.org, 2013)

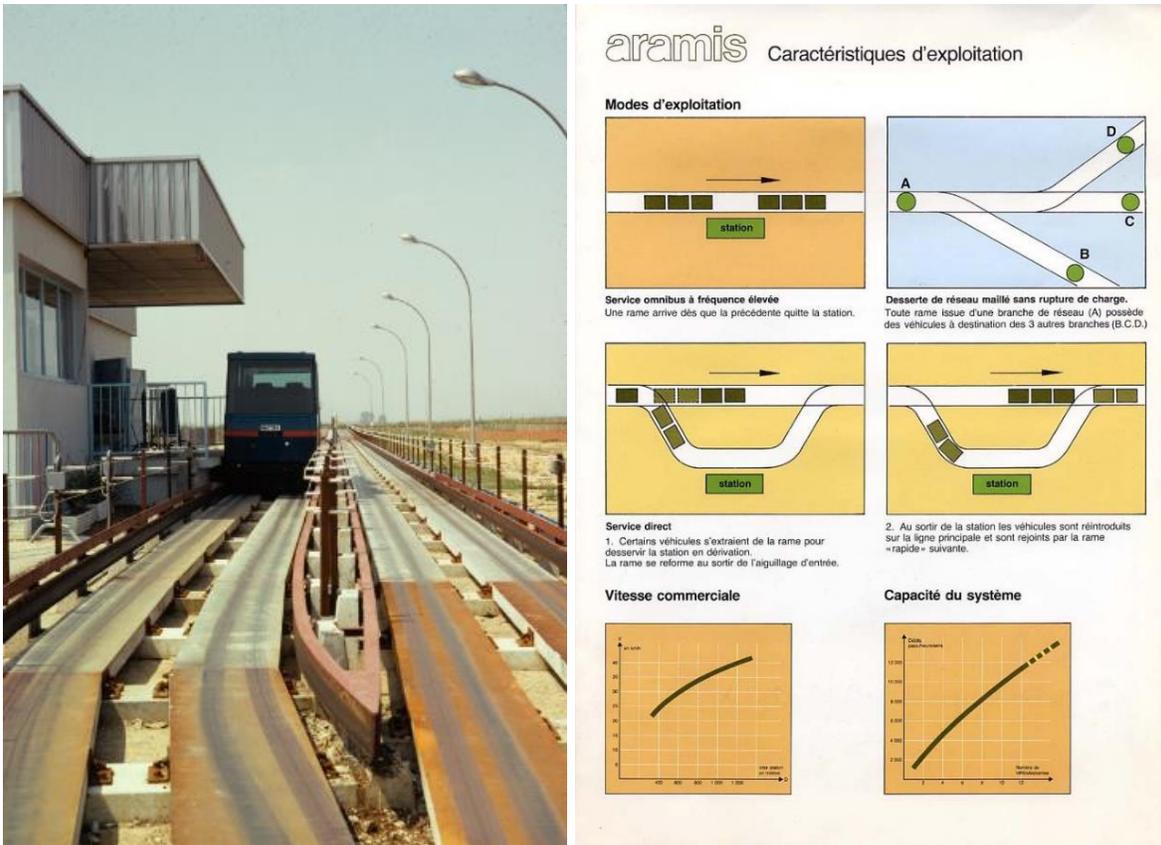


Figura 39. Estación adjunta en pista de pruebas del PRT ARAMIS y su forma de operar. (www.orfe.princeton.edu)

En 1973 se realizaron pruebas a escala natural en el Aeropuerto Internacional de Orly, que terminaron a principios de 1974. Luego de esto se cambió la naturaleza del sistema de Personal Rapid Transit (PRT) a Group Rapid Transit (GRT); dentro de esta lógica, en 1975 se incrementó el tamaño de los carros para transportar 6 pasajeros en vez de 4 y en 1977 se pasó a tener vehículos de 10 pasajeros; este cambio dificultó la operación de ingreso y egreso en las estaciones (Sirand-Pugnet, B., 1997).

Se estudió la adaptación del sistema para varios corredores de transporte, pero se consideró que no satisfacía las condiciones de seguridad y, por los múltiples contratiempos que se produjeron, el proyecto fue abandonado en 1987. La tecnología que produjo se usa ahora en los sistemas de metro automatizados VAL (Vehículo Automático Ligero) y SAET (Sistema de Automatización de la Explotación de Trenes).



Figura 40. Láser y sensor óptico de ARAMIS; separación intervehicular de 30 cm. (www.orfe.princeton.edu)

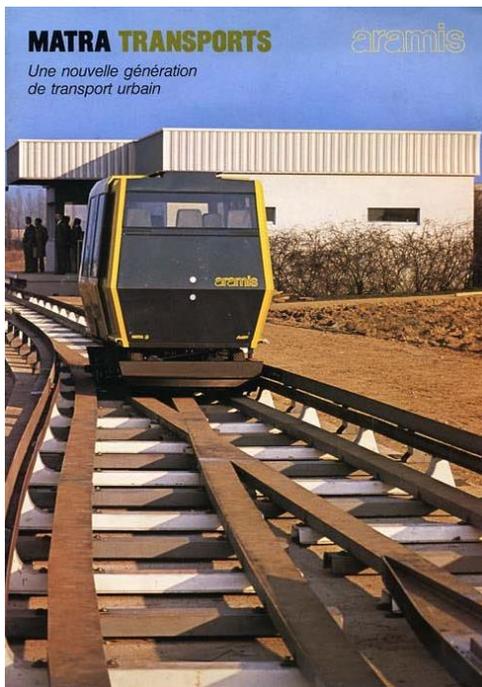


Figura 41. Prototipo GRT ARAMIS de 10 pasajeros. (www.orfe.princeton.edu)

h. Transurban

Este proyecto de la empresa Krauss-Maffei comenzó en Alemania Occidental en 1970, como respuesta al gran interés que la publicación de los reportes HUD produjeron en muchas compañías de ingeniería, quienes consideraron que se abriría un gran mercado mundial para las soluciones de transporte automatizado. En 1971, se le concedió un plan de financiamiento para un proceso de desarrollo por cinco años de parte del Ministerio de Investigación y Tecnología de Alemania Occidental (Office of Technology Assessment, 1975).

Era un sistema GRT, que usaba carros de 12 pasajeros en una vía exclusiva, con motor de inducción lineal en un riel central. Krauss-Maffei, desde 1969 también desarrollaba un tren interciudades de levitación magnética, el Transrapid, y aprovechó esa tecnología en el desarrollo del Transurban; la suspensión de este último se realizaba por dos rieles de levitación magnética atrayente (maglev), que evitaba el contacto con la vía. Se podía operar como un solo carro o en convoyes de cinco carros, para copar con los cambios en la demanda de pasajeros. El sistema de control automático fue desarrollado por la empresa Standard Elektrik Lorenz (SEL) (Office of Technology Assessment, 1975).



Figura 42. Prototipo de tren maglev interciudades Tranrapid, de Krauss-Maffei.
(www.orfe.princeton.edu)

En 1972, la ciudad de Toronto anunció el interés en adquirir un sistema de transporte automatizado como parte del plan de transporte masivo GO-Urban del Gobierno de Ontario y el sistema Transurban resultó escogido de entre muchos oferentes (Livak, I., 1982).



Figura 43. Prototipo del maglev GRT urbano Transurban, de Krauss-Maffei.
(www.railforthevalley.com)

En 1973 se construyó en Alemania una pista de pruebas de 1200 metros para carros con ruedas de hule y otra de 200 metros para probar el sistema maglev; también se empezaba a construir una pista de pruebas y exhibición en Toronto, en los terrenos de la Exhibición Nacional Canadiense. Todo se detuvo en 1974, cuando los sistemas maglev que se probaban en Alemania presentaron fallas al tomar las curvas de las vías, además, en noviembre de ese mismo año, el Gobierno Alemán desvió la mayoría de fondos de desarrollo del Transrapid hacia otro proyecto con motor de inducción lineal, el Cabsitaxi de la empresa Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) (Levy, E., 2013), (Office of Technology Assessment, 1975).

El Gobierno de Ontario, propulsor del proyecto GO-Urban, abandonó el proyecto Transrapid y gestionó la reutilización de la tecnología del motor de inducción lineal y el control automático SEL para un tren convencional de vagones con ruedas metálicas, el Bombardier Advanced Rapid Transit (Litvak, I., 1982).

i. Cabintaxi

En Alemania Federal, dos empresas que desarrollaban proyectos similares de sistemas PRT, Messerschmitt-Bölkow-Blohm (MBB) y DEMAG, fueron invitadas a unirse para desarrollar un solo proyecto, por el Ministerio de Investigación y Tecnología de Alemania Occidental que, además, les ofreció financiar el 50% de los costos. El resultado fue Cabintaxi (Office of Technology Assessment, 1980).

Consistía en una viga elevada, con dos tipos vehículos pequeños de 3 personas y otros de 12 personas; en ambos tamaños había vehículos que viajaban sobre la viga y otros suspendidos de ella.



Figura 44. Pista de pruebas de Cabintaxi en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)

La suspensión era sobre ruedas de hule y la tracción por medio de un motor de inducción lineal (LIM) a cada lado del vehículo, lo que permitía disminuir el número de partes móviles.

También es importante destacar el avance en los sistemas de control de los vehículos en la vía que, en vez de ser sincrónicos como la mayoría de controles ferroviarios, optaron por un sistema asincrónico, que simplifica el control y disminuye la dependencia del sistema a la comunicación con los computadores centrales; siguiendo las investigaciones de punta en esa época (Irving, J., 1978), (Anderson, J., 2009). Existía un nivel de control asincrónico para los segmentos continuos de la vía, basado en tres factores (velocidad del vehículo, velocidad del vehículo precedente y la distancia entre ambos. En las pruebas, a velocidades de crucero de 36 kph (10 m/seg), se obtuvieron “headways” o intervalos de entre 0.5 y 1 segundo, equivalentes a longitudes de entre 5 y 10 metros; lo que permitía proyectar capacidades teóricas de entre 3,600 y 7,000 vehículos/hora, por cada vía; 14,000 vehículos/hora usando ambos niveles de la viga (Office of Technology Assessment, 1975).

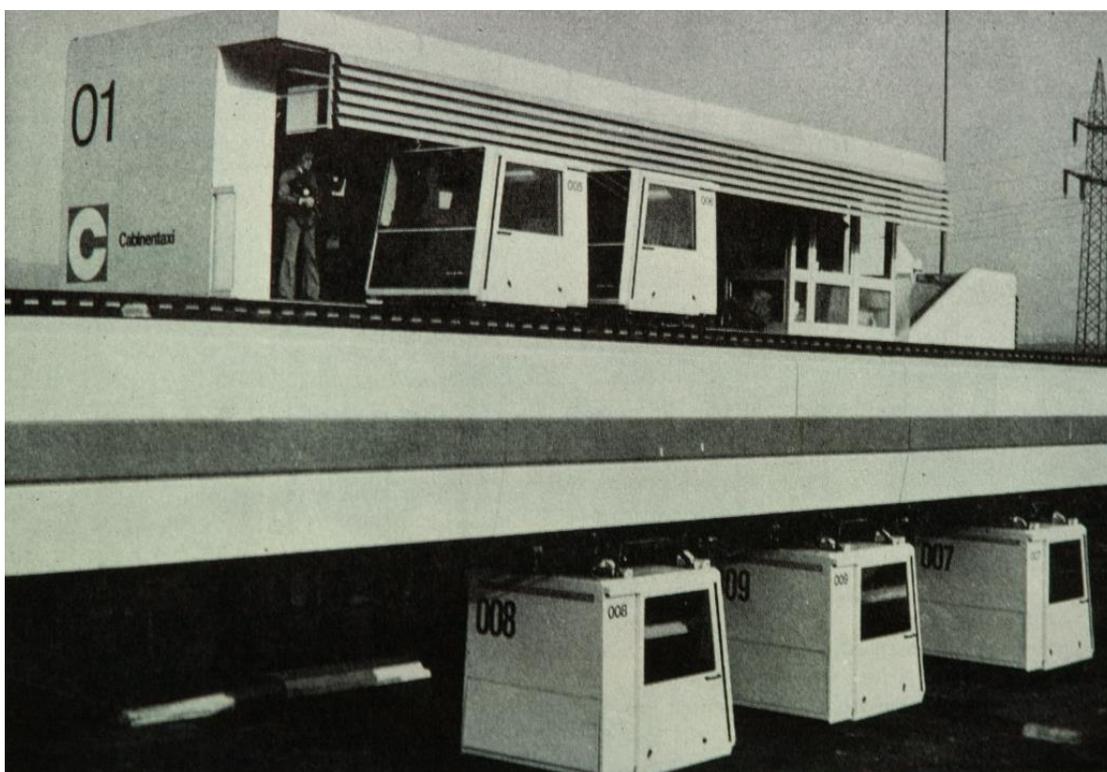


Figura 45. Modelo de estación Cabintaxi en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)

Se realizaron pruebas a escala natural desde mayo de 1973 a octubre de 1974, en una pista de pruebas construida cerca de la ciudad de Hagen, en Renania del Norte, Alemania; la pista se fue expandiendo desde 150 metros hasta 1900 metros, con seis estaciones y 24 vehículos. Entre 1975 y 1978 se recorrieron 640,000 kilómetros-vehículo y se lograron intervalos (headway) de 1.9 seg., a velocidades de entre 30 y 36 kph (Forschung Stadtverkehr N° 25, 1979).



Figura 46. Modelo de estación Cabintaxi en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)

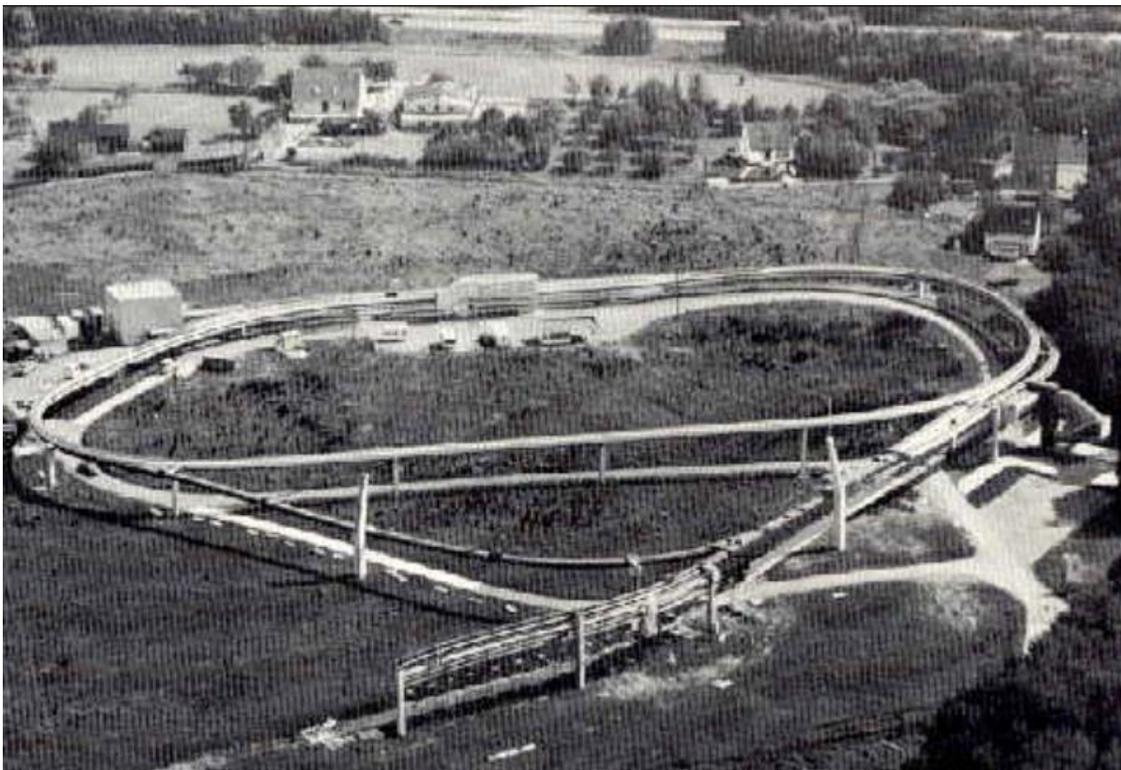


Figura 47. Pista de pruebas Cabintaxi en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)



Figura 48. Bifurcación en pista de pruebas Cabintaxi en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)



Figura 49. Tránsito en dos niveles de la viga Cabinetaxi, en Hagen.
(Innovative Transportation Technologies, 2018. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cabintaxi>)

Cuando acabaron las pruebas y estudios de seguridad, se permitió la aplicación del sistema en forma comercial. Se propusieron varios sitios para su implementación:

- Expandir la red construida en Hagen en varias etapas sucesivas, hasta llegar a un total de 138 km de vía y 182 estaciones, cubriendo el centro y la mayoría de los suburbios de la ciudad, pero no encontraron financiamiento (Urban Transit System Cabinetaxi, 1972).
- Cabinetaxi fue considerado por la UMTA para su programa “Downtown People Mover”; era el sistema favorito para instalarse en la ciudad de Detroit, Michigan, pero Cabinetaxi prefirió concentrarse en un proyecto para la ciudad de Hamburgo.
- Una red inicial de 12 km para la ciudad de Hamburgo, con 11 estaciones y 50 vehículos (Forschung Stadtverkehr N° 25, 1979). Este proyecto se detuvo a raíz de la disminución drástica de los presupuestos del Gobierno Alemán en 1980, por causa de una recesión económica (Anderson, J., 2009).
- El contratista de defensa Raytheon Missile Systems Division quiso diversificar su cartera de proyectos y en 1975 compró una licencia del sistema, ahora llamado Cabintaxi, para venderlo en los EEUU. El Estado de Indiana financió con \$300 mil un estudio de sistemas automatizados de transporte de personas para el distrito central de negocios de Indianápolis y examinó Cabintaxi con gran interés; pero Raytheon decidió concentrarse en el negocio

militar y abandonó el proyecto en 1976, a pesar de los buenos resultados de las pruebas (Anderson, J., 2009).

Sin el apoyo del Gobierno Alemán, a pesar de los esfuerzos comerciales de Cabintaxi, no aparecieron más clientes y el programa cerró en 1985 (Anderson, J., 2009).

j. CVS

La Universidad de Tokio y el Ministerio de Industria y Comercio Internacional, con patrocinio de Toyo Kogyo (Mazda), Mitsubishi Jukogyo, Hitachi Seysakusho y otros más, comenzó en 1968 un programa de desarrollo de un sistema PRT, que se llamó “Computer-Controlled Vehicle System” o CVS, por sus siglas. Tenía vehículos con ruedas de hule, para 4 pasajeros, que se desplazaban sobre una guía de acero. Las vías no mostraban cruces a desnivel, entonces, el computador central, que controlaba los vehículos en modo sincrónico, les asignaba la prioridad de paso en cada intersección a nivel de la red PRT. Se construyó una pista de pruebas de 4.8 km y 60 vehículos dentro de una primera etapa, que se completó en 1976.



Figura 50. Pista de pruebas de CVS en Higashimurayama, Tokio, Japón.
(Office of Technology Assessment, 1975)

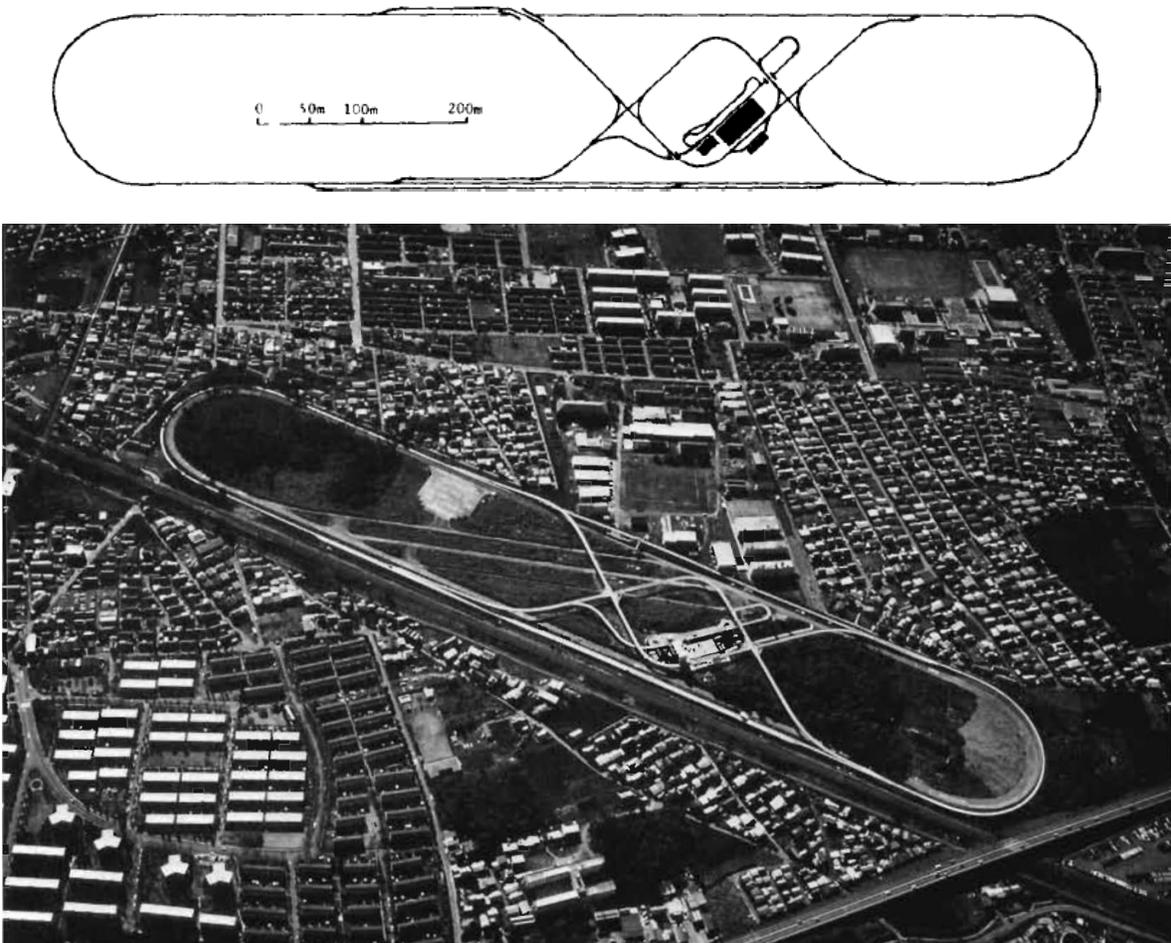


Figura 51. Pista de pruebas de CVS en Higashimurayama, Tokio, Japón.
(Office of Technology Assessment, 1975)

El sistema tendría dos tipos de líneas, una express, con velocidades de 60 kph y otra de distribución a 40 kph, con intervalos de seguimiento de 1 segundo.

La segunda etapa consistió en la optimización del sistema, en la que se lograron velocidades de hasta 80 kph e intervalos (headways) de 1 segundo (Office of Technology Assessment, 1975).

La segunda etapa del programa se concluyó en 1978 e inmediatamente se comenzaron a buscar clientes para el sistema, realizando estudios serios para la implementación en la ciudad de Baltimore, EEUU (Anderson, J., 2009). Los cambios políticos en EEUU y la baja en los precios de los combustibles disminuyeron el interés de los políticos de introducir algo nuevo; el plan de Baltimore se canceló y, ante la ausencia de clientes, también se canceló el programa de CVS.



Figura 52. Pista de pruebas de CVS en Okinawa. (Furman B., 2014)

k. The Aerospace Corporation

La Fuerza Aérea del Ejército de los EEUU estableció, en 1960, una corporación sin fines de lucro para dar seguimiento a los contratos de desarrollo de misiles balísticos que se tenían con varios contratistas. Se llamó Aerospace Corporation y, desde entonces, provee ingeniería de sistemas para la industria de la defensa, la NASA y el programa espacial de los EEUU (Aerospace Corporation, 1980).

Cuando el programa espacial estaba completándose en 1968, los directivos de la Aerospace decidieron hacer uso de la tecnología de la compañía para resolver problemas urbanos. Inspirado por los reportes HUD, el vicepresidente de Aerospace, Jack H. Irving decidió dirigir la investigación al desarrollo de un sistema PRT de Alta Capacidad. El proyecto se realizó entre 1968 y 1971; incluyó el desarrollo conceptual con el enfoque sistémico, el uso de computadores tipo mainframe para realizar simulaciones de una red de tránsito PRT en el centro de la ciudad de Los Ángeles en California, el cálculo de patrocinio (pasajeros) y tarifas para la red supuesta de Los Ángeles y otra red en Tucson, Arizona; además, construyeron un modelo a escala 1:10 para probar el buen funcionamiento de los sistemas diseñados (Anderson, J., 1996).

El sistema consistía en una red formada por una viga hueca de acero soportada en postes, dentro de la cual se movería la unidad propulsora del vehículo y éste iría encima de la viga, circulando a velocidades de 33 y 66 kph, con intervalos (headway) mínimos de entre 0.5 y 0.25 segundos y con motor de propulsión eléctrico lineal pulsado de corriente continua, en vez de los motores lineales de inducción magnética (LIM), usados en el sistema Cabintaxi. El sistema de control era cuasi-

sincrónico y se estimaba que cada línea tendría una capacidad, dependiendo del intervalo utilizado, de entre 5184 y 10,368 vehículos/hora (Irving, J., 1978).

Luego de completar los estudios, la Aerospace Corporation buscó los canales para promover el desarrollo del sistema que habían concebido, a nivel federal, directamente con el entonces presidente de EEUU Richard Nixon, también a nivel estatal y municipal, pero siempre topó con la falta de interés de los legisladores y administradores de los fondos para sistemas de tránsito, que prefirieron financiar los sistemas de transporte tradicionales, por ejemplo: el Senado del Estado de Minnesota (EEUU) aprobó en 1974 una ley para desarrollar un sistema PRT y la Aerospace Corporation presentó una oferta para dirigir el proceso, sin embargo, a pesar de ser una ley, los fondos disponibles se usaron para financiar modos de transporte convencionales (Anderson, J., 2009).

Como la Aerospace Corporation es una entidad sin fines de lucro y no puede dedicarse a la construcción, manufactura ni actividades comerciales, se vio impedida de ofrecer algo más que el estudio y análisis detallado de un sistema PRT y sus posibilidades. En 1978 publicaron sus hallazgos en un libro llamado “*Fundamentals of Personal Rapid Transit*”, que desde entonces se ha convertido en un libro de referencia para todos aquellos que estudian este tema.

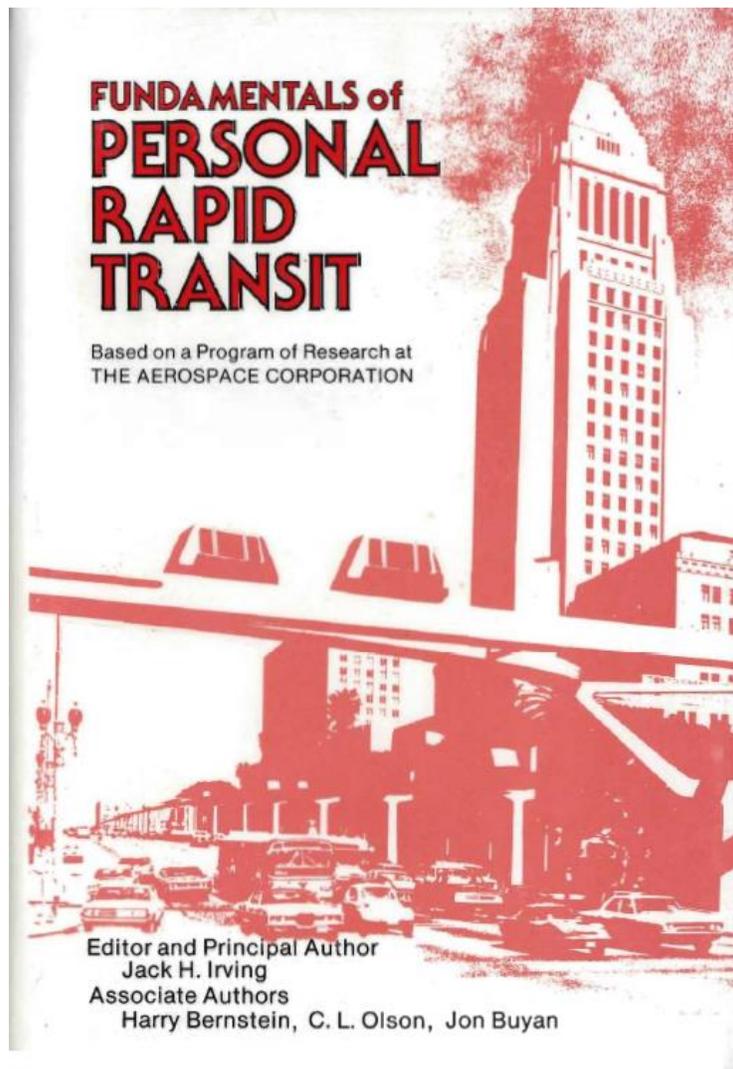


Figura 53. Portada del libro “*Fundamentals of Personal Rapid Transit*”. (Irving, J., 1978)



Figura 54. Fotomontaje ilustrando el sistema PRT de Aerospace Corp. en Los Ángeles.
(Irving, J., 1978)

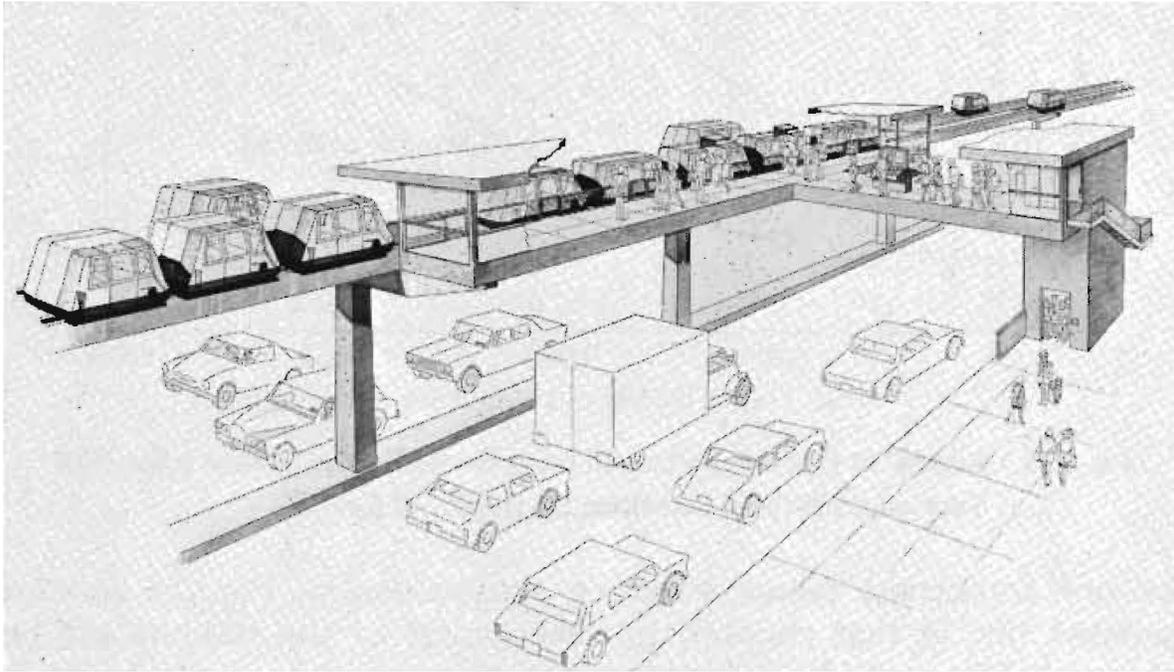


Figura 55. Propuesta de estación del sistema PRT de Aerospace Corporation al centro de la calle.
(Irving, J., 1978)

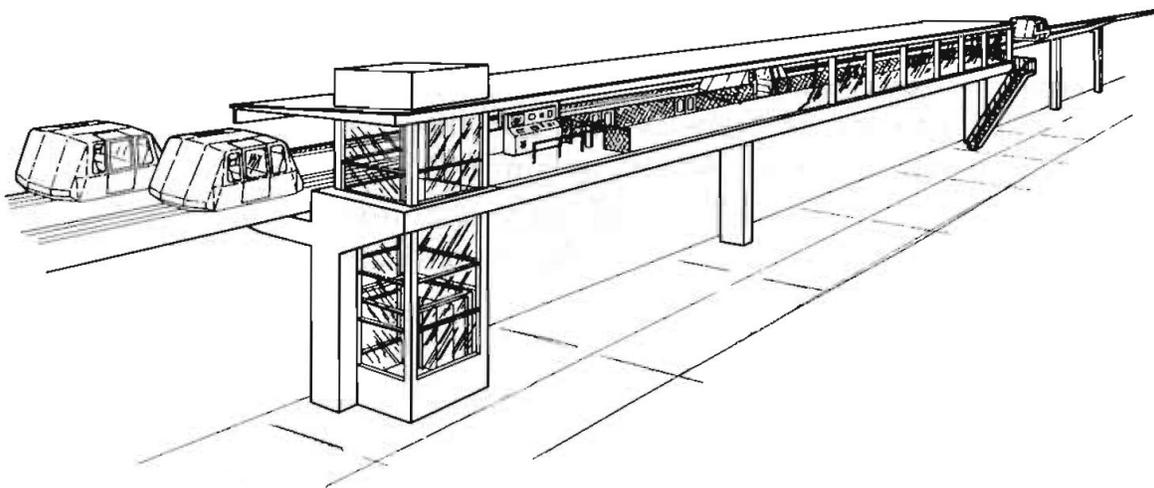


Figura 56. Propuesta de estación del sistema PRT de Aerospace Corporation al lado de la calle.
(Irving, J., 1978)

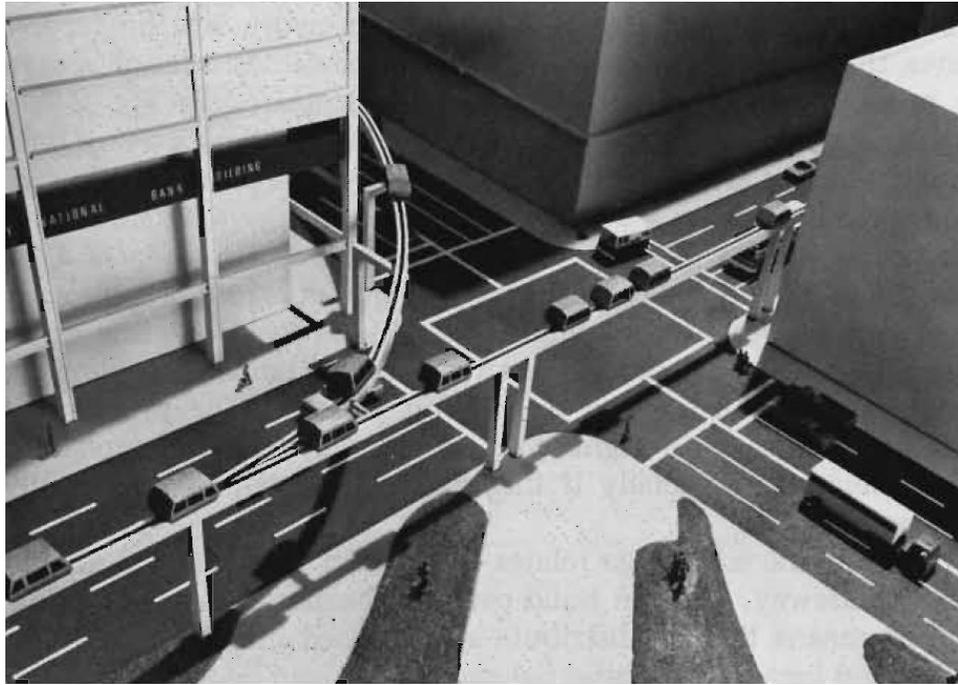


Figura 57. Modelo a escala del sistema PRT de Aerospace Corporation en un entorno urbano.
(Irving, J., 1978)



Figura 58. Modelo a escala del sistema PRT de Aerospace Corporation en un entorno urbano.
(Irving, J., 1978)



Figura 59. Modelo funcional del sistema PRT de Aerospace Corporation en escala 1:10.
(Irving, J., 1978)

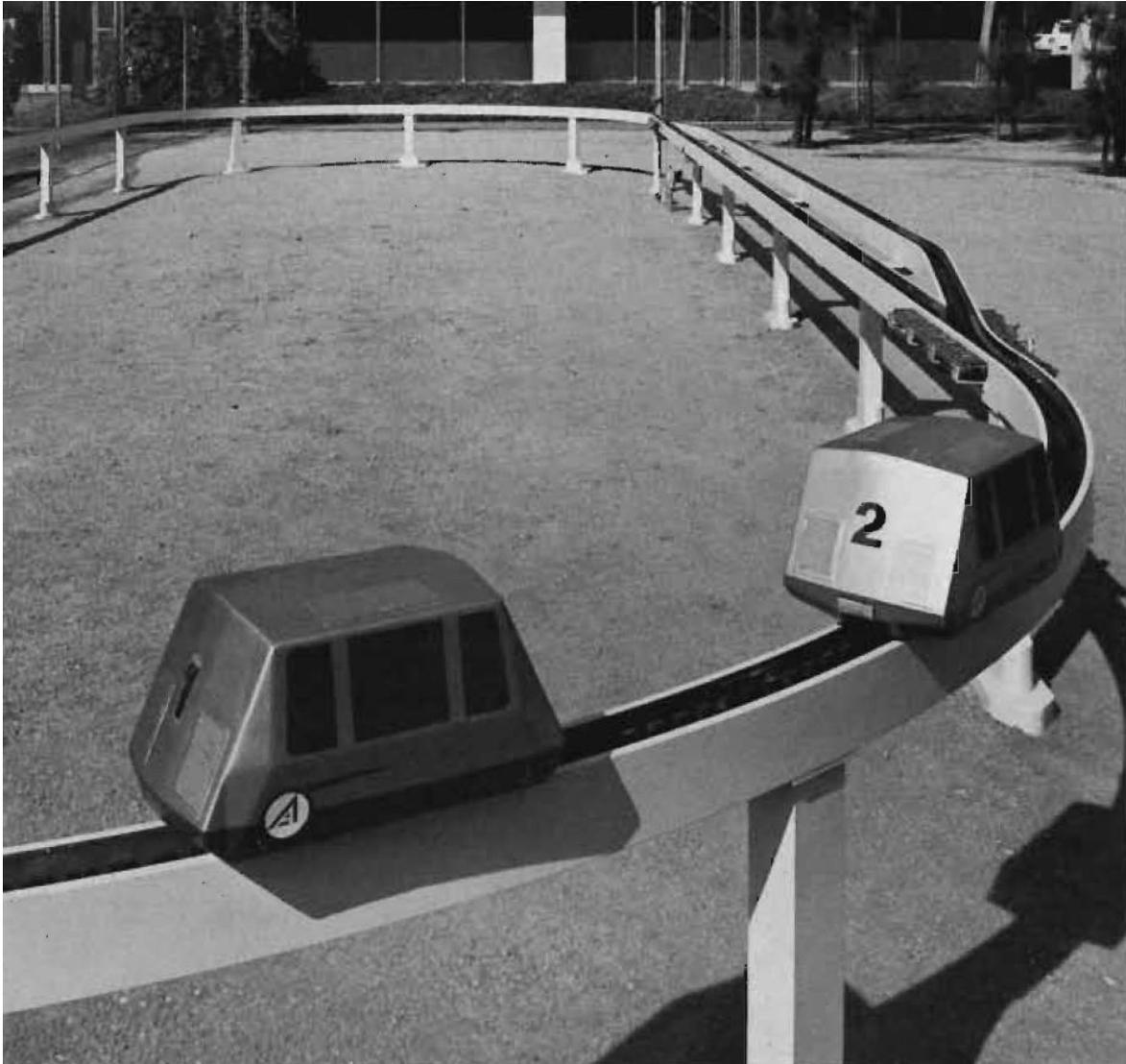


Figura 60. Modelo funcional del sistema PRT de Aerospace Corporation en escala 1:10.
(Irving, J., 1978)

I. Taxi 2000/PRT 2000

El ingeniero mecánico Dr. John Edward Anderson había trabajado con la NASA, con Honeywell y la Universidad de Minnesota, donde conoció el estudio de la Aerospace Corporation en 1971 y, desde entonces se decantó por esa rama de transporte, primero promoviendo el desarrollo del PRT de Aerospace Corporation y luego, trabajando con los promotores de Cabintaxi.

En 1983 fundó la empresa Automated Transportation Systems, Inc., que se dedicó a diseñar y promover un sistema PRT; en 1986, la empresa cambió su nombre a Taxi 2000 y ya tenían un diseño. Para 1989, la Autoridad Regional de Transporte de Illinois Noreste (RTA) inició un programa de

desarrollo de un sistema PRT y, después de dos procesos de selección, la propuesta de Taxi 2000 fue escogida, teniendo a la empresa Raytheon como contratista principal.

Consistía en vehículos pequeños de 3 pasajeros que viajarían sobre una viga elevada en postes, con estructura de metal y cubiertas plásticas; impulsados por un carro motriz dentro de la viga que consistía en ruedas de hule para soporte y un motor de inducción lineal (LIM) para la tracción, que se desplazarían a velocidades de 48 kph.



Figura 61. Modelo de Taxi 2000 escogido por la RTA de Illinois Noreste. (Anderson J., 2009)

Raytheon compró los derechos de la tecnología de Taxi 2000 en 1993 y lo desarrolló con el nombre de PRT 2000; construyó tres vehículos prototipo y una pista de pruebas en Marlborough, Massachusetts en 1995, pero tomó decisiones de diseño que hicieron a su sistema más grande, más pesado y más costoso que el de Taxi 2000, lo que no satisfizo a la RTA, que canceló el programa en 1998.

El sistema de Raytheon consistía en vehículos de 4 pasajeros, que viajaban mediante ruedas de hule y motores rotatorios, sobre una vía constituida por una tubería de acero sobre la que se instalaban rieles para formar la superficie de tracción y soporte. La velocidad de operación era de 48 kph, con intervalos de seguimiento de 2.5 segundos y una capacidad por vía de 1,440 vehículos por hora (Batten, M., 1997).

Luego del cierre del programa de la RTA, Raytheon devolvió las patentes a Taxi 2000 en el año 2000. El sistema siguió generando interés entre los estudiosos del transporte en el Estado de Washington (EEUU), también en Suecia y Cincinnati (Ohio, EEUU) más, los planes de implementación se

pospusieron repetidamente, a favor de las tecnologías de transporte convencionales (Anderson, J., 2009), (Anderson, J., 2016).

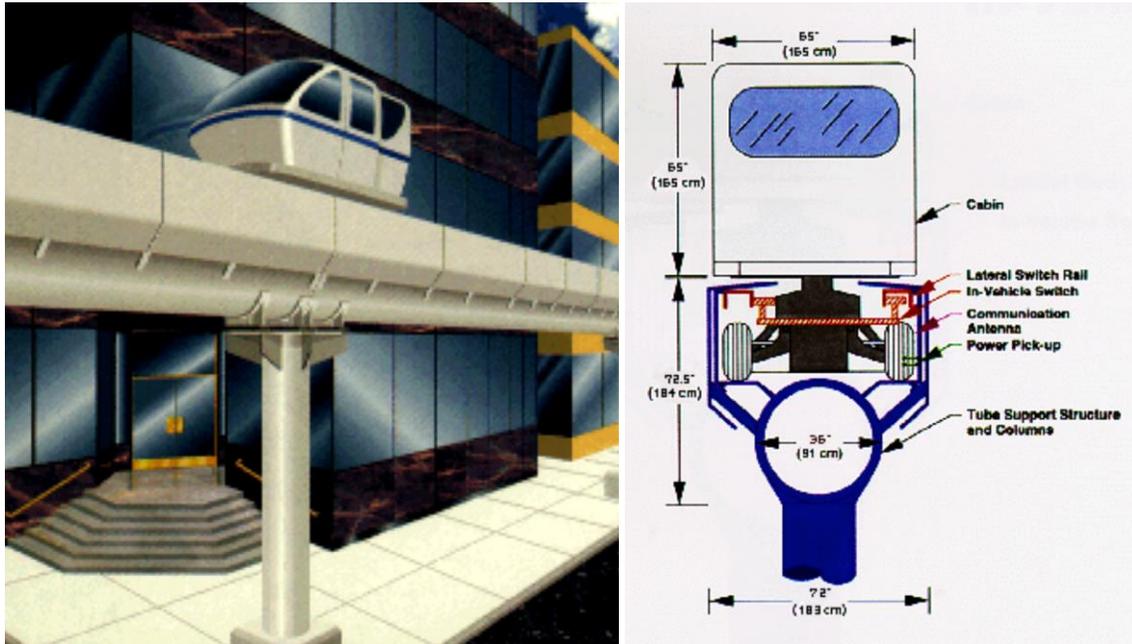


Figura 62. Modelo de PRT 2000 desarrollado por Raytheon. (Anderson J., 2009)



Figura 63. Modelo a escala real de PRT 2000 desarrollado por Raytheon. (Furman B., 2014)



Figura 64. Prototipo de Taxi 2000 en la Feria Estatal de Minnesota de 2003. (Anderson J., 2016)



Figura 65. Prototipo de Taxi 2000 en la Feria Estatal de Minnesota de 2003. (Anderson J., 2016)

m. ULTra PRT

El ingeniero aeronáutico británico Martin Lowson había desarrollado una carrera en la investigación aeronáutica y fue acreedor de varias patentes en ese campo. En 1995 decide enfocarse en sistemas de transporte personal rápido, funda la empresa Advanced Transport Systems e invirtió 10 millones de libras esterlinas en el desarrollo de un sistema PRT, con la colaboración de la Universidad de Bristol. Advanced Transport Systems cambia su nombre a ULTra PRT (Urban Light Transit) y, para el año 2000 obtiene una donación de 2.7 millones de libras esterlinas del gobierno británico a través del UK Endowment for Science, Technology and the Arts (NESTA), para construir una pista de pruebas en Cardiff (Gales, R.U.), que empezó a operar en 2001 y, 2 años después, el sistema fue aprobado por el UK Regulatory Authority (autoridades ferroviarias) para su uso en el Reino Unido (Anderson J., 2016) (www.advancedtransit.org).



Figura 66. Pista de pruebas de ULTra PRT en Cardiff. (www.ultraglobalprt.com)



Figura 67. Vehículo en pista de pruebas de ULTra PRT en Cardiff. (www.ultraglobalprt.com)

El sistema fue escogido en 2005 para servir de transbordo automatizado de pasajeros entre el estacionamiento y la Terminal 5 del aeropuerto Internacional de Heathrow, en Londres, que se encuentran separados a 3.9 kilómetros. La construcción comenzó en 2007 y las operaciones en 2011 (Ultra Global PRT, 2012).

Consiste en una vía de concreto y/o acero sin contenciones laterales, de anchos entre 1.75 y 2.10 metros; sobre la que circulan vehículos de 4 pasajeros, con neumáticos de hule y motores eléctricos rotatorios, alimentados por baterías.



Figura 68. Vehículos Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow.
(www.ultraglobalprt.com)



Figura 69. Terminal de Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow.
(www.ultraglobalprt.com)

Los vehículos se controlan mediante un sistema sincrónico y se ubican por sensores de inducción embebidos en la vía. La velocidad de crucero es de 40 kph, el intervalo (headway) mínimo es de 3 segundos, lo que permite una capacidad máxima de 1,200 vehículos por hora. Las baterías se recargan por inducción mientras los vehículos están estacionados esperando a un pasajero y tienen una autonomía entre recargas de 10 km (www.ultraglobalprt.com).

El costo del sistema del Aeropuerto de Heathrow, por 21 vehículos, 3 estaciones y 3.84 kilómetros de vía ha sido de 30 millones de libras esterlinas (\$39.2 millones) (www.advancedtransit.org).

En 2017, ULTra firmó un contrato con el Gobierno de Ajman, en los Emiratos Árabes Unidos, para instalar un sistema de ULTra PRT en la ciudad de Ajman, con una extensión de 120 kilómetros de vía, 115 estaciones y 1,745 vehículos; también incluirá vehículos automatizados de 30 personas para dar un servicio de GRT, con una inversión total proyectada en \$723 millones (Traffic Technology Today, 2017).



Figura 70. Sala de control de Ultra PRT en servicio en el Aeropuerto de Heathrow.
(Furman B., 2014)

n. 2getthere

2getthere es una compañía holandesa, subsidiaria de la Frog AGV Systems BV, especialista en vehículos autónomos de transporte de materiales y mercaderías en bodegas y procesos productivos.

En 1986, 2getthere comenzó investigando la automatización de los vehículos en carretera. Entre 1997 y 2004, tuvo en funcionamiento unos microbuses automatizados eléctricos a batería, para el transbordo de 10 pasajeros desde el estacionamiento hasta la terminal del Aeropuerto de Schiphol en Amsterdam, llamados APM ParkShuttles (www.2getthere.eu).



Figura 71. ParkShuttles de 2getthere en servicio en el Aeropuerto de Schiphol entre 1997 y 2004.
(www.2getthere.eu)

También con microbuses automatizados semejantes a los de ParkShuttle, en 1999 se estableció un servicio de transbordo entre el parque industrial de Rivium, en Rotterdam y la estación del metro de Kralingse Zoom, a una distancia de 1.2 kilómetros. En 2006 se amplió la ruta a 1.8 km y se cambiaron los microbuses por modelos de 24 pasajeros.



Figura 72. Microbuses de 24 pasajeros de 2getthere en el parque industrial Rivium, Rotterdam.
(www.2getthere.eu)

Esta empresa ha aprovechado su experticia en las aplicaciones de autobús automatizado en ambientes controlados y también mezclados con el tráfico, para desarrollar un sistema PRT que se ha instalado inicialmente en 2010, en la Ciudad de Masdar, Abu Dhabi, una comunidad construida como un modelo de ciudad ecológica, con pocos vehículos (solamente eléctricos) y muy peatonizada (www.prtconsulting.com).

El sistema PRT se desenvuelve en una red de tuneles y sótanos bajo la ciudad. En mucho semejantes a los vehículos de ULTRA PRT, 2getthere desarrolló vehículos de 6 pasajeros que se mueven sobre neumáticos y se desplazan sobre el piso de concreto de los túneles y sótanos y se guían por una combinación de mediciones (Lohmann, R., 2009), (www.advancedtransit.org):

- Distancia recorrida, con el odómetro.
- Puntos de referencia naturales o artificiales, por medio de cámaras y sensores magnéticos.
- Sistemas de posicionamiento global (GPS).
- Ángulo de las ruedas de dirección

Los vehículos se mueven con motores eléctricos rotatorios y energizados por baterías, con una autonomía de 75 kilómetros entre recargas, la velocidad máxima de crucero es de 40 kph, intervalo o headway actual de 5 segundos, para una capacidad de 720 vehículos por hora y están desarrollando un intervalo de 2 segundos, para una capacidad máxima de 1,800 vehículos por hora.

La red, en su primera etapa, tiene una extensión de 1.2 kilómetros y 5 estaciones: 2 de pasajeros y 3 para carga. La flotilla es de 10 vehículos de pasajeros y 3 de carga (www.2getthere.eu).



Figura 73. Estación PRT en Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu)



Figura 74. Estación PRT en Ciudad Masdar, Abu Dhabi. (www.2getthere.eu)



Figura 75. Recorrido de los vehículos PRT en sótanos y túneles; Ciudad Masdar, Abu Dhabi.
(www.2getthere.eu)



Figura 76. Recorrido de los vehículos PRT en sótanos y túneles; Ciudad Masdar, Abu Dhabi.
(www.2getthere.eu)

o. Vectus

El gigante siderúrgico de Corea del Sur POSCO (Pohan Iron and Steel Company), decidió diversificar su cartera de negocios y creó el consorcio Vectus Ltd. en 2005, para desarrollar sistemas de transporte urbano tipo PRT y GRT (Anderson, J., 2009). Se asociaron con empresas como Transport Design International (consultores en transporte) y Pininfarina (especialistas en diseño industrial), para desarrollar el sistema (Anderson, J., 2016).

Las pruebas en escala natural comenzaron en una pista de pruebas construida en Uppsala, Suecia, en el año 2006, por ser una región con un duro clima invernal que sirvió de prueba a la durabilidad de los componentes mecánicos y electrónicos. Las pruebas concluyeron en el año 2010 y el sistema fue aprobado por la Agencia Ferroviaria de Suecia, listo para su implementación.

Los vehículos son de 6 pasajeros, usan un motor de inducción lineal (LIM), su modo de control de operación es asincrónico, la velocidad de crucero es de 45 kph y viajan separados por un intervalo de seguimiento o headway de 3 segundos, para una capacidad máxima de 1,200 vehículos por hora.

Los vehículos se deslizan en ruedas de hule por encima de una vía elevada sobre columnas; en la pista de pruebas de Uppsala se construyeron las vías en acero; en instalaciones posteriores, columnas y vía son de concreto, sobre las que se instalan rieles de metal para que transiten los vehículos (www.vectusprrt.com).



Figura 77. Prototipo del sistema Vectus en la pista de pruebas de Uppsala, Suecia.
(www.prtconsulting.com)

El sistema Vectus se instaló como un servicio regular de transporte en Suncheon Bay, un parque ecológico de marisma costera en Corea del Sur; se ha bautizado como “Sky Cube” y fue inaugurado en 2013. En una primera etapa cuenta con 40 vehículos, 5 kilómetros de vía y dos estaciones.



Figura 78. Sistema Vectus Sky Cube en Suncheon Bay, Corea del Sur. (www.prtconsulting.com)



Figura 79. Estación del sistema Vectus Sky Cube en Suncheon Bay, Corea del Sur. (www.prtconsulting.com)

2.3.4. ¿Por qué no se han construido más sistemas PRT?

Como se mencionó al inicio, el impulso para la creación de nuevas formas de transporte surgió de la necesidad de evitar y evadir el congestionamiento de las carreteras entre los centros de las ciudades y los suburbios estadounidenses, luego de la segunda Guerra Mundial; esto se aunó a la percepción de la industria aeroespacial de que, una vez cumplidas las metas del programa espacial y con el declive de la actividad militar de los EEUU en el sudeste asiático, disminuiría la actividad en sus negocios y tendrían que reducir sus programas; por ello se sumaron con entusiasmo a los programas de investigación que nacieron a raíz de los Reportes HUD.

Sin embargo, una vez completados los programas de desarrollo de algunos fabricantes, los posibles clientes decidieron no adquirir los sistemas. Esto tiene, al menos, cuatro explicaciones posibles:

- Cabildeo de la industria del transporte tradicional.

La industria aeroespacial creaba nuevos elementos para los que previamente no existía una competencia: aviones a reacción, cohetes y naves espaciales, más, la industria del transporte en trenes, autos y camiones sí tenía grandes inversiones previas a las investigaciones de los años 60 y de esta industria dependían muchos empleos en su operación, diseño y manufactura; entonces vieron a los nuevos sistemas de transporte como una amenaza a su actividad lucrativa (Anderson, J., 2016). Como ejemplo, el sistema japonés CVS ya estaba listo para su implementación, sin embargo, la autoridad ferroviaria de Japón le negó la certificación, aduciendo que, con los intervalos intervehiculares tan cortos de 1 segundo, los vehículos no eran capaces de superar la prueba ferroviaria de “la parada del muro de ladrillo” (brick-wall stop), una prueba que supone que un tren debe guardar una distancia suficiente de su obstáculo delante de él para no colisionarlo (Gronning, R., 2009). Esto es un concepto válido en el ámbito ferroviario pero que no es aplicable para los vehículos de carretera, que eran el símil y el objetivo a sustituir con el sistema CVS.

- El miedo.

“Hacer que una tecnología compleja pase del laboratorio a la vida real es un proceso difícil, con el potencial de un gran riesgo financiero y vergüenza política” (Office of Technology Assessment, 1980).

Los políticos que estuvieron a punto de decidir la instalación de un sistema PRT en sus ciudades, desde los años 70 hasta hoy, terminaron decantándose por las tecnologías conocidas de trenes, metros y carreteras, porque no se les pudo convencer de que los sistemas PRT eran una inversión segura. Aquí los desarrolladores de la industria aeroespacial no consideraron la gran diferencia entre el ámbito militar, para el que normalmente trabajaban y la sociedad civil, que se resume en la siguiente cita: *“Mientras el miedo que un estado puede tenerle a un enemigo externo impulsa el desarrollo de nuevos sistemas militares, el miedo de la industria civil a volverse irrelevante, real o no, causa que sus líderes debatan en contra del desarrollo de nuevos sistemas que ellos perciban como disruptivos”* (Anderson, J., 2009).

- Estrategia inadecuada.

Los proyectos que sí se han construido se instalaron en sitios aislados, como aeropuertos universidades y zoológicos (sin casas ni comercios adyacentes), que permitieron construirlos en una extensión pequeña y con inversiones más modestas; en cambio, los sistemas que se esperaba cubrieran grandes extensiones no fueron implementados, porque se percibieron como una decisión muy riesgosa por los potenciales clientes.

- Clima económico.

Cuando sí hubo una propuesta gradual que permitiera instalar un sistema en pequeña escala y mejorarlo antes de extenderlo a toda una ciudad, el financiamiento se restringió por circunstancias ajenas a los proyectos: cortes de presupuesto de desarrollo, recesiones y caída de acciones en la bolsa.

2.3.5. Estado del arte y PRT de alta capacidad

2.3.5.1. Capacidad del PRT

La tecnología ha avanzado mucho desde que comenzaron los programas de desarrollo de los sistemas PRT en los años 60 y ya hay recursos técnicos probados para que estos sistemas cumplan con todas las funciones requeridas, pero aún no se han construido comercialmente sistemas que satisfagan la condición característica de ofrecer una alta capacidad de transporte.

Los sistemas PRT existentes no fueron concebidos para operar con pequeños intervalos de seguimiento (headway), por lo que nunca llegarán a ser una opción de alta capacidad, como se resume en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Capacidad de los sistemas PRT instalados.

Lugar	Sistema	Velocidad (kph)	Headway (seg.)	Capacidad (veh/hora)
Morgantown	WVU PRT	48	15	240
Londres	ULTra Heathrow	40	3	1200
Abu Dhabi (hoy)	2getthere Masdar	40	5	720
Abu Dhabi (futuro)	2getthere Masdar	40	2	1800
Corea del Sur	Vectus SkyCube	45	3	1200

Ninguno de ellos supera la capacidad de un carril de carretera para transportar vehículos, que es de 2,000 vehículos por hora y no serían una alternativa de solución a la congestión que se genera en los caminos por los vehículos particulares.

De los sistemas construidos a nivel de prototipo, 2 eran de alta capacidad: CVS y Cabinetaxi:

Cuadro 2. Capacidad de los sistemas PRT no construidos.

	Sistema	Velocidad (kph)	Headway (seg.)	Capacidad (veh/hora)
Prototipo construido	CVS	60	1	3600
	Cabinetaxi (un uso)	36	1.9	1895
	Cabinetaxi (doble uso)	36	1.9	3789
	PRT 2000	48	2.5	1440
Diseño y modelos	Aerospace Corporation	33	0.5	5184
	Aerospace Corporation	66	0.25	10368
	Taxi 2000	48	0.5	7200

Cabintaxi podía, simultáneamente, llevar vehículos en la parte superior e inferior de la viga: uno apoyado y el otro suspendido y, entonces, se muestran dos capacidades. Aerospace Corporation realizó diseños, simulaciones computarizadas y modelos a escala 1:10 para vehículos con intervalos (headway) de 0.5 y 0.25 segundos y también se muestra con dos capacidades.

Aerospace Corporation y Taxi 2000 ofrecen el mismo intervalo de seguimiento o Headway, pero el modelo de Aerospace incluye factores de seguridad que disminuyen la capacidad teórica hasta situarse en un 72% del máximo posible. En este estudio se tomaron en cuenta esas mismas consideraciones de seguridad (ver apartado 4.2.4).

2.3.5.2. Suspensión, propulsión, rodamientos, sistemas de guía y frenado

Los sistemas más modernos de trenes urbanos de distancias cortas han pasado de usar ruedas metálicas sobre rieles a llantas de hule sobre una superficie plana para disminuir el ruido de los carros en movimiento, especialmente los sistemas totalmente automatizados; también proporcionan un viaje más suave que los trenes convencionales (Brand, C., 2005).

Motores lineales

Una tecnología relacionada con el transporte público que se ha desarrollado desde los años 60 son los motores lineales. Equivalen a desenrollar el rotor y la armadura de un motor eléctrico, para que interactúen en un solo plano; en vez de producir torque, produce fuerza lineal (Laithwaite, E., 1987).

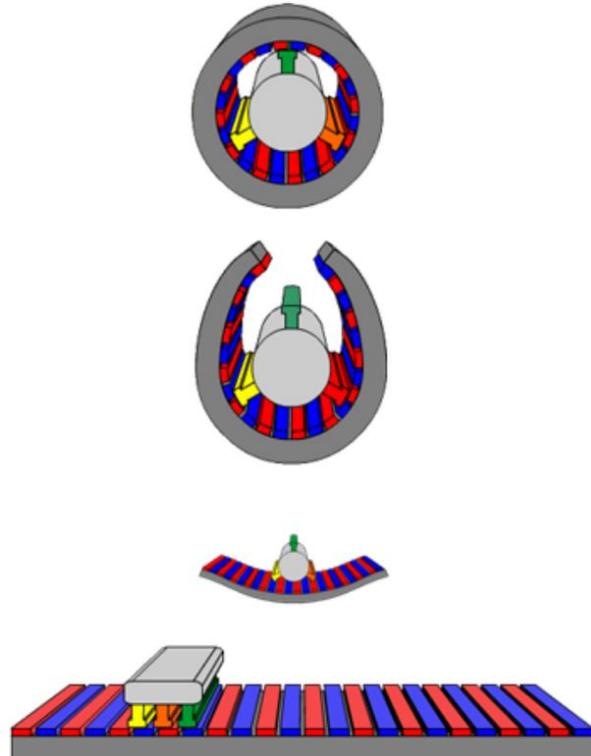


Figura 80. Analogía de motor rotatorio de 3 fases y motor lineal sincrónico. (Ghaseminejad S., 2017)

Para un vehículo que se mueve sobre una guía o rieles, la sección análoga con la armadura se coloca en la vía y la otra sección correspondiente al rotor se coloca en el vehículo, logrando un movimiento continuo a lo largo de la vía. Sus ventajas son que la única parte móvil es el propio rotor desenrollado, que ofrece una respuesta inmediata de aceleración y, muy importante, un frenado casi inmediato (Anderson J., 2016). Como desventaja para usarlos en sistemas PRT está su mayor costo, comparado con los motores eléctricos rotatorios, porque deben instalarse elementos magnéticos o rieles de reacción a lo largo de toda la vía, dependiendo del tipo de motor empleado.

Maglev

También desde finales de los años 60, se desarrollan los sistemas de suspensión o levitación magnética (Magnetic Levitation o maglev) en trenes, como una forma de eliminar el rozamiento de las ruedas con los rieles y aumentar la velocidad de los trenes.

En el maglev hay un juego de imanes permanentes o electroimanes en la guía o rieles y también hay otro juego de imanes en la sección del vehículo que se posiciona sobre los rieles.

Hay dos tipos básicos de maglev: de atracción y de repulsión. En el maglev de atracción, los imanes del vehículo se atraen con los del riel o guía y suspenden el vehículo en el aire, a una distancia de 10 a 15 milímetros ((Physics World. www.hk-phy.org)).

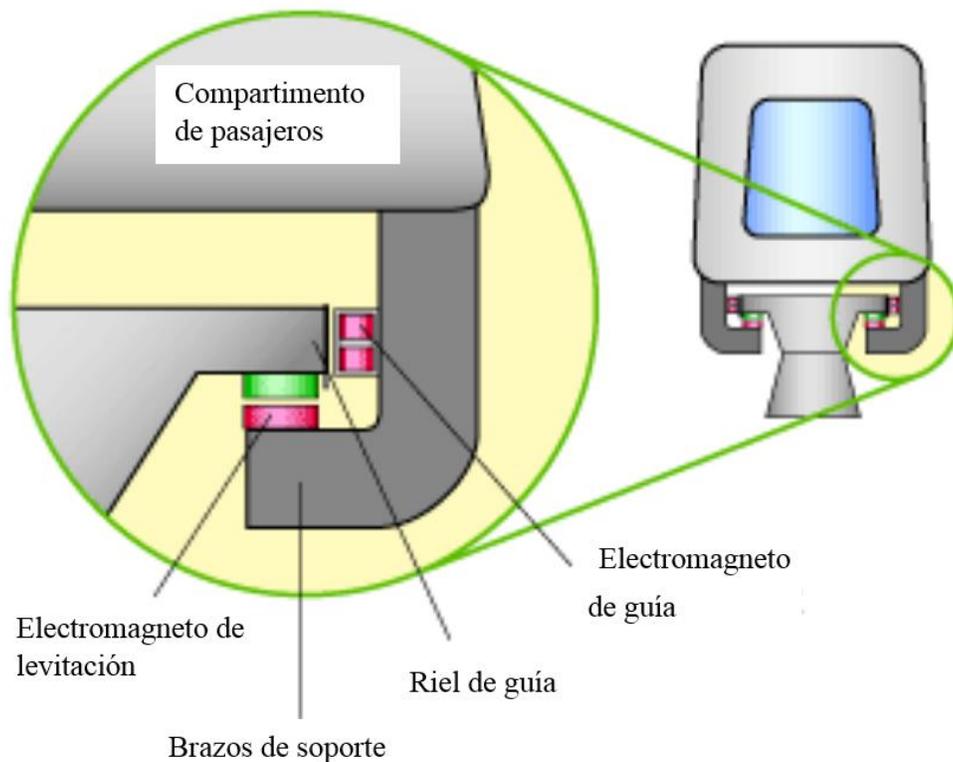


Figura 81. Esquema del maglev de atracción. (Physics World. www.hk-phy.org)

En el maglev de repulsión, los imanes de la vía y del vehículo tienen igual polaridad y se repelen simultáneamente, pudiendo suspender el vehículo a una distancia mayor que el maglev de atracción, pero requiere campos magnéticos mayores y para ello debe de enfriar constantemente los imanes con líquidos criogénicos (nitrógeno o helio líquidos), (Tsuchiya, M., 2000).

La propulsión en los sistemas maglev se logra de dos formas:

- Mediante el cambio de polaridad de los imanes, para que se atraigan y se repelan de forma alterna y coordinada, haciendo avanzar o retroceder el vehículo levitado.
- Con un motor lineal que provea la tracción al vehículo, independiente de la suspensión magnética.

Con la levitación magnética, los trenes eliminan las fuerzas de rozamiento entre las ruedas y los rieles y alcanzan velocidades de hasta 600 kph, en modelos aún experimentales.

El primero de estos trenes maglev entró en servicio en 1984; era lento, viajaba a una velocidad de 42 kph y operó hasta 1995 en el Aeropuerto internacional de Birmingham, Inglaterra. El progreso ha continuado; siguiendo más adelante con trenes rápidos como el Transrapid de Shanghai (China) que, desde el año 2003 viaja a un promedio de 250 kph (Antlauf, W., 2004).



Figura 82. Tren Maglev del aeropuerto Internacional de Birmingham. (www.nigeltout.com)

Los sistemas actuales de levitación magnética resultan muy voluminosos para ser instalados en los pequeños vehículos PRT y tienen un costo muy elevado, lo que los vuelve no competitivos para este último uso. Por esa razón, los sistemas PRT que se han propuesto en el mundo con el uso de suspensión maglev no han avanzado más allá de algunos experimentos de laboratorio (Anderson, J., 2016).

El más nuevo avance en esta tecnología es del sistema PRT Skytran, que está desarrollando un “maglev pasivo”, que no necesitaría de imanes en la vía pues unos imanes del vehículo en movimiento, que se deslizan sobre una superficie de aluminio, provocan unas corrientes parásitas, llamadas “corrientes de Foucault”, que generan el efecto de elevar los imanes, creando un viaje sin rozamiento. Para la fuerza propulsora también se usan las fuerzas de Foucault, posicionando un motor de un rotor enrollado y cubierto de imanes dentro de un tubo de aluminio que funciona como carcasa o estator, produciendo una nueva versión de motor lineal (www.skytran.net). Unimodal Systems LLC., ahora llamada Skytran Inc., la empresa desarrolladora fundada en 1990 por el inventor estadounidense Douglas Malewicky, informa que el vehículo utilizará muy poca energía para la propulsión, menos que un vehículo híbrido Toyota Prius (www.skytran.net). Skytran ha trabajado versiones de sus sistemas con el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de la Universidad de California (sistema maglev) y el Ames Research Center de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) (software y sistemas de control) (Science & Technology, 2004), (www.nasa.gov, 2009). Una alianza de Skytran Inc. con Israel Aerospace Industries generó la propuesta de instalar el sistema para el año 2015 en la ciudad de Tel Aviv, Israel, pero aún no han pasado de la etapa experimental y de tener una sección de prueba construida en esa ciudad israelita (Rabinovich, A., 2014).



Figura 83. Concepto del Skytran. (Alonso, J., 2015)

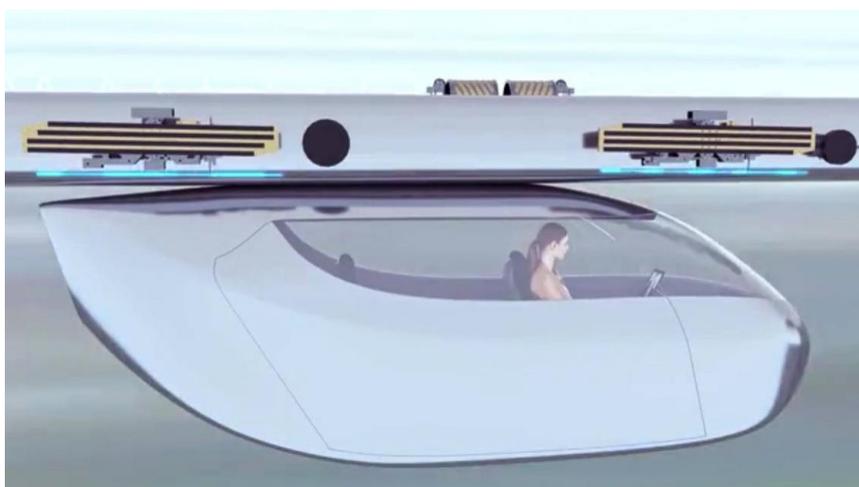


Figura 84. Concepto del Skytran, con esquema de los sistemas de levitación y tracción, dentro de la viga de soporte. (Alonso, J., 2015)

Sistemas automatizados de frenado

Los vehículos automáticos PRT que ya se han desarrollado se mueven sobre neumáticos y cuentan con sistemas de frenado de respuesta rápida, más allá de la capacidad de reacción humana; especialmente aquellos desarrollados con el propósito de crear un servicio de alta capacidad, como se resume en el cuadro siguiente (Furman, B., 2014):

Cuadro 3. Tiempo de activación de frenado de los sistemas PRT desarrollados.

Fabricante o desarrollador	Mecanismo de actuación	Tipo de freno de emergencia	Intervalo (Headway) (seg)	Tiempo de activación (seg)
Zgetthere	motor y zapata neumática	motor, tambor y zapata	5	0.3
ULTra	resorte	disco y zapata	2	0.5
Vectus	mecánico y motor lineal	disco y motor lineal	3	0.01
Cabintaxi	mecánico y motor lineal	tambor y motor lineal	0.5	0.02
Taxi 2000	mecánico y motor lineal	tambor y motor lineal	0.5	0.001

Nota: Cabintaxi probó la capacidad de mantener un intervalo de seguimiento de 0.5 seg, pero se planificó para dar servicio con intervalos de 1.9 seg (Burger, M., 2008).

Los fabricantes de automóviles modernos de alta gama están ofreciendo sistemas automáticos para evitar colisiones (Collision Avoidance Systems), que utilizan radar, radar láser (LIDAR) y cámara para reconocimiento de imágenes, para detectar una colisión inminente y activar los frenos del vehículo; para el año 2015, la mitad de los modelos de autos nuevos que se vendían en los EEUU ofrecían la opción de un sistema semejante y lograban reducciones en los accidentes de un 15%, con respecto a los vehículos no equipados con esta opción (Ciccino, J., 2016).

La efectividad de los sistemas automáticos de frenado en automóviles se comprobó desde el año 1997, con el proyecto National Automated Highway System Consortium que inició en el año 1991, con el propósito de hacer más seguras y eficientes las carreteras. Una de las técnicas ensayadas durante ese proyecto se llama “platooning”, que se explica a continuación.

Platooning

Se llama platooning a la conducción en pelotones de vehículos que viajan muy cerca unos de otros y a la misma velocidad; normalmente en una fila de vehículos que siguen al líder del frente: aceleran, frenan y cambian de dirección de manera coordinada para mantener la forma de la fila. Se han realizado investigaciones para automatizar el platooning y acercar los vehículos entre sí lo más posible, para aumentar la capacidad de las carreteras. La investigación más conocida surgió por una ley del Congreso de los EEUU de 1991, la Intermodal Surface Transportation Efficiency Act (ISTEA); esta ley instruyó al Departamento de Transporte de los EEUU (DOT) a que realizara una demostración de un vehículo automático en una carretera para 1997; la Administración Federal de Carreteras de EEUU (FHWA) se encargó de la tarea y estableció un programa de \$90 millones en el que participaron General Motors, California Transit (CALTRANS), Delco, Parsons Brinkerhoff,

Bechtel, Universidad de California en Berkeley, Universidad Carnegie Mellon y Lockheed Martin; el grupo se llamó Consorcio Nacional de Sistemas Automatizados de Carreteras (National Automated Highway System Consortium - NAHSC). La exhibición se llamó Demo'97 y se realizó en la carretera I-15 de San Diego, California y, además de General Motors, las empresas Toyota y Honda presentaron sus propios sistemas de control automático en sus autos (Bishop, R., 2005).



Figura 85. Pelotón automatizado de autos en la exhibición Demo'97, San Diego, California.
(www.prtconsulting.com)

Los resultados obtenidos en Demo'97 fueron satisfactorios para demostrar la posibilidad técnica de controlar vehículos como un pelotón; grupos de hasta 8 autos Buick Le Sabre 1997 de 5 metros de longitud, siguieron al vehículo frontal a una distancia constante de 6 pies (1.83 m), a velocidades de 50 mph (80 kph), resultando un intervalo de seguimiento o headway de 0.31 segundos y también a 30 mph (48 kph), dando un intervalo de 0.515 seg (Anderson, J.,1998).

El tiempo de respuesta de los sistemas automáticos de frenado se tiene en el rango de 0.12 y 0.20 seg. Al año 2008, tales sistemas estaban en uso en vehículos Nissan, Toyota, BMW y Mercedes Benz (Grover, C., 2008).

Los sistemas de frenado que ya se han desarrollado para los automóviles se pueden utilizar también en los vehículos de los sistemas PRT, para mantenerlos separados con pequeños intervalos de seguimiento, de manera segura y confiable.

Sistemas de frenado anti-bloqueo

Además del tiempo de respuesta del frenado, se ha avanzado en la calidad del frenado pues, desde los años 80 se ofrecen automóviles con sistemas de frenado anti-bloqueo (Anti-Lock Braking System o ABS), cada vez más generalizado a los vehículos de gama alta, media y baja. Este sistema evita que los neumáticos pierdan adherencia al camino, dosificando la fuerza de frenado en cortas pulsaciones; sensores detectan cuándo las llantas se detienen prematuramente o pierden adherencia y un computador que controla el sistema libera la presión del freno por fracciones de segundo y la vuelve

a aplicar, en un ciclo que se repite hasta que el conductor deje de frenar. Con este sistema, el conductor mantiene mayor control sobre la dirección y también mejora la adherencia de los neumáticos, llegando a permitir desaceleraciones de 1.1 g, en condiciones controladas (Kudarauskas, N., 2007).

En condiciones normales, con un sistema ABS se puede aumentar la adherencia hasta lograr desaceleraciones de 9.5 m/s^2 ó $0.97g$, como se aprecia en la Figura 86:

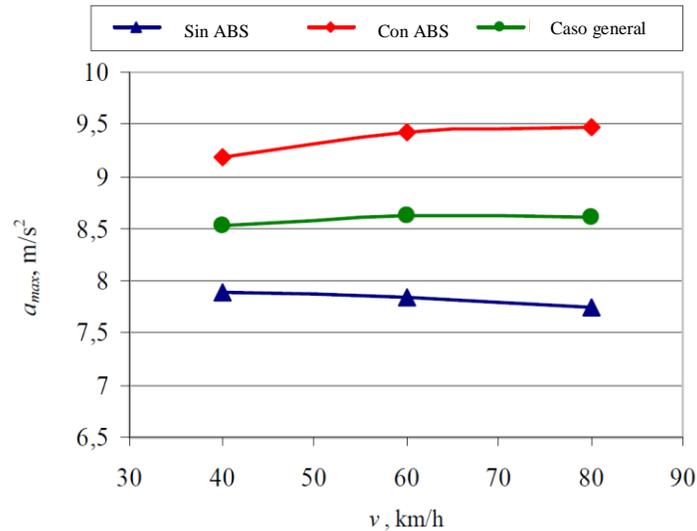


Figura 86. Desaceleraciones máximas de vehículos con o sin ABS. (Kudarauskas, N., 2007)

2.3.5.3. Condiciones de seguridad

Sin importar el tamaño de la separación intervehicular, deben tomarse previsiones para el caso de que suceda una colisión. Tomando como modelo los vehículos de carretera, existen elementos llamados de Seguridad Pasiva y otros de Seguridad Activa.

Seguridad pasiva

La seguridad pasiva comprende todos los sistemas que protegen a los pasajeros de un vehículo, una vez que ha ocurrido una colisión. Dentro de ellos se pueden citar los siguientes:

- Zonas deformables en los vehículos.
- Celdas de seguridad en vehículos.
- Protección de impactos laterales.
- Cinturones de seguridad.
- Bolsas de aire.
- Parabrisas laminados.
- Columna de dirección colapsable.

En 1952, el ingeniero austriaco de Mercedes Benz, Béla Barényi, conceptualizó el uso de zonas deformables al frente y atrás de los vehículos para, con esa deformación de las carrocerías, disipar la energía de ambos vehículos involucrados en la colisión; una zona rígida indeformable protege a los pasajeros (Figura 87) (www.mercedes-benz.com).

Los autos Smart, por el contrario, son de dimensiones tan pequeñas que tienen una zona deformable frontal muy pequeña y una celda protectora muy rígida, llamada Celda Tridion. El concepto de protección de pasajeros es que la rígida Celda Tridion deforme las zonas sacrificables del vehículo que colisiona al Smart y así disipe la energía del choque (Figura 88) (www.smart.com).



Figura 87. Celda de seguridad de pasajeros y zonas deformables para absorción de impactos.
(www.mercedes-benz.com)



Figura 88. Celda Tridion indeformable para seguridad de pasajeros.
([www.smart.com /es/dealers/smartcenter-master/es/index/smart-fortwo/safety.html](http://www.smart.com/es/dealers/smartcenter-master/es/index/smart-fortwo/safety.html))

Aerospace Corporation, en el diseño de su vehículo PRT, incluyó parachoques disipadores de energía, cinturones de seguridad, bolsas de aire, una zona deformable al frente y una zona rígida protectora de los pasajeros en la parte posterior (Irving, J., 1978), como elementos de seguridad pasiva ante las colisiones.

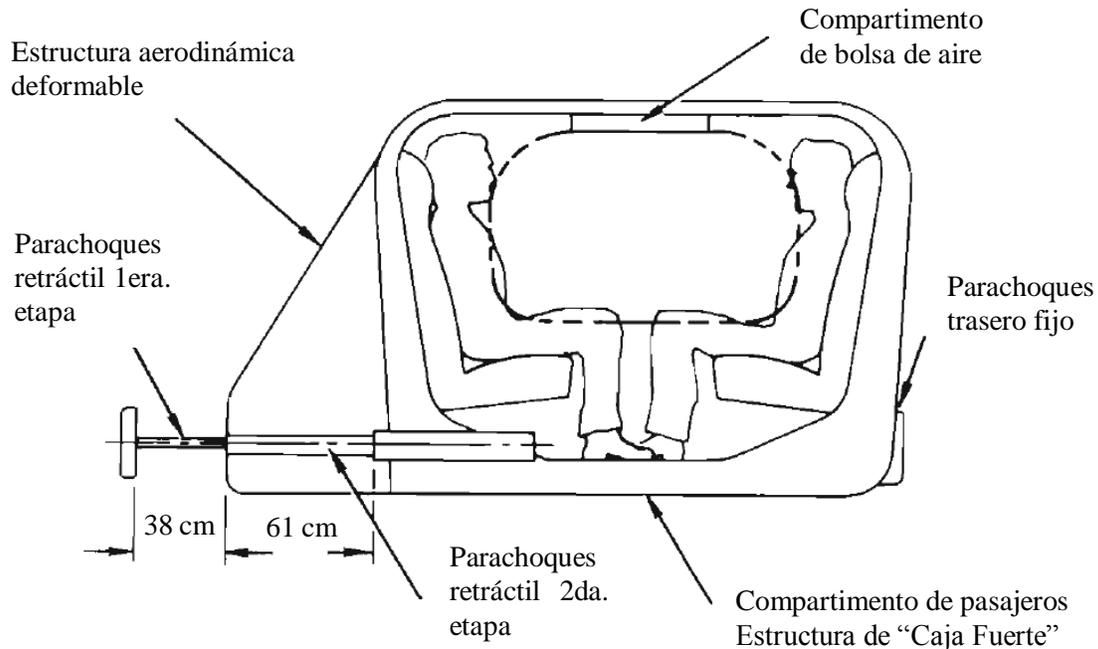


Figura 89. Concepto de seguridad pasiva del sistema PRT de Aerospace Corporation. (Irving, J., 1978)

Seguridad activa

Este concepto engloba todos los dispositivos que permiten una mejor acción del conductor para prevenir los accidentes en el mundo automotriz. Ejemplos:

- Sistemas de frenado anti bloqueo (ABS).
- Sistemas de control de tracción (TCS).
- Control electrónico de estabilidad (ESC).
- Sistemas de advertencia de colisiones.
- Sistema de evasión de colisiones.

Los dos últimos están muy relacionados con el concepto de “vehículo autónomo en carretera” que desarrollan varios fabricantes automotrices, entre ellos Tesla Inc. y que sirve a modo de piloto asistente, pero no puede sustituir al conductor.

2.3.5.4. Sistemas PRT en desarrollo

En todo el mundo se mantienen iniciativas para instalar sistemas PRT de alta capacidad y algunos de gran velocidad. A continuación, se presenta una lista de algunos de esos sistemas que están en algún grado de desarrollo, registrados por la Advanced Transit Association (www.advancedtransit.org). Debe hacerse notar que, en esta época, todas las iniciativas de desarrollo se realizan en el ámbito privado, más los clientes potenciales son entidades públicas que esperan recibir un producto ya terminado.

Cuadro 4. Sistemas PRT en proceso de desarrollo.

Nombre	País	Asientos	Soportado/Suspendido	Tracción eléctrica
Skytran	EEUU	2	Suspendido	Maglev pasivo
Beamways	Suecia	4	Suspendido	Motor rotatorio
FlyWay	Suecia	6	Suspendido	Motor lineal
Metrino	Polonia	2	Suspendido	Motor rotatorio
TransitX	EEUU	4	Suspendido	Motor rotatorio
Spartan Superway	EEUU	4	Suspendido	Motor rotatorio
Rielevado	Puerto Rico	1	Suspendido	Motor rotatorio
SkyWeb Express	EEUU	3	Soportado	Motor lineal
SkyWay	Bielorrusia	4	Suspendido	Motor rotatorio
SkyCab PRT	Suecia	4	Soportado	Motor rotatorio
PRTProject	EEUU	6	Soportado	Motor rotatorio
PODTransit	EEUU	1	Soportado	Empuje neumático
NextFuture	Italia -EEUU	6	Soportado	Motor rotatorio
Magnetrans	EEUU	2	Soportado	Maglev
Lofty Taxi	Canadá	4	Sop/Susp	Motor rotatorio
Jpods	EEUU	2	Suspendido	Motor rotatorio
GTS	Suecia	4	Suspendido	Maglev
ET3	EEUU	6	Tunel	Maglev
Autobots	India	2	Soportado	Motor rotatorio

CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO

Esta es una investigación aplicada. Se utilizan en ella fuentes bibliográficas primarias, secundarias y terciarias. Los datos obtenidos se tabulan y se grafican para su mejor interpretación. Para cada objetivo específico se definieron productos, que se obtienen a través de diferentes tareas.

3.1. Objetivo Específico 1

Determinar la capacidad de transporte de pasajeros de un sistema PRT en el corredor vial entre los distritos centrales del Cantón Central de San José y el Distrito Central del Cantón de Desamparados.

Previo al cálculo de su capacidad, debe definirse el sistema básico de PRT.

3.1.1. Conceptualización del sistema de transporte PRT para la GAM.

3.1.1.1. Definir las características del sistema de transporte PRT, mediante investigación bibliográfica y un proceso de selección de alternativas.

De acuerdo con lo investigado en la bibliografía, se escoge el tipo de componentes necesarios del sistema de Transporte Personal Rápido. Se limitarán sus características, dentro de lo posible, a una elección entre componentes reales, existentes y los de menor complejidad; por ejemplo: se elige un sistema de tracción de los carros mediante ruedas de hule sobre la vía, en vez de sistemas de levitación magnética, que no se producen en masa.

Cuando existen varias opciones para un mismo componente, se evalúan varias características que se desean maximizar. La valoración se realiza categorizando las cualidades más evidentes de cada opción.

Se clasifican entre sí las variantes u opciones de cada componente, para cada característica evaluada, asignándole el número 1 a la opción que ofrece mayores ventajas y el número más alto a la menos deseable. Se tabulan los resultados, como en este ejemplo:

Cuadro 5. Ejemplo de evaluación de opciones para un componente del sistema PRT.

Componente a evaluar	Característica A	Característica B	Característica C	Característica D	Característica E	Total
Opción 1	1	5	2	2	5	14
Opción 2	4	3	4	4	2	17
Opción 3	3	1	1	5	4	14
Opción 4	2	2	5	3	1	13
Opción 5	5	4	3	1	3	16

En este ejemplo, la opción más favorable sería la número 4, por tener el puntaje total menor. Las características a evaluar en cada componente, todas con el mismo peso, son:

- La seguridad del viajero.
- Seguridad del público en general.
- Confort del viajero.
- Simplicidad constructiva.
- Estandarización de componentes.
- Simplicidad de mantenimiento.

No se incluyeron consideraciones objetivas de costo en esta etapa de definiciones, porque la maximización de las características evaluadas en esta etapa temprana, permitirá controlar con más facilidad los costos durante los procesos de diseño e implementación. Además, la mayoría de sistemas construidos con los cuales se podría comparar, no publican costos desagregados de los componentes ni del mantenimiento.

Por ejemplo, para definir si es mejor que los carros viajen por encima o por debajo de la viga de vía, se comparan las opciones valorando sus características de la siguiente manera:

Seguridad del Pasajero: Los vehículos suspendidos bajo la vía se encontrarán protegidos ante la caída de objetos como árboles y escombros. Para evacuar pasajeros de un carro en medio de una viga, en caso de emergencia, es sencillo dotar al carro suspendido de un teclé para que éste descienda hasta el nivel de la calle de manera controlada, o también se les puede llegar desde abajo con una grúa; mientras que si los carros viajaran por encima de la viga sólo existe la opción de usar una grúa. Por todo lo anterior, el carro suspendido ofrece más seguridad al pasajero.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por la ubicación de los vehículos encima o debajo de la viga.

Confort del pasajero: Cuando los carros viajan por una curva, se introduce una componente de fuerza lateral sobre el pasajero, que se suma a la fuerza gravitacional. La sensación de empuje lateral se elimina si el carro se inclina para que la fuerza total compuesta baje hacia los pies o el asiento del pasajero (Figura 91).

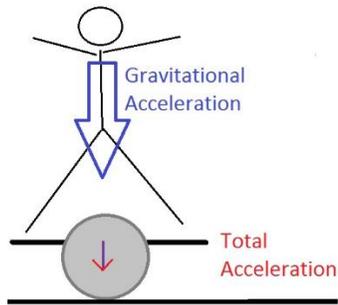


Figura 90. Fuerza gravitacional.
(www.max93.net/projects/hoverboard/)

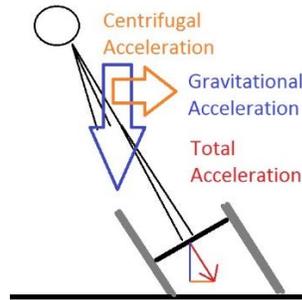


Figura 91. Componentes gravitacional, lateral y total.
(www.max93.net/projects/hoverboard/)

Para lograr la inclinación de los carros que viajan suspendidos de la viga, se instala una rótula en la parte superior de ellos y la misma fuerza lateral produce la inclinación necesaria. Los carros que viajan sobre la vía, por el contrario, requieren la construcción de una vía inclinada de acuerdo con la velocidad proyectada; si en algún momento la velocidad es diferente a la diseñada, el pasajero sentirá la inclinación como una incomodidad. Por esto, el carro suspendido da mayor confort al pasajero.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Los vehículos que viajan sobre la viga requieren de una vía peraltada; esto implica más elementos geométricos adicionales de vía que deben diseñarse, construirse y tenerse en inventario durante la operación del sistema. La construcción de la vía para vehículos suspendidos es más simple y se requieren menos componentes especiales que para el caso de los vehículos que viajan sobre la vía, pero también, ese tipo de construcción suspendida requiere de mecanismos más elaborados para realizar un cambio de vías.

Simplicidad de mantenimiento: Cuando los vehículos viajan suspendidos de la viga, la parte superior de ésta puede ser cerrada, evitando la entrada de la lluvia, de la ceniza volcánica o de basura, evitando causas mayores de corrosión; los pájaros y otros animales tampoco podrán posarse sobre la sección donde se desplazan los vehículos. El mantenimiento es más fácil cuando los vehículos viajan suspendidos de la viga.

Los resultados se tabulan. El menor puntaje muestra que el carro suspendido es más ventajoso que el que viaja por encima de las vías.

Cuadro 6. Evaluación de opciones para la ubicación del carro en la vía PRT.

Ubicación del carro en la viga de vía	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Carro sobre viga	2	NA	2	1	2	2	9
Carro suspendido	1	NA	1	2	1	1	6

Este proceso se repite para elegir todos los componentes básicos del sistema de transporte:

- Tipo de vía.
- Ubicación de los vehículos en la vía.
- Tipos de vehículo.
- Estaciones y elevadores.

3.1.2. Calcular la capacidad de transporte de pasajeros del sistema PRT, de acuerdo con las características definidas en el punto 3.1.1.1.

Una vez definidos los componentes básicos del sistema PRT, se calcula cuántos pasajeros puede transportar por unidad de tiempo un segmento de viga entre estaciones. Se calcula el tiempo de abordaje del pasajero, el tiempo de viaje y el tiempo de desabordaje, mediante ecuaciones de física y álgebra.

3.1.3. Definir el recorrido del sistema PRT.

Se define sobre un mapa la ruta que recorrerá la línea del sistema PRT, entre los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados.

3.1.4. Modelar una sección de la red PRT con el programa PARAMICS o SIMTRAFFIC, para revisar la correcta interacción entre los diferentes vehículos.

La modelación permite visualizar las interacciones entre los vehículos en las vías, para identificar problemas que pueden presentarse.

3.2. Objetivo Específico 2

Estimar el mercado de usuarios potenciales del sistema PRT en el corredor San José-Desamparados.

- 3.2.1. Estimación de la cantidad de viajes en vehículo privado que se realizan en la red vial del corredor San José – Desamparados. Se analizan las matrices origen-destino de los viajes en el corredor San José-Desamparados, realizadas dentro del “Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM” (LCR Logística SA, (2007), como parte del programa “Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana” (PRUGAM), para estimar el número de usuarios del modo de transporte con vehículo privado.

- 3.2.2. Extrapolación de la cantidad de usuarios de vehículo particular que puedan cambiar a un modo de transporte como el monorriel propuesto, mediante un modelo LOGIT de asignación de modos de transporte.

3.3. Objetivo Específico 3

Estimar la cantidad de vehículos particulares que pueden dejar de circular en el corredor San José-Desamparados con la puesta en marcha de un sistema PRT.

- 3.3.1. Con los datos del número de usuarios potenciales que podrían viajar en PRT y el número estimado de viajeros por cada vehículo, se calcula el número de vehículos privados que dejarían de circular en el corredor San José-Desamparados, con la puesta en marcha de un sistema PRT.

3.4. Objetivo Específico 4

Comparar la capacidad de transportar pasajeros que tendría el sistema PRT con la capacidad del transporte individual por automóvil en carretera.

- 3.4.1. Cálculo de la capacidad teórica de una carretera típica y las carreteras del corredor vial San José-Desamparados.

- 3.4.2. Comparación de la capacidad de transporte de una carretera típica con el sistema PRT, con los datos de capacidad estimada del sistema PRT, obtenidos en el punto 3.1.2.

- 3.4.3. Comparación de tiempos de viaje de los pasajeros en el sistema PRT y de los viajeros que utilizan el automóvil privado en el corredor San José-Desamparados.

3.5. Objetivo Específico 5

Estimar los costos de construcción y operación que tendría el sistema PRT y compararlos con los costos de construcción y operación de una carretera típica en Costa Rica.

3.5.1. Estimación del costo de construir un sistema PRT y sus componentes

3.5.1.1. Realizar investigación bibliográfica de costos de construcción y operación de sistemas de componentes existentes, análogos o semejantes a los del sistema PRT y de infraestructura de monorraíles.

3.5.2. Comparación del costo de construir un sistema PRT con el de construir una carretera típica en Costa Rica.

3.5.2.1. Realizar investigación bibliográfica de costos de construcción y operación de carreteras en Costa Rica.

3.5.2.2. Comparar los costos de construir y operar un sistema PRT con el costo de construir y operar una carretera con los vehículos particulares que la transitan.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Conceptualización del sistema de transporte PRT para la GAM

En la sección 1.4. se habla de las funcionalidades de un sistema PRT, ahora se definirán su forma, sus componentes y las características básicas de ellos, antes de calcular la capacidad de este sistema de transporte.

El sistema deberá contar con los siguientes elementos, de los que se escogerá la versión más conveniente;

- Una vía exclusiva.
- Carros individuales de una capacidad de pasajeros semejante a la de un automóvil.
- Estaciones para abordar y desabordar el vehículo.

4.1.1. Selección de componentes del sistema PRT

En esta sección se decide, de manera preliminar, el tipo de elementos que conformarán el sistema PRT, de acuerdo con lo explicado en la sección 3.1.1.1.

4.1.1.1. Vía exclusiva para los vehículos PRT

Los vehículos viajarían en una vía exclusiva, separados del tránsito vehicular y peatonal regular. Se propone hacer la vía elevada, para aprovechar los derechos de vía existentes en las ciudades. Los vehículos deben viajar a una altura mayor a los 5 m, que es la altura máxima permitida para los vehículos en carretera. Para tener un mayor margen de seguridad, se escoge una **altura libre mínima, desde el piso de los vehículos hasta el suelo (gálibo), de 6 metros.**

a. Material de vía

El material de la vía elevada debe ser resistente, económico y durable, lo que nos lleva a considerar el uso del concreto o el acero para su construcción. Para escoger entre ambos materiales, concreto y acero, se utiliza el procedimiento descrito en el punto 3.1.1.1., asignándole el número 1 a la mejor de las opciones disponibles y el número más alto a la menos deseable.

Las características a evaluar, todas con el mismo peso, son:

- La seguridad del viajero.
- Seguridad del público en general.
- Confort del viajero.
- Simplicidad constructiva.
- Estandarización de componentes.
- Simplicidad de mantenimiento.

Internacionalmente se han planeado y probado sistemas elevados de transporte con vías de concreto, de acero o una combinación de ambos, como en el sistema de Morgantown, West Virginia. El sistema PRT se visualiza como un medio de transporte liviano, que permita la estandarización máxima de componentes y su reutilización en diferentes ubicaciones para bajar costos de construcción. Los componentes de concreto son más pesados, frágiles y difíciles de reutilizar que los de acero.

Seguridad del Pasajero: Esta característica no se ve influida por el material de la vía.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por el material de la vía.

Confort del pasajero: Esta característica no se ve influida por el material de la vía.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Las vigas de concreto, aún prefabricadas requieren de una manipulación cuidadosa debido a su gran peso y su fragilidad. Las columnas que soporten una vía de concreto deben ser más grandes y menos separadas que las necesarias para soportar una viga de acero de igual resistencia, añadiendo complejidad al proceso de construcción. Los elementos de concreto son más difíciles de reutilizar que los de acero.

Simplicidad de mantenimiento: Las vigas de concreto son, por lo general, mucho más resistentes a la acción de los elementos que las vigas de acero y requieren de un mantenimiento menor.

Cuadro 7. Evaluación de opciones para el tipo de material de la vía PRT.

Material de vía	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Vía de concreto	NA	NA	NA	2	2	1	5
Vía de acero	NA	NA	NA	1	1	2	4

Conclusión: El menor puntaje indica que las vías de acero superan a las vías de concreto en dos de los tres aspectos considerados. Por eso se recomienda el uso de secciones de acero para construir la vía.

b. Tipo de vía

La vía puede ser una viga abierta o cerrada.



Figura 92. Viga abierta.
(<https://metrino-prt.com>)



Figura 93. Viga cerrada.
(www.swedetrack.com)

Las vigas de alma abierta requieren menos material en su construcción, generalmente son secciones compuestas para confinar los mecanismos de rodamiento, pero requieren mayor uso de mano de obra y la producción de uniones mecánicas o soldadas, que también demandan mayor mantenimiento comparadas con las vigas simples de sección continua; además dejan a los sistemas mecánicos de rodamiento y una mayor superficie de metal expuestos a los elementos, aumentando la necesidad de mantenimiento, comparados con aquellos que van protegidos dentro de una viga de sección cerrada.

Seguridad del Pasajero: Esta característica no se ve influida por el tipo de viga.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por el tipo de viga.

Confort del pasajero: Esta característica no se ve influida por el tipo de viga.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Las vigas de alma abierta requieren para su construcción de menos material pero mayor complejidad y cantidad de mano de obra que las vigas de sección cerrada.

Simplicidad de mantenimiento: Las vigas de alma abierta dejan expuesta a los elementos una mayor superficie de metal y los sistemas mecánicos de rodamiento, aumentando la necesidad de mantenimiento sobre aquellos en una viga de sección cerrada.

Cuadro 8. Evaluación de opciones para el tipo de viga de la vía PRT.

Tipo de vía	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Viga cerrada	NA	NA	NA	1	NA	1	2
Viga de alma abierta	NA	NA	NA	2	NA	2	4

Conclusión: Las vías construidas con una viga cerrada ofrecen mayores ventajas sobre las vigas de alma abierta.

c. Ubicación del carro en la vía

Para definir si es mejor que los carros viajen por encima o por debajo de la viga de vía, se comparan las opciones:

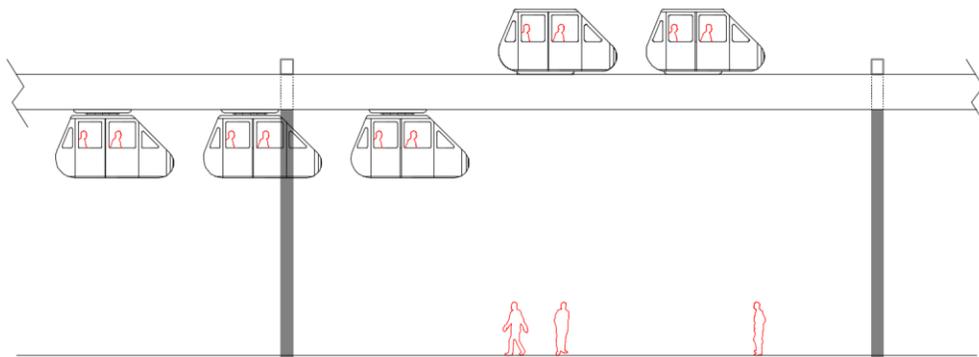


Figura 94. Carros que viajan por debajo o por encima de la viga.

Seguridad del Pasajero: Para evacuar pasajeros de un carro en medio de una viga, en caso de emergencia, es sencillo dotar al carro suspendido de un tecele para que éste descienda hasta el nivel de la calle de manera controlada, o también se les puede llegar desde abajo con una grúa; mientras que si los carros viajaran por encima de la viga sólo existe la opción de usar una grúa. El carro suspendido ofrece más seguridad al pasajero.

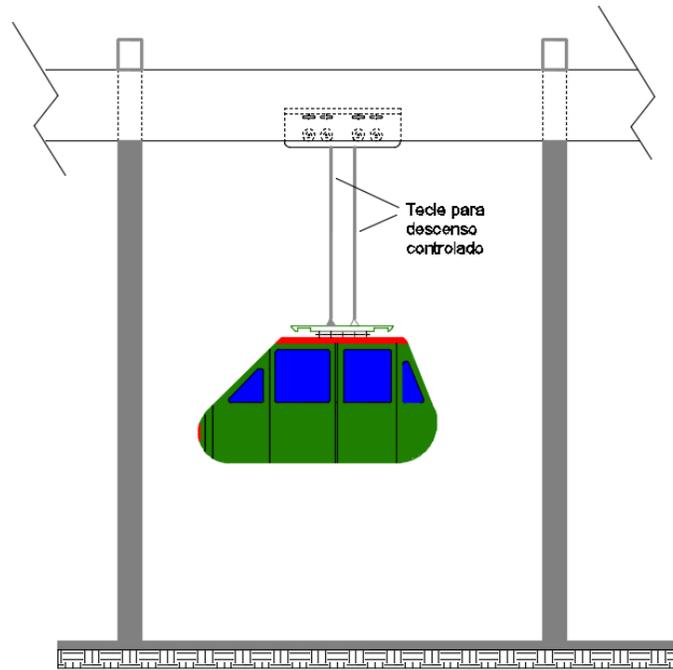


Figura 95. Descenso hacia el suelo de un vehículo suspendido.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por la ubicación de los vehículos encima o debajo de la viga.

Confort del pasajero: Cuando los carros viajan por una curva, se introduce una componente de fuerza lateral sobre el pasajero, que se suma a la fuerza gravitacional. La sensación de empuje lateral se elimina si el carro se inclina para que la fuerza total compuesta baje hacia los pies o el asiento del pasajero (Figura 97).

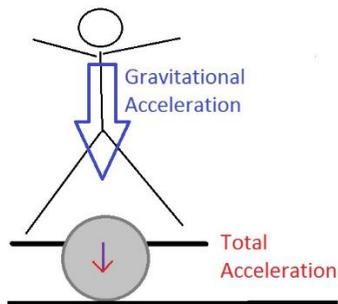


Figura 96. Fuerza gravitacional.
(www.max93.net/projects/hoverboard/)

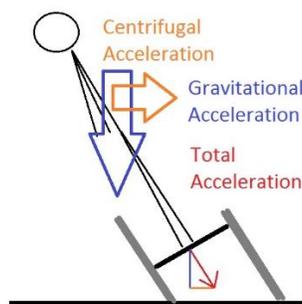


Figura 97. Componentes gravitacional, lateral y total.
(www.max93.net/projects/hoverboard/)

Para lograr la inclinación de los carros que viajan suspendidos de la viga, se instala una rótula en la parte superior de ellos (Figura 98) y la misma fuerza lateral produce la inclinación necesaria. Los carros que viajan sobre la vía, por el contrario, requieren la construcción de una vía inclinada de

acuerdo con la velocidad proyectada; si en algún momento la velocidad es diferente a la diseñada, el pasajero sentirá la inclinación como una incomodidad. El carro suspendido da mayor confort al pasajero.

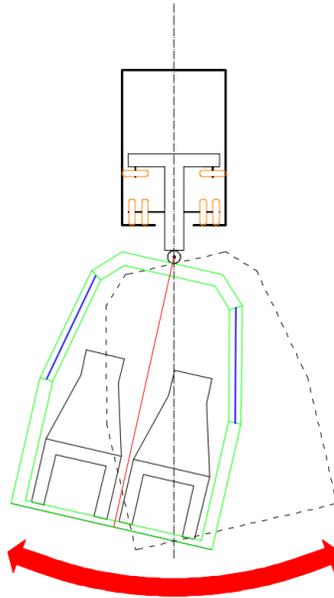


Figura 98. Articulación que permite la inclinación del vehículo suspendido.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Los vehículos que viajan sobre la viga requieren de una vía peraltada en las curvas; esto implica más elementos geométricos adicionales de vía que deben diseñarse, construirse y tenerse en inventario durante la operación del sistema. La construcción de la vía para vehículos suspendidos es más simple y se requieren menos componentes especiales que para el caso de los vehículos que viajan sobre la vía.

Simplicidad de mantenimiento: Cuando los vehículos viajan suspendidos de la viga, la parte superior de ésta puede ser cerrada, evitando la entrada de la lluvia, de la ceniza volcánica o de basura, evitando causas mayores de corrosión; los pájaros y otros animales tampoco podrán posarse sobre la sección donde se desplazan los vehículos. El mantenimiento es más fácil cuando los vehículos viajan suspendidos de la viga.

Cuadro 9. Evaluación de opciones para la ubicación del carro en la vía PRT.

Ubicación del carro en la viga de vía	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Carro sobre viga	2	NA	2	1	2	2	9
Carro suspendido	1	NA	1	2	1	1	6

Conclusión: Por mayores seguridad y confort del pasajero; estandarización de componentes y simplicidad de mantenimiento, el carro suspendido bajo la vía ofrece más ventajas que el que viaja por encima de ella.

d. Tipos de vehículos

Este sistema de transporte se proyecta para sustituir la mayor cantidad posible de viajes en autos de pasajeros, por lo tanto, deberá ofrecer vehículos con una capacidad semejante a los vehículos particulares, de cuatro pasajeros. Durante la hora punta de tráfico se ha observado que la mayoría de vehículos transportan uno o dos pasajeros y puede pensarse que es necesario incluir vehículos más pequeños o con usos específicos, como transporte de cargas y es lo que se define a continuación:

Seguridad del Pasajero: Esta característica no se ve influida por los tipos de vehículo.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por los tipos de vehículo.

Confort del pasajero: Si existen varios tipos de vehículo, durante la hora punta de tránsito se pueden producir demoras al pasajero mientras espera que le llegue el tipo de vehículo que él necesita para su viaje. Con un solo tipo de vehículo no se introducen estas demoras.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: La producción de varios tipos de vehículo disminuye las economías de escala que se obtienen de la producción de un vehículo estandarizado, incrementando el costo de la flota.

Simplicidad de mantenimiento: El manejar una flota con varios tipos de vehículo obliga a tener un mayor inventario de repuestos y añaden complejidades al proceso de mantenimiento.

Cuadro 10. Evaluación de opciones para los tipos de vehículo del sistema PRT.

Tipo de vehículo	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Vehículo típico	NA	NA	1	1	1	1	4
Varios tipos de vehículo	NA	NA	2	2	2	2	8

Conclusión: Es mejor construir y operar una flota con un solo tipo de vehículo.

e. Vehículo típico

El vehículo se proyecta como un espacio ergonómico, que ofrezca:

- Asientos cómodos.
- Facilidad para entrar y salir de la cabina, aún para personas con alguna discapacidad física.
- Entrada de luz natural.
- Espacio para llevar paquetes o acomodar una bicicleta.
- Carrocería con zonas colapsables para disipar la energía de cualquier colisión.

Con estos requisitos y partiendo de los estándares arquitectónicos comúnmente aceptados (Neufert, E., 1982), se tomaron las siguientes decisiones:

- Cabina con altura interior de 2 m, para permitir el ingreso y egreso en una posición erguida, natural (Figura 99).
- Cojín de los asientos a una altura de 0.50 m, semejante a una silla de comedor, para facilitar el acceso y el descenso a personas adultas mayores.
- Posibilidad de instalar asientos plegables, para facilitar el ingreso y acomodo de personas, así como el uso del espacio para transporte de cargas voluminosas.
- Asientos con respaldar erguido, para acomodar a los pasajeros en el menor espacio horizontal, semejante a los asientos de los aviones comerciales.
- Ancho interior de la cabina de 1.40 m, para permitir la colocación de 2 asientos paralelos.
- Ancho exterior de la cabina de 1.60 m, suponiendo paredes exteriores con espesor de 0.10 m.

- Distancia mínima de 0.50 entre las filas de asientos anteriores y posteriores.
- Puertas que ofrezcan una abertura de dos metros, para facilitar entrada de sillas de ruedas y paquetes grandes.
- Separación lateral entre vehículos de cuatro metros para que se puedan balancear lateralmente, mientras se desplazan a lo largo de la vía (Figura 100).
- Ángulo máximo de oscilación lateral de 40°, para evitar cualquier impacto con los vehículos que viajen en vías paralelas.

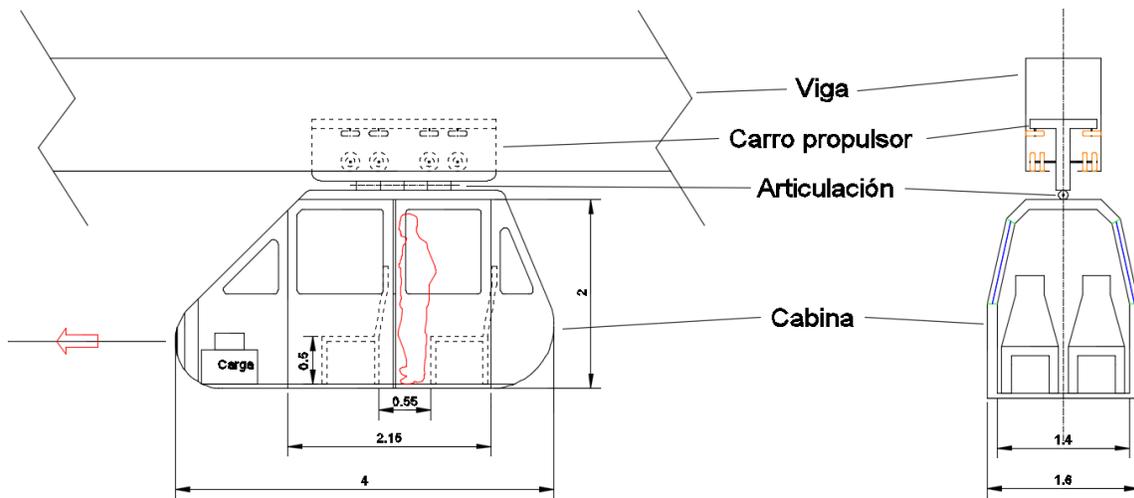


Figura 99. Dimensiones básicas de un vehículo PRT.

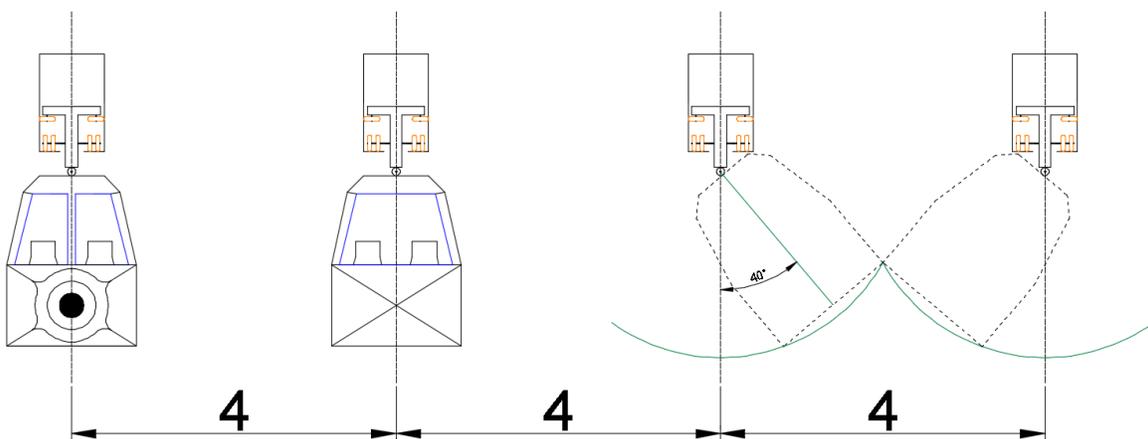


Figura 100. Separación mínima entre vías paralelas.

El tipo de viga cerrada, con el carro suspendido de ella, permiten asignar un módulo de tracción semejante al de los sistemas introducidos por SAFEGE de Francia en 1960 (Voice, 2010). Consiste en un carro con llantas de hule y motores eléctricos dentro de la viga, del que se suspende la cabina de pasajeros (Figura 101).

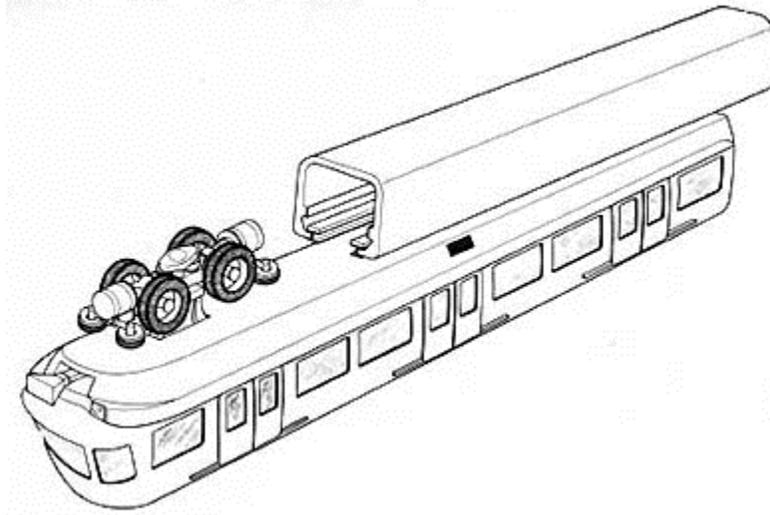


Figura 101. Viga, cabina y módulo de tracción de monorraíl SAFEGE.
(www.monorails.org)

Entre los sistemas actuales que utilizan la tecnología SAFEGE están:

- El monorraíl de Shonan en la ciudad de Kamakura y el monorraíl de la ciudad de Chiba en Tokio, Japón (Voice, 2010).
- El sistema SIPEM (Siemens People Mover), instalado en la Universidad de Dortmund y en el aeropuerto de Düsseldorf, Alemania (Silva, L., 1981).

Por ser una tecnología comprobada y accesible (Silva, L., 1981), se escoge este sistema de tracción SAFEGE para los vehículos del sistema PRT.

4.1.1.2. Estaciones

Se debe elegir la ubicación de las estaciones con respecto a la vía y el tipo de construcción que tendrían.

a. Ubicación de estaciones:

La estación puede ubicarse sobre la vía principal o en una vía paralela, a modo de apartadero, que no afecte el flujo general.

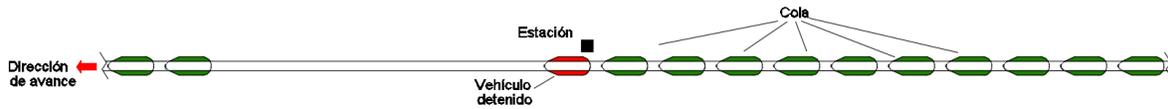


Figura 102. Estación sobre la vía principal.

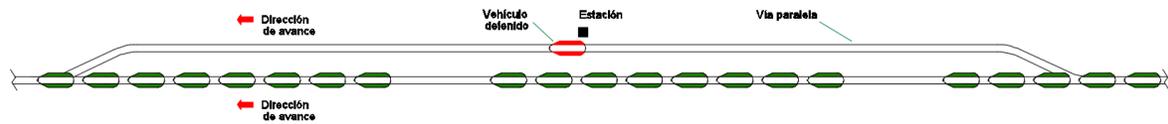


Figura 103. Estación sobre vía paralela a la principal.

Se valoran ambos tipos de estación:

Seguridad del Pasajero: Esta característica no se ve influida por la ubicación de la estación.

Seguridad del público en general: Esta característica no se ve influida por la ubicación de la estación.

Confort del pasajero: Cuando la estación está en línea, si un vehículo se detiene en ella para permitir a un pasajero abordar o desaboardar, todos los vehículos que viajen detrás del que se detiene deberán detenerse igualmente, añadiendo demora al tiempo de viaje de todos los vehículos que debieron detenerse. Si la estación se encuentra en una vía paralela, el flujo por la vía principal no se verá afectado por la operación de la estación, habrá menores demoras y el pasajero llegará más rápido a su destino.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Es más sencillo construir una estación sobre la vía principal que incluir una vía paralela.

Simplicidad de mantenimiento: Para dar mantenimiento a una estación sobre la vía principal, debe detenerse el flujo en esa vía, mientras que, si se encuentra en una vía paralela, el acceso a esa vía se puede cerrar y el mantenimiento se facilita, sin detener el flujo principal.

Cuadro 11. Evaluación de opciones para la ubicación de estaciones PRT.

Ubicación de estación	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
Estación en línea	NA	NA	2	1	NA	2	5
Estación paralela	NA	NA	1	2	NA	1	4

Conclusión: Es más ventajoso construir las estaciones en una vía paralela a la vía principal. Como se puede inferir de la Figura 100, para tener una sola vía PRT se requiere un espacio transversal horizontal de 4 metros y, para tener dos vías paralelas, como cuando se instala una estación, el espacio mínimo necesario (derecho de vía) sería de 8 metros.

b. Tipo de estaciones:

Las estaciones pueden ser:

- i. Construida a nivel de la calle, donde una vía secundaria parte de la principal y desciende hasta llevar a los vehículos al nivel de la acera, posibilitando la entrada y salida directa de los pasajeros, para luego volver a elevar la viga junto con los carros.

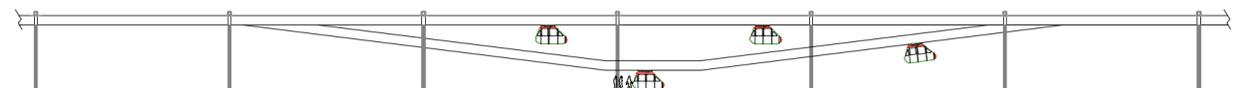


Figura 104. Vista lateral de una estación al nivel de la calle.

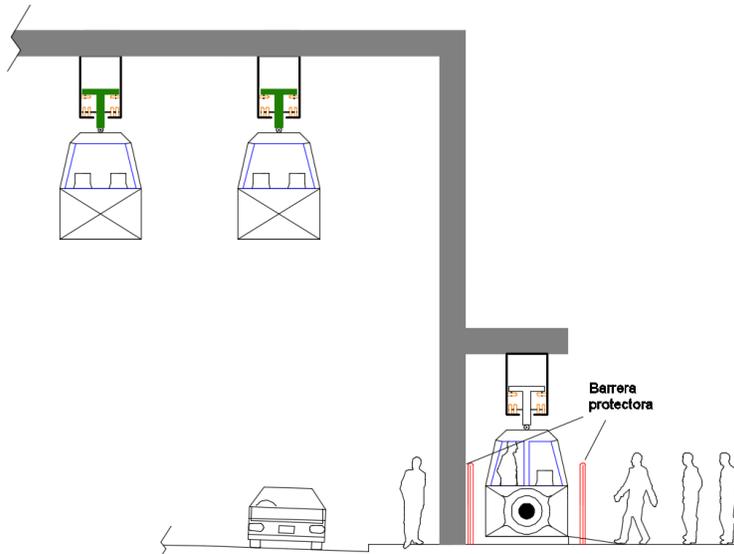


Figura 105. Estación al nivel de la calle.

- ii. Estación sin edificación. Como la cabina irá suspendida de la vía, un montacargas o elevador hace descender la cabina del vehículo, desde la vía elevada hasta el nivel de la calle, para permitir el ingreso y salida de los pasajeros y lo vuelve a elevar bajo la viga antes de iniciar su viaje.

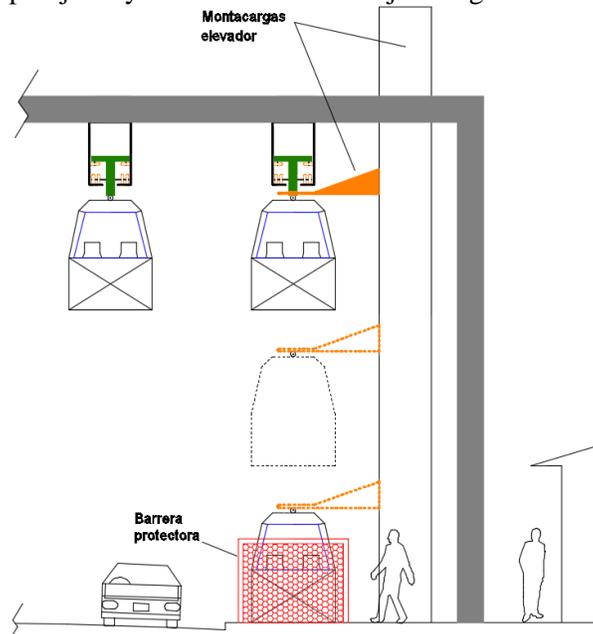


Figura 106. Estación sin edificación. El vehículo es descendido hasta el nivel de la calle.

- iii. Elevadas sobre el nivel de la calle, para que los pasajeros alcancen a ingresar o salir de los vehículos que viajan suspendidos bajo la vía, a 6 metros sobre el nivel de la calle.

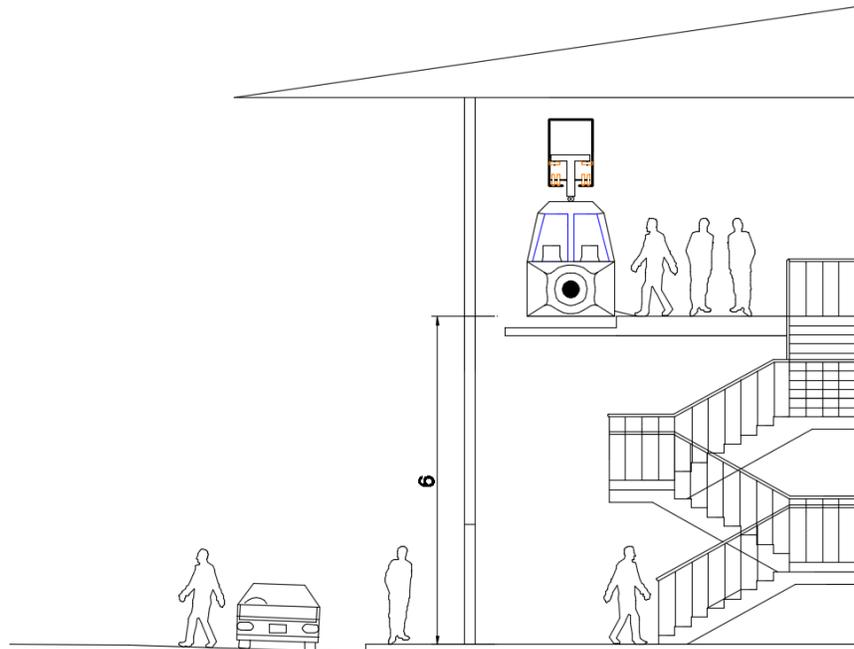


Figura 107. Estación elevada sobre el nivel de la calle.

Seguridad del Pasajero: Esta característica no se ve influida por el tipo de estación.

Seguridad del público en general: La estación elevada es más segura para el público general que no está utilizando el sistema de transporte, porque los vehículos siempre se encontrarán elevados del suelo. En las estaciones sin edificación y con elevador o montacargas, debe separarse del público la zona sobre la que desciende el carro que va a cargar o dejar pasajeros. En las estaciones a nivel de suelo, es más importante evitar la interferencia entre los carros en la vía descendente o ascendente y el público, por lo que será necesario confinar los recorridos del descenso de las vías hasta el nivel de calle, e igualmente su ascenso.

Confort del pasajero: La estación elevada implica un ascenso de los pasajeros por escaleras o elevadores hasta un andén adonde esperar un vehículo. En las estaciones con elevador del vehículo (montacargas), el pasajero simplemente espera a nivel del suelo la llegada del vehículo; igualmente ocurriría con la estación a nivel de suelo.

Simplicidad constructiva y estandarización de componentes: Es más sencillo construir una estación a nivel del suelo, que no implica el uso de elevadores, cuando la topografía y el trazado

urbano lo permitan; le sigue en complejidad la instalación de montacargas que eleven y bajen los vehículos hasta el nivel de la calle para crear estaciones sin edificación; esta opción requiere el mínimo uso de terreno. La mayor complejidad e inversión se prevé en la construcción de estaciones elevadas que requerirán de escaleras, elevadores, baños, una zona de espera y un andén de abordaje/des-abordaje.

Simplicidad de mantenimiento: Igual que en el caso de la simplicidad constructiva, es más sencillo dar mantenimiento a una estación a nivel de suelo sin componentes mecánicos especiales. La estación sin edificación incrementa la complejidad del mantenimiento por la presencia del montacargas para elevar y bajar los vehículos. La estación elevada requerirá aún mayor mantenimiento porque deberá tener al menos dos elevadores de pasajeros, de uso público.

Cuadro 12. Evaluación de opciones para el tipo de estación PRT.

Tipo de estación	Seguridad del pasajero	Seguridad del público	Confort del pasajero	Facilidad constructiva	Estandarización de componentes	Simplicidad de mantenimiento	Total
1. Estación elevada	NA	1	3	3	3	3	13
2. Elevador a nivel de calle	NA	2	2	2	2	2	10
3. Estación a nivel de calle	NA	3	1	1	1	1	7

Conclusión: El tipo de estación dependerá de las condiciones del sitio de parada. Se favorecerían las estaciones a nivel del suelo, seguidas por las estaciones sin edificación y, por último, las estaciones elevadas que, además de su mayor costo y complejidad, producen un mayor impacto paisajístico.

4.1.1.3. Resumen de características del sistema PRT.

En resumen, se definen las características del sistema como:

- Vías elevadas de acero y sección cerrada, separadas a cuatro metros unas de otras.
- Un solo tipo de vehículos que viajarán suspendidos de la viga:
 - o Con dimensiones de 4 metros de longitud, 1.60 m de ancho y con altura interna en la cabina de dos metros.
 - o Con un grupo motriz eléctrico que se mueve protegido de los elementos meteorológicos dentro de la viga.
 - o Con una articulación entre el carro motriz dentro de la viga y la cabina de pasajeros, para permitir la inclinación de la cabina al moverse por las curvas.

- Estaciones en vías paralelas a la vía principal, que pueden ser de tres tipos:
 - A nivel de la calle, donde la viga baja paulatinamente hasta llevar a los vehículos a nivel del suelo y luego, se eleva nuevamente.
 - Sin edificación, donde las cabinas de pasajeros son descendidas hasta el nivel del suelo por un montacargas o elevador.
 - Elevadas, construidas por sobre el nivel de la calle.

- Sistema de control tipo cuasi-sincrónico.
 - Control asincrónico en los tramos continuos. Los vehículos viajarán a su velocidad de crucero, guardando de manera autónoma las distancias con los vehículos al frente de ellos.
 - Control sincrónico en las intersecciones, donde computadores locales, supervisados por el sistema central, controlan el paso de los diferentes vehículos que entren a su zona de influencia y los liberan de ese control una vez que han pasado la intersección, para que ellos vuelvan a operar en modo asincrónico.
 - Supervisión general, cobro de tarifas y cálculo de las rutas recomendadas para cada viaje, por medio del computador central. La intervención del computador central en la operación de los vehículos se dará solamente cuando se detecte una situación de peligro, emergencia, o se detecten fallos en las computadoras locales que controlan las intersecciones.

- Reserva de tiquetes, cálculo de ruta y tarifas.
 - El computador central deberá supervisar la compra de los tiquetes o pasajes, calcular la ruta óptima, calcular el costo del viaje y avisar al usuario si la estación a la que desea llegar se encontrará congestionada; en ese caso, podrá sugerir estaciones cercanas para que el pasajero decida si desea viajar. Todo esto se debe dar antes de que el pasajero aborde el vehículo.

4.2. Capacidad del sistema PRT

Para calcular la capacidad del sistema PRT se analiza la capacidad de tránsito de vehículos en la viga y la capacidad de las estaciones de generar y recibir viajes.

4.2.1. Velocidades de operación

Al iniciar el análisis de este sistema se definió que se consideraría el uso e integración de tecnologías existentes, en este caso los sistemas de rodamiento tipo SAFEGE, con ruedas de hule dentro de la viga de soporte. Los sistemas SAFEGE existentes operan con velocidades máximas de 60 km/hora (SIPEM de Siemens, en Dortmund y Düsseldorf) y de 65 km/hora (Urban Flyer de Mitsubishi, como los monorraíles de Chiba y Shonan, en Japón) (Advanced Transit Association).

Se escoge para este proyecto una velocidad máxima de 60 km/hora, por las siguientes razones:

- Es una velocidad técnicamente factible con sistemas de rodamiento existentes.
- Es una velocidad mayor a la que actualmente se puede circular en las ciudades y ofrecerá una ventaja de tiempo ante el viaje por ciudad en automóvil privado.
- Se puede acelerar y frenar desde y hacia esa velocidad en distancias cortas.
- Permite estimar con facilidad el tiempo de recorrido, pues representa un avance de un kilómetro por minuto.

La velocidad máxima es la velocidad de crucero. Para realizar maniobras, cambios de dirección e ingresar a las paradas se debe usar una velocidad que permita tomar curvas de radio pequeño en medio de las calles estrechas de nuestras ciudades.

Para frenar desde la velocidad de crucero de 60 Km/hora hasta una velocidad de maniobra, se requiere una longitud definida por la velocidad inicial, la velocidad final, la desaceleración aplicada y el tiempo de aplicación.

4.2.2. Comodidad de los pasajeros

Este sistema debe considerar siempre los límites del confort de los pasajeros, para evitarles sensaciones desagradables. Se utilizará como referencia la aceleración de la gravedad terrestre, denominada “g” ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

La aceleración máxima permitida de avance o retroceso:

- Debe ser la más alta posible dentro de los límites de la comodidad del pasajero, para disminuir las longitudes de las rampas de entrada o salida, desde y hacia las estaciones.
- Será una aceleración mucho mayor que la de trenes y autobuses, donde la mayoría de pasajeros viajan de pie, porque los pasajeros del sistema PRT viajarán sentados y asegurados con cinturones, siempre.
- Una aceleración alta se puede aplicar en periodos cortos, minimizando cualquier posible incomodidad de los pasajeros.

Para dar una idea de la dimensión que puede tener esta aceleración máxima, en el siguiente cuadro se muestra la aceleración de varios vehículos terrestres y de aviones jet de pasajeros al despegar (Hoberock, 1976).

Cuadro 13. Niveles de aceleración para varios vehículos de pasajeros.

Vehículo	Aceleración	Aceleración	Aceleración
	Máxima	Máxima	Máxima
	(kph/seg)	(m/seg ²)	(g)
PRT de Morgantown (W. Virginia)	4.8	1.33	0.14
APM Airtrans (Aeropuerto Dallas)	4.1	1.14	0.12
BART (San Francisco, California)	5.3	1.47	0.15
VW Escarabajo 1500	7.2	2.00	0.20
Ford Fairlane	12.7	3.53	0.36
Pontiac Grand Prix	16.1	4.47	0.46
Motocicleta Norton 750	20.9	5.81	0.59
Jet Comercial al despegar	17.7	4.92	0.50

(Hoberock, 1976).

La aceleración máxima permitida de avance o retroceso proyectada para este sistema PRT se calculará como de $a = 0.5g$, que está dentro de los límites de comodidad experimentados rutinariamente por los pasajeros de medios de transporte como autos rápidos y aviones de pasajeros.

Además de que está muy por debajo de lo que se permite en la industria de la aviación y de lo que ha sido determinado por estudios médicos en la industria aeroespacial (Davis, Johnson, Stepanek & Fogarty, 2008), la aceleración de $0.5g$ del sistema PRT en estudio se aplicará por un máximo de 2.90

segundos, como se explica en el apartado “4.2.5.1. Acceso a las estaciones”, apenas una quinta parte del periodo aproximado de 15 segundos en que aceleran los aviones jet al despegar.

Esta aceleración propuesta de 0.5 g, es para un medio de transporte en el cual los pasajeros viajarán sentados, con cinturón de seguridad, semejante a los pasajeros de aviación; no se debe comparar con las aceleraciones de medios de transporte en los que el pasajero viaja de pie y en asientos sin cinturón de seguridad, como trenes y autobuses.

La aceleración se aplicará de manera variable, para suavizar el viaje a los pasajeros. La aplicación gradual de la aceleración se proyecta en un periodo de 2 segundos, en los que se variará de 0 a 0.5g, sea para aumentar o disminuir la velocidad.

La velocidad de maniobras se limita por las fuerzas que se generan en las curvas. En la industria de la aviación de pasajeros se procura que la aceleración lateral se mantenga dentro del rango de una gravedad (1 g).

La aceleración lateral “ a_c ” de un cuerpo que recorre una curva de un radio R, a una velocidad V se expresa de la siguiente manera (Davis, Johnson, Stepanek & Fogarty, 2008):

$$a_c = V^2/R \quad (\text{Ec. 4.1})$$

La aceleración normal “ a_n ” es la suma vectorial de la aceleración de la gravedad y la gravedad lateral, de acuerdo con la Figura 108):

$$a_n = [(a_c)^2 + g^2]^{0.5} \quad (\text{Ec. 4.2.})$$

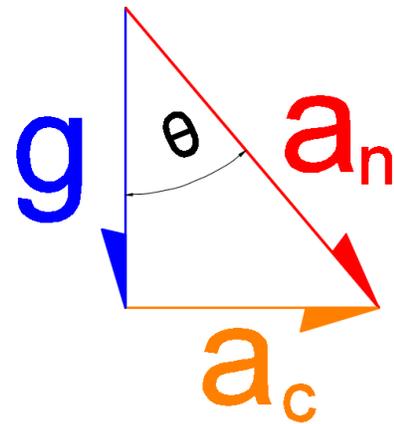
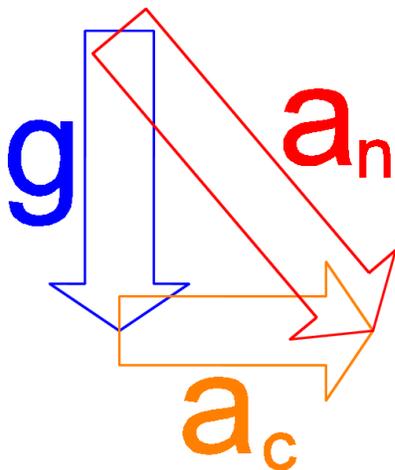
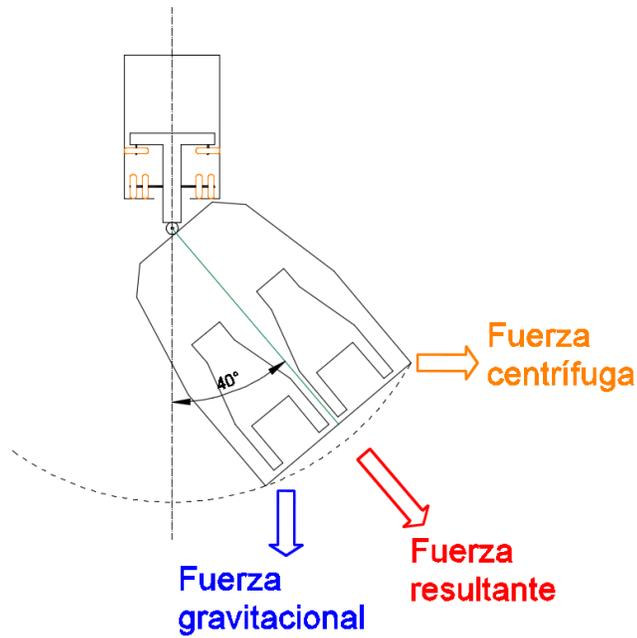


Figura 108. Fuerzas que actúan sobre los vehículos al transitar por curvas.

Se procura que la aceleración normal no exceda dos veces la aceleración de la gravedad terrestre. Se tienen, entonces, los límites dentro de los cuales se puede elegir una velocidad de maniobra y los radios mínimos de las curvas en la vía:

$$v_{\text{máx}} = 60\text{Km/h} \quad a \leq 0.5g \quad a_c \leq 1g \quad a_n \leq 2g \quad \Theta_{\text{max}} = 40^\circ \quad \tan \Theta = a_c/g$$

El ángulo de inclinación de los vehículos se calcula como:

$$\Theta = \arctg(v^2/Rg) \quad (\text{Ec. 4.3.})$$

Con base en la Ecuación 4.3, se calculan las fuerzas que actúan sobre los pasajeros al transitar por curvas de varios radios y a diferentes velocidades.

Cuadro 14. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 6 metros de radio.

Velocidad (Km/h)	Velocidad (m/s)	Radio de curva (m)	Ángulo de inclinación (grados)	Aceleración lateral (m/s ²)	Aceleración lateral (g)	Aceleración normal (m/s ²)	Aceleración normal (g's)
10	2.78	6	7.47	1.29	0.13	9.89	1.01
15	4.17	6	16.43	2.89	0.29	10.23	1.04
20	5.56	6	27.67	5.14	0.52	11.08	1.13
25	6.94	6	39.33	8.04	0.82	12.68	1.29
30	8.33	6	49.72	11.57	1.18	15.17	1.55
35	9.72	6	58.09	15.75	1.61	18.56	1.89
40	11.11	6	64.51	20.58	2.10	22.80	2.32
45	12.50	6	69.36	26.04	2.65	27.83	2.84
50	13.89	6	73.03	32.15	3.28	33.61	3.43
55	15.28	6	75.85	38.90	3.97	40.12	4.09
60	16.67	6	78.04	46.30	4.72	47.32	4.82

Se puede observar que, con radios de curvatura de 6 m, la inclinación de los vehículos es mayor de 40°, aún a 25 Km/hora; a 30 Km/h la aceleración lateral es mayor a 1 g y a 40 Km/h la aceleración normal es mayor a 2 g. No se puede usar ese radio de curvatura con velocidades mayores a 20Km/h.

Cuadro 15. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 12 metros de radio.

Velocidad (Km/h)	Velocidad (m/s)	Radio de curva (m)	Ángulo de inclinación (grados)	Aceleración lateral (m/s ²)	Aceleración lateral (g's)	Aceleración normal (m/s ²)	Aceleración normal (g's)	Tiempo para recorrer semicírculo (seg)	Tiempo para recorrer cuarto de círculo (seg)
10	2.78	12	3.75	0.64	0.07	9.83	1.00	13.57	6.79
15	4.17	12	8.39	1.45	0.15	9.92	1.01	9.05	4.52
20	5.56	12	14.69	2.57	0.26	10.14	1.03	6.79	3.39
25	6.94	12	22.28	4.02	0.41	10.60	1.08	5.43	2.71
30	8.33	12	30.54	5.79	0.59	11.39	1.16	4.52	2.26
35	9.72	12	38.76	7.88	0.80	12.58	1.28	3.88	1.94
40	11.11	12	46.36	10.29	1.05	14.22	1.45	3.39	1.70
45	12.50	12	53.01	13.02	1.33	16.30	1.66	3.02	1.51
50	13.89	12	58.61	16.08	1.64	18.83	1.92	2.71	1.36
55	15.28	12	63.24	19.45	1.98	21.78	2.22	2.47	1.23
60	16.67	12	67.03	23.15	2.36	25.14	2.56	2.26	1.13

Con radios de curvatura de 12 metros, se puede circular a 30 Km/hora, con una inclinación lateral del vehículo de 30.54°, aceleración lateral de 0.59 g y una aceleración normal de 1.16 g. La exposición a

la aceleración lateral a 30 Km/hora es de corta duración, de 4.52 segundos para viajar un semicírculo (180°) y de 2.26 segundos para un giro de 90°.

Entonces, se escoge 30 Km/hora como velocidad de maniobra por las siguientes razones:

- Permite viajar en curvas de radio pequeño de hasta 12 metros, que pueden acomodarse en la mayoría de las intersecciones de la ciudad de San José.
- Los pasajeros reciben aceleraciones muy tolerables durante las maniobras de cambio de dirección.
- Es un submúltiplo de la velocidad de crucero de 60 Km/hora y permite calcular los tiempos de viaje como de 0.5 Km/minuto.

Realizando cálculos sucesivos para diferentes radios de curvatura, se determina que, a la velocidad de crucero de 60 Km/hora se pueden tomar curvas desde un radio mínimo de 35 metros, como se puede observar en los datos del siguiente cuadro:

Cuadro 16. Fuerzas actuantes sobre los pasajeros en curvas de 35 metros de radio.

Velocidad (Km/h)	Velocidad (m/s)	Radio de curva (m)	Ángulo de inclinación (grados)	Aceleración lateral (m/s ²)	Aceleración lateral (g's)	Aceleración normal (m/s ²)	Aceleración normal (g's)	Tiempo para recorrer semicírculo (seg)	Tiempo para recorrer cuarto de círculo (seg)
10	2.78	35	1.29	0.22	0.02	9.81	1.00	39.58	19.79
15	4.17	35	2.89	0.50	0.05	9.82	1.00	26.39	13.19
20	5.56	35	5.14	0.88	0.09	9.85	1.00	19.79	9.90
25	6.94	35	8.00	1.38	0.14	9.91	1.01	15.83	7.92
30	8.33	35	11.43	1.98	0.20	10.01	1.02	13.19	6.60
35	9.72	35	15.39	2.70	0.28	10.17	1.04	11.31	5.65
40	11.11	35	19.78	3.53	0.36	10.42	1.06	9.90	4.95
45	12.50	35	24.47	4.46	0.46	10.78	1.10	8.80	4.40
50	13.89	35	29.33	5.51	0.56	11.25	1.15	7.92	3.96
55	15.28	35	34.21	6.67	0.68	11.86	1.21	7.20	3.60
60	16.67	35	38.97	7.94	0.81	12.62	1.29	6.60	3.30

Con curvas de 35 metros de radio, las aceleraciones y el ángulo de inclinación de los vehículos se mantienen dentro de los límites enunciados al inicio, con una inclinación lateral del vehículo de 38.97°, aceleración lateral de 0.81 g y una aceleración normal de 1.29 g. La exposición a la aceleración lateral a 60 Km/hora es de corta duración, de 6.60 segundos para viajar un semicírculo y de 3.30 segundos para un giro de 90°.

4.2.3. Separación entre los vehículos

Como se mencionó en el apartado 2.1.3. y se verá a continuación, el intervalo de tiempo entre vehículos sucesivos y la separación física entre ellos es determinante para calcular la capacidad de un tramo de vía.

Primero se analiza el control de la separación mínima posible entre vehículos del sistema PRT, ¿qué es lo que determina esa separación? Lo determina la capacidad que tienen los vehículos de reaccionar ante las acciones de frenado del vehículo que tienen al frente.

Si dos vehículos circulan primero a la misma velocidad V_1 y al que marcha adelante se le aplica una desaceleración “a”, durante un tiempo “t”, el vehículo delantero pasará a tener una velocidad V_2 , menor que la inicial V_1 . El vehículo de atrás percibirá un retroceso aparente “R” del vehículo frontal con respecto a la posición relativa inicial.

$$H = \frac{L+S}{V} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En la ecuación 2.1., el intervalo H es una medida de tiempo que, si se multiplica por la velocidad V, se obtiene una cantidad que se llamará “D”, por “distancia”, que es la representación física de H:

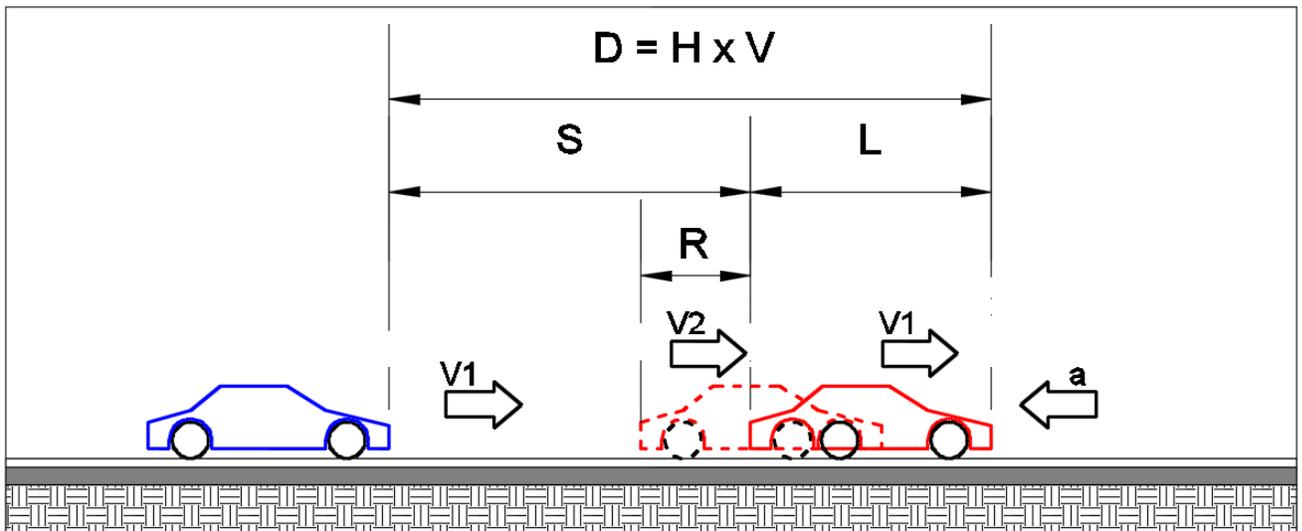


Figura 109. Disminución de la distancia intervehicular cuando desacelera el vehículo frontal.

Si el retroceso R es igual o mayor a la separación inicial S, el vehículo trasero colisionará al del frente, por lo tanto, se establece que:

$$S \geq R$$

El retroceso R es igual al avance del vehículo trasero en el tiempo “t” (x_T), menos el avance del vehículo delantero en el tiempo “t” (x_D).

$$R = x_T - x_D$$

El avance del vehículo trasero x_T antes de aplicar los frenos se obtiene con la Ecuación 2.4, porque no se le aplica ninguna aceleración durante el tiempo “t”:

$$x = x_0 + Vt \quad (\text{Ec. 2.4}) \quad \text{En este caso } x_0 = 0 \quad \text{entonces} \quad x_T = V_1 t$$

El avance del vehículo delantero se calcula con la Ecuación 2.7, porque desacelera al frenar:

$$x = V_1 t - \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$\text{Por lo tanto, } R = V_1 t - (V_1 t - \frac{1}{2} a t^2)$$

$$R = \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

La disminución en la separación de los dos vehículos depende tan sólo del valor de la desaceleración y del tiempo “t” que transcurre antes de que el vehículo trasero aplique también los frenos.

Para un vehículo liviano típico en carretera, el tiempo de reacción + aplicación de frenos es de dos segundos. La capacidad de frenado del vehículo está limitada por la fricción que producen los neumáticos sobre el pavimento, que es de 0.7 g (Irvin, J., 1978) para vehículos sin sistemas de frenado anti-bloqueo (ABS).

En esas condiciones: $a = 0.7 g$ y $t = 2 \text{ seg}$

$$R_{\text{auto}} = 0.5(0.7)(9.81 \text{ m/seg}^2)(2 \text{ seg})^2 = 13.73 \text{ m}$$

La separación de los vehículos en carretera disminuirá en 13.73 m antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.

Se puede calcular la disminución de la distancia intervehicular para vehículos del sistema PRT, en el remoto caso de que algo se atravesara en la vía (improbable por ser un vehículo suspendido) y que frene de emergencia automáticamente; o que sus llantas se traben súbitamente y se frene por la fricción de las llantas inmóviles sobre la vía. Se toma un valor conservador de la velocidad de reacción e inicio del frenado automatizado de $t = 0.20$ segundos (Irvin, J., 1978), (Grover, C., 2008), (Suzuki, H., 2014). Como los vehículos PRT también utilizarán tracción de llantas de caucho sobre la viga, se considera una desaceleración máxima conservadora de $0.7g$ (Irvin, J., 1978), si el vehículo delantero traba sus llantas de improviso por algún desperfecto:

$$R = \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$a = 0.7 g \quad \text{y} \quad t = 0.2 \text{ seg}$$

$$R_{\text{PRT}} = 0.5(0.7)(9.81 \text{ m/seg}^2)(0.2 \text{ seg})^2 = 0.137 \text{ m} \approx 0.14 \text{ m}$$

La separación de los vehículos PRT disminuirá en 0.14 m antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.

El caso anterior es para un frenado de emergencia, en el uso normal de los vehículos PRT se aplicarán aceleraciones y desaceleraciones más cómodas para el usuario, en los rangos de $0.20g$ y $0.5g$.

Se calculó la disminución de la distancia intervehicular para diferentes velocidades de reacción de frenado y para diferentes deceleraciones. Se resalta el resultado para un tiempo de inicio de frenado de 0.20 seg, como actuarían los frenos automáticos de los vehículos PRT y se detallan en los cuadros siguientes:

Cuadro 17. Disminución de distancia intervehicular al frenar el vehículo delantero con deceleraciones de 0.2g, 0.3g y 0.4g, antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.

Tiempo de reacción de frenado	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos
(seg)		(m)		(m)		(m)
2.00	0.2	3.92	0.3	5.89	0.4	7.85
1.50	0.2	2.21	0.3	3.31	0.4	4.41
1.00	0.2	0.98	0.3	1.47	0.4	1.96
0.75	0.2	0.55	0.3	0.83	0.4	1.10
0.50	0.2	0.25	0.3	0.37	0.4	0.49
0.45	0.2	0.20	0.3	0.30	0.4	0.40
0.40	0.2	0.16	0.3	0.24	0.4	0.31
0.35	0.2	0.12	0.3	0.18	0.4	0.24
0.30	0.2	0.09	0.3	0.13	0.4	0.18
0.25	0.2	0.06	0.3	0.09	0.4	0.12
0.20	0.2	0.04	0.3	0.06	0.4	0.08
0.15	0.2	0.02	0.3	0.03	0.4	0.04
0.10	0.2	0.01	0.3	0.01	0.4	0.02

Cuadro 18. Disminución de distancia intervehicular al frenar el vehículo delantero con deceleraciones de 0.5g, 0.6g y 0.7g, antes de que el vehículo trasero aplique los frenos.

Tiempo de reacción de frenado	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos	Deceleración en g's	Disminución de distancia entre vehículos
(seg)		(m)		(m)		(m)
2.00	0.5	9.81	0.6	11.77	0.7	13.73
1.50	0.5	5.52	0.6	6.62	0.7	7.73
1.00	0.5	2.45	0.6	2.94	0.7	3.43
0.75	0.5	1.38	0.6	1.66	0.7	1.93
0.50	0.5	0.61	0.6	0.74	0.7	0.86
0.45	0.5	0.50	0.6	0.60	0.7	0.70
0.40	0.5	0.39	0.6	0.47	0.7	0.55
0.35	0.5	0.30	0.6	0.36	0.7	0.42
0.30	0.5	0.22	0.6	0.26	0.7	0.31
0.25	0.5	0.15	0.6	0.18	0.7	0.21
0.20	0.5	0.10	0.6	0.12	0.7	0.14
0.15	0.5	0.06	0.6	0.07	0.7	0.08
0.10	0.5	0.02	0.6	0.03	0.7	0.03

Como se puede observar en el Cuadro 17 y el Cuadro 18, en las condiciones de operación del sistema PRT, con aceleraciones normales 0.5g y frenado de emergencia de 0.7g, las distancias intervehiculares disminuyen apenas entre 0.10 y 0.14 metros antes de que los vehículos traseros apliquen los frenos, lo que brinda un buen margen de seguridad y control para evitar colisiones.

En conclusión, con modernos sistemas automáticos de frenado, se pueden mantener separaciones intervehiculares muy pequeñas. Con tiempos de reacción de entre 0.5 y 0.2 segundos, se puede usar una separación mínima entre vehículos de 1 metro, como se verá más adelante (Grover, C., 2008), (Irving, J., 1978).

4.2.3.1. Condiciones de seguridad

En el estudio de la Aerospace Corporation, se sugiere dotar a los vehículos PRT de cinturones de seguridad, bolsas de aire, una zona deformable al frente y otra zona muy rígida atrás del vehículo, para proteger a los pasajeros en caso de una colisión (Figura 89). Estos son elementos de seguridad pasiva, para proteger a los pasajeros una vez que ha sucedido una colisión.

Para evitar que suceda una colisión, se recomienda además incorporar elementos de seguridad activa (que evita la ocurrencia de un accidente) en los vehículos PRT:

- Frenos anti-bloqueo (ABS).
- Sistema automático de frenado, para mantener la distancia inter-vehicular; compuesto de detectores de distancia, computadora de control y actuadores automáticos de los frenos.

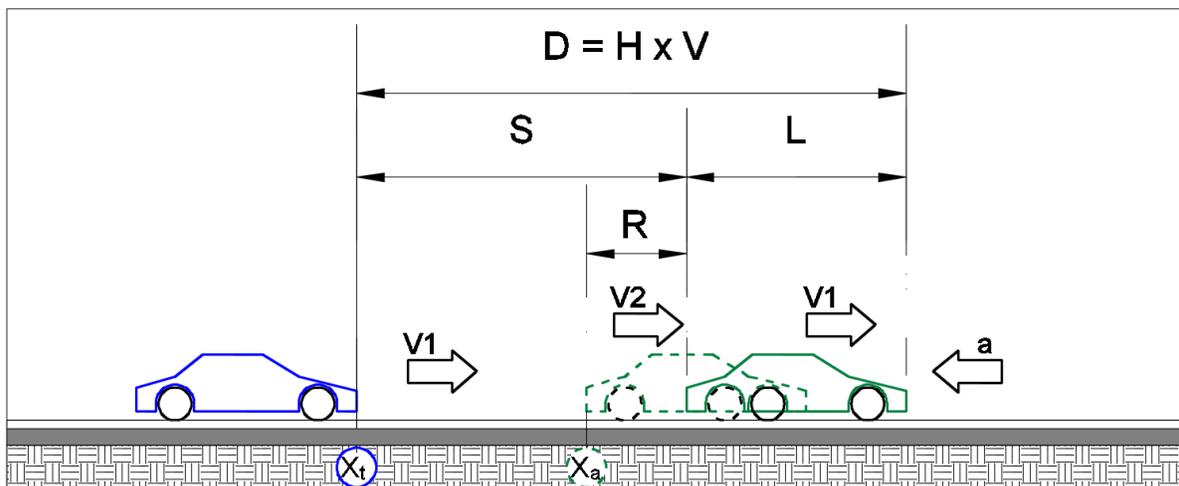


Figura 110. Frenada de emergencia del vehículo frontal.

Existen varios casos de frenada del vehículo frontal:

a. Frenada en operación normal.

Un vehículo frena para realizar una maniobra, con una desaceleración mediana, entre 0.2g y 0.5g. El vehículo que lo sigue por atrás debe frenar lo suficiente para evitar colisionar al vehículo y cuenta con medición de distancia, frenos antibloqueo (ABS) y un rango de desaceleraciones controladas entre 0g y 0.9g. Luego de un tiempo de 0.2 seg, mientras el vehículo trasero activa sus frenos, el vehículo frontal ha tenido un retroceso relativo (Figura 110); entonces el vehículo trasero aplica una desaceleración mayor que la del delantero, vuelve a restablecerse la separación inicial y ambos vehículos continúan su camino.

b. Frenada de emergencia.

Las ruedas de un vehículo se traban en sus ejes y éste continúa avanzando, arrastrado por la vía hasta detenerse; en este caso, se asume la deceleración que generan los neumáticos bloqueados sobre una superficie seca, de 0.7g (Grover, C., 2008), (Irving, J., 1978). El vehículo que lo sigue por atrás debe frenar lo suficiente para evitar colisionar al primer vehículo y cuenta con medición de distancia, frenos antibloqueo y un rango de desaceleraciones controladas entre 0g y 0.9g. Luego de un tiempo de 0.2 seg, mientras el vehículo trasero activa sus frenos, el vehículo frontal ha tenido un retroceso relativo; entonces el vehículo trasero aplica una desaceleración mayor que la del delantero y ambos alcanzan la inmovilidad gradualmente, sin colisionar nunca. De acuerdo con las investigaciones de la Aerospace Corporation, si la aceleración del vehículo trasero es de un 10% a un 15% mayor que la del vehículo delantero, los dos nunca colisionarán (Irving, J., 1978).

Ejemplo: La posición de dos vehículos se determina por los puntos en los que podrían colisionar entre sí (Figura 110), que se llamarán “ x_t ” para el vehículo trasero y “ x_a ” para el delantero. En la figura se ve que ambos vehículos comienzan viajando a una velocidad “ v_1 ”, luego se le aplica una desaceleración “ a_a ” al vehículo delantero y éste pasa a viajar a una velocidad “ v_2 ”.

La desaceleración “ a_a ”, se aplica al vehículo delantero por un tiempo “ t_R ”, antes de que el vehículo trasero frene.

$$v_1 = 60 \text{ kph} = 16.67 \text{ m/s}$$

$$t_R = 0.2 \text{ seg}$$

$$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$$

$$a_a = 0.7g$$

$$H = 0.3 \text{ seg}$$

$$D = H * v_1$$

$$L = 4 \text{ m}$$

Al frenar, el vehículo delantero tiene un retroceso “R” relativo al vehículo anterior, que se calcula con la Ecuación 4.4.

$$R = \frac{1}{2} a t_R^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$R = (0.5) * (0.7 * 9.81) * (0.2)^2$$

$$R = 0.137 \text{ m} \approx 0.14 \text{ m}$$

En ese momento, la velocidad del vehículo delantero es v_2 :

$$v_2 = v_1 - a_a t_R \quad (\text{Ec. 2.5})$$

$$v_2 = 16.67 - (0.7) * (9.81) * (0.2) = 15.30 \text{ m/seg}$$

$$v_2 = 15.30 \text{ m/seg}$$

En ese mismo instante, el vehículo trasero también empieza a detenerse y la velocidad de cada uno se calcula con las siguientes fórmulas:

$$v_a = v_2 - a_a t$$

$$v_t = v_1 - a_t t$$

Cuando el vehículo delantero se detiene, $v_a = 0$

$$v_a = v_2 - a_a t = 0$$

$$t = v_2 / a_a = (15.30) / (0.7 * 9.81)$$

$$t = 2.23 \text{ seg}$$

La distancia que recorre el vehículo delantero antes de detenerse es:

$$x_a = x_{a0} + v_2 t - \frac{1}{2} a_a t^2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

De acuerdo con la Figura 110:

$$x_{a0} = D - L - R$$

$$x_{a0} = (H*V) - L - R$$

$$x_a = (H*V) - L - R + v_2 t - \frac{1}{2} a_a t^2$$

$$x_a = (0.3*16.67) - 4 - 0.14 + (15.30)*(2.23) - (0.5)*(0.7*9.81)*(2.23)^2$$

$x_a = 17.9$ m es la distancia recorrida por el vehículo delantero hasta detenerse.

La desaceleración del vehículo trasero será controlada, con el uso de frenos ABS y por ello puede ser mayor que la del vehículo delantero. Si la desaceleración controlada es de 0.8g, será un 14.3 % más alta que la del vehículo delantero (0.7g).

$$a_t = 0.8g$$

Cuando el vehículo trasero se detiene:

$$V_t = v_0 - a_t t = 0$$

$$t = v_0/a_t = (16.67)/(0.8*9.81)$$

$$t = 2.12 \text{ seg}$$

La distancia que recorre el vehículo trasero antes de detenerse, con ($x_0 = 0$) es:

$$x_t = x_0 + v_1 t - \frac{1}{2} a_t t^2$$

$$x_t = 0 + (16.67)*(2.12) - (0.5)*(0.8*9.81)*(2.12)^2$$

$x_t = 17.7$ m es la distancia recorrida por el vehículo trasero hasta detenerse

$x_t < x_a$ El vehículo trasero nunca embiste al delantero

c. Frenada de emergencia con colisión (caso más crítico).

Cuando en el caso anterior, por cualquier razón el vehículo trasero no puede frenar, la corta distancia entre ellos es una ventaja para impedir lesiones a los pasajeros, pues la colisión sucedería cuando los vehículos van a una velocidad muy similar. Nuevamente se toma referencia de la Figura 110, para describir la situación:

$$V_t = v_1 - a_t t \quad (\text{Ec. 2.5})$$

El vehículo trasero nunca frena, entonces $a_t = 0$

$$V_t = v_1$$

Las condiciones iniciales son:

$$v_1 = 60 \text{ kph} = 16.67 \text{ m/s}$$

$$g = 9.81 \text{ m/seg}^2$$

$$a_a = 0.7g$$

$$H = 0.3 \text{ seg}$$

$$D = H * v_1$$

$$L = 4 \text{ m}$$

$R = 0 \text{ m}$ porque no hay una etapa inicial de retroceso, sino todo el proceso es frenado.

Cuando ambos vehículos colisionan: $x_t = x_a$

$$V_t = V_1$$

$$V_a = V_1 - a_a t$$

$$x_t = x_0 + V_1 t$$

$$x_a = x_{a0} + v_1 t - \frac{1}{2} a_a t^2$$

$$x_0 = 0$$

$$x_{a0} = D - L - R \quad \text{y} \quad R = 0$$

$$x_t = V_1 t$$

$$x_{a0} = D - L$$

$$\text{Entonces} \quad V_1 t = D - L + v_1 t - \frac{1}{2} a_a t^2$$

$$\frac{1}{2} a_a t^2 = D - L$$

$$t = [2*(D - L)/a_a]^{0.5} = [2*(5 - 4)/(0.7*9.81)]^{0.5}$$

$t = 0.54$ seg Es el momento en que los vehículos colisionan.

La velocidad de cada vehículo al tiempo $t = 0.54$ seg es:

$$V_t = V_1 = 16.67 \text{ m/seg}$$

$$V_a = V_1 - a_a t$$

$$V_a = 16.67 - (0.7*9.81)*(0.54)$$

$$V_a = 12.96 \text{ m/seg}$$

La colisión ocurriría a una velocidad relativa igual a la diferencia entre ambas velocidades:

$$V_{\text{relativa}} = V_t - V_a = 16.67 - 12.96$$

$$V_{\text{relativa}} = 3.71 \text{ m/seg} = 13.36 \text{ kph}$$

El choque ocurriría a una velocidad relativa baja de 3.71 m/seg, igual a 13.36 kph, que puede ser manejado fácilmente por los dispositivos de seguridad pasiva: parachoques retráctiles, zonas deformables de la carrocería, zonas indeformables de la carrocería, cinturones de seguridad, bolsas de aire, etc.

4.2.4. Capacidad de la vía continua PRT

Antes de determinar la capacidad de la vía continua del sistema PRT y para efectos de comparación, se calculan primero los parámetros típicos de una carretera:

En una carretera continua, se han medido volúmenes de 2,000 vehículos por hora por cada carril (Transportation Research Board, 2010), que se alcanza a una velocidad de 65 Km/hora.

Basados en las dimensiones mostradas en la Figura 111, se establecen los parámetros a calcular:

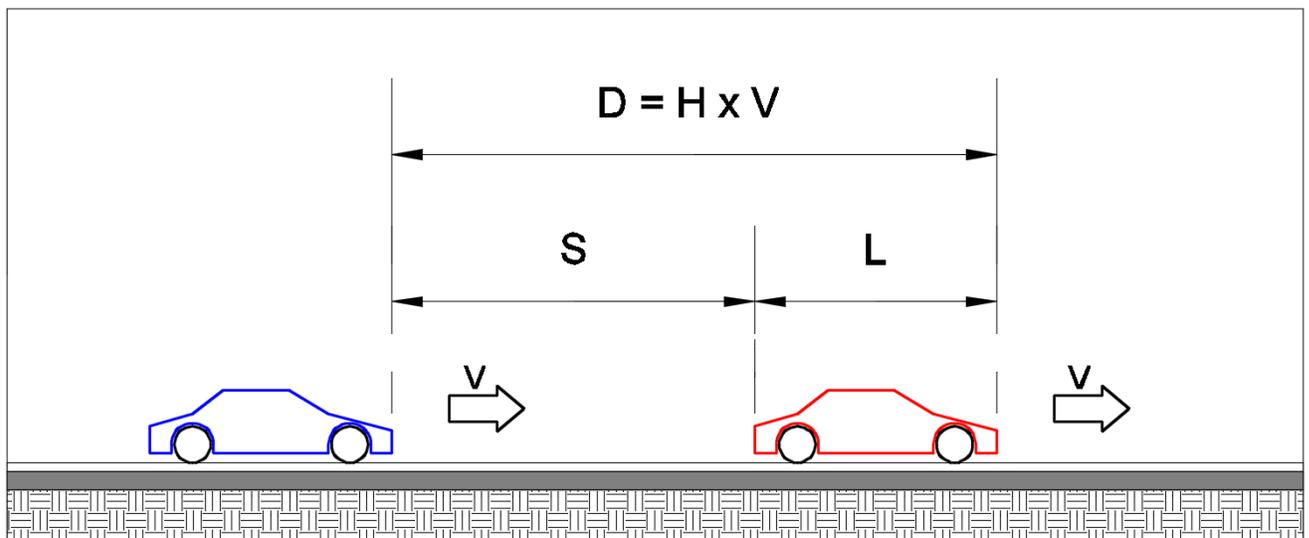


Figura 111. Intervalo de separación entre vehículos.

Con el uso de la Ecuación 2.10, se calcula el intervalo para una carretera continua:

$$Q = \frac{3600}{H} \text{ (seg/hora)} \quad (\text{Ec. 2.2}) \quad \text{Si} \quad Q = 2000 \text{ veh/hora} \quad H = \frac{3600}{Q}$$

$$H = \frac{3600}{2000} \quad H = 1.8 \text{ seg/veh}$$

Donde:

Q es el flujo horario de vehículos

H es el intervalo de tiempo entre vehículos o *Headway*

V es la velocidad de los vehículos

D es la longitud en metros del intervalo de seguimiento H

S es la separación entre los vehículos, en metros

L es la longitud de los vehículos, en metros

El intervalo es de 1.8 segundos. Con la Ecuación 2.1 se calcula la separación entre los vehículos S:

$$H = \frac{L+S}{V} \quad (\text{Ec. 2.1}) \quad \text{entonces} \quad S = H*V - L$$

La velocidad es de $V = 65 \text{ km/hora}$, el intervalo de 1.8 seg y la longitud promedio de los autos es de:

$$L = 5 \text{ m.}$$

$$S = (1.8 \text{ seg})(65\text{Km/hora})(1000 \text{ m/Km})(\text{hora}/3600 \text{ seg}) - 5\text{m} = 27.50 \text{ m}$$

La separación entre vehículos en una carretera a su máxima capacidad es de $S = 27.5 \text{ m}$

Como se puede inferir de la Ecuación 2.2, cuanto menor sea el intervalo, mayor será la capacidad de la vía.

Para cada combinación de intervalo, velocidad y longitud de vehículo, hay una capacidad de la vía asociada. En el sistema PRT, en la sección 4.1.1. se definió que la longitud estimada de los vehículos será de 4 m, semejante a un auto compacto.

Se procedió a calcular la separación física S entre vehículos de 4 m de longitud para diferentes velocidades e intervalos, que se ven en los cuadros siguientes:

Cuadro 19. Separación entre vehículos de 4 m para diferentes velocidades e intervalos de entre 3 y 0.75 seg.

V (Km/h)	Intervalo (H) de 3 seg		Intervalo (H) de 1.8 seg		Intervalo (H) de 1 seg		Intervalo (H) de 0.75 seg	
	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)
10	8.33	4.33	5.00	1	-	-	-	-
20	16.67	12.67	10.00	6	5.56	1.56	4.17	0.17
30	25.00	21.00	15.00	10	8.33	4.33	6.25	2.25
40	33.33	29.33	20.00	15	11.11	7.11	8.33	4.33
50	41.67	37.67	25.00	20	13.89	9.89	10.42	6.42
60	50.00	46.00	30.00	25	16.67	12.67	12.50	8.50
65	54.17	50.17	32.50	28	18.06	14.06	13.54	9.54
70	58.33	54.33	35.00	30	19.44	15.44	14.58	10.58
80	66.67	62.67	40.00	35	22.22	18.22	16.67	12.67
90	75.00	71.00	45.00	40	25.00	21.00	18.75	14.75
100	83.33	79.33	50.00	45	27.78	23.78	20.83	16.83

Cuadro 20. Intervalo de seguimiento y separación entre vehículos de 4 m para diferentes velocidades e intervalos entre 0.6 y 0.3 seg.

V (Km/h)	Intervalo (H) de 0.60 seg		Intervalo (H) de 0.50 seg		Intervalo (H) de 0.40 seg		Intervalo (H) de 0.30 seg	
	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)	D (m)	S (m)
10								
20	3.33	-0.67						
30	5.00	1.00	4.17	0.17	3.33	-0.67		
40	6.67	2.67	5.56	1.56	4.44	0.44	3.33	-0.67
50	8.33	4.33	6.94	2.94	5.56	1.56	4.17	0.17
60	10.00	6.00	8.33	4.33	6.67	2.67	5.00	1.00
65	0.00	-4.00	9.03	5.03	7.22	3.22	23.47	19.47
70	11.67	7.67	9.72	5.72	7.78	3.78	5.83	1.83
80	13.33	9.33	11.11	7.11	8.89	4.89	6.67	2.67
90	15.00	11.00	12.50	8.50	10.00	6.00	7.50	3.50
100	16.67	12.67	13.89	9.89	11.11	7.11	8.33	4.33

En los cuadros se puede observar que a velocidades bajas no se pueden definir intervalos pequeños, porque resultan aún menores a los 4 metros de longitud del vehículo.

Se resaltan los resultados para las velocidades de 30 y 60 Km/hora, las dos velocidades de operación propuestas para el sistema PRT. Se propone una velocidad de 30 Km/hora en las rampas de maniobra para cambiar de dirección y al aproximarse a las estaciones, porque permite transitar por curvas y cambios de nivel sin incomodar a los pasajeros y, además, requiere menores distancias de frenado en las estaciones. La velocidad de cruce por la viga principal se propone en 60 Km/hora porque es lo que manejan actualmente los sistemas de monorraíl grupal existentes con ruedas de caucho, no requiere el desarrollo de mecanismos especiales y permite el uso de equipos de tecnología probada desde los años 70, como los sistemas SIPEM y monorraíles de Chiba y Shonan.

Para el tránsito en la vía principal, con vehículos de 4 metros, viajando a 60 Km/hora, usando la Ecuación 2.2, se puede calcular la capacidad para diferentes intervalos:

$$Q = \frac{3600 \text{ (seg/hora)}}{H \text{ (seg/veh)}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

Q es el flujo horario de vehículos, en vehículos/hora

H es el intervalo de tiempo entre vehículos o *Headway*, definido en la Figura 110, en seg/veh

Sin embargo, el sistema PRT debe observar algunas previsiones que no son necesarias para el tránsito en carretera (Irvin, J., 1978):

- a. **Vehículos vacíos.** Dentro de la corriente de tráfico en la hora de mayor demanda de transporte (Hora Pico), circulan vehículos con pasajeros que se dirigen a su destino y también vehículos vacíos que regresan a recoger nuevos pasajeros a las estaciones que originan los viajes, después de llevar pasajeros hacia las estaciones de destino. Los vehículos ocupados tendrán mayor prioridad para viajar por las vías expresas que los vehículos vacíos, que pueden tomar desvíos por rutas menos directas, como los dirigirán los computadores que gobiernen el sistema. Se estiman los vehículos vacíos en un 10 % del total y la fracción de vehículos ocupados será de $f = 0.9$, que se aplica como factor a la capacidad de la vía.
- b. **Espacios para que los vehículos ingresen a la vía.** Cuando los vehículos en su ruta deben cambiar de vía y sumarse a otra, necesitan encontrar un espacio al que puedan ingresar. En el cálculo de capacidad se debe reservar un porcentaje para permitir la convergencia de corrientes de tráfico, que se estima inicialmente en un 20%. Los computadores que controlen el sistema pueden estimar la densidad de tráfico de cada vía y desviar vehículos por otras vías para evitar la sobrecarga de algún ramal. Se disminuye la capacidad teórica de la vía, para permitir las convergencias de flujos de tránsito, aplicando a la capacidad de la vía un factor de densidad $D = 0.80$.

La Ecuación 2.2:

$$Q = \frac{3600}{H} \text{ (seg/hora)} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$H \text{ (seg/veh)}$$

se modifica para incluir los factores mencionados y queda así:

$$Q = \frac{3600 * D * f}{H} \text{ (seg/hora)} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$H \text{ (seg/veh)}$$

$$Q = \frac{3600 * 0.8 * 0.9}{H} \text{ (seg/hora)} = \frac{2592}{H} \text{ (veh/hora)}$$

Tomando en cuenta todas las modificaciones y usando la Ecuación 4.5, se calcula la capacidad de la vía del sistema PRT con diferentes intervalos, para una velocidad de cruce de 60 Km/hora.

Con la ecuación 2.1 se calcula la separación entre los vehículos

$$H = \frac{L+S}{V} \quad (\text{Ec. 2.1}) \quad \text{entonces} \quad S = H * V - L$$

$$\text{Si } D = H * V \quad \text{entonces} \quad S = D - L$$

Para efectos de comparación, se incluye el cálculo de capacidad de un carril de carretera, mediante la Ecuación 2.2. Los humanos no pueden mantener intervalos de seguimiento pequeños, por eso el mínimo considerado es de 1.80 segundos.

Los datos obtenidos se resumen en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Capacidad de la vía a 60 Km/hora para diferentes intervalos de separación (H).

Intervalo de separación (H)	Distancia (D)	Volumen de carril de autos (Ecuación 2.2)	Separación intervehicular para autos de 5 m de longitud (S)	Volumen de vía PRT (Ecuación 4.5)	Separación intervehicular para PRT de 4 m de longitud (S)
(seg)	(m)	(Veh/hora)	(m)	(Veh/hora)	(m)
3.00	50.00	1200	45.00	864	46.00
1.80	30.00	2000	25.00	1440	26.00
1.00	16.67	-	-	2592	12.67
0.75	12.50	-	-	3456	8.50
0.60	10.00	-	-	4320	6.00
0.50	8.33	-	-	5184	4.33
0.40	6.67	-	-	6480	2.67
0.30	5.00	-	-	8640	1.00

Es notorio que, con intervalos apenas menores a los que pueden mantener los autos conducidos por humanos, la vía PRT supera la capacidad de un carril continuo de carretera.

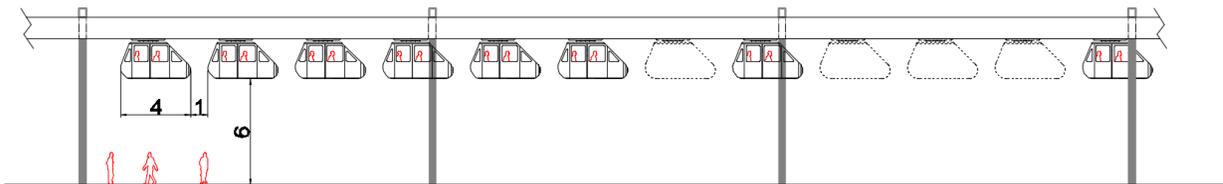


Figura 112. Línea de vehículos a 60 Km/h, con un intervalo $H = 0.3$ seg.; con espacios libres para convergencias y vehículos vacíos.

Con un intervalo de 0.30 seg, a 60 Km/hora, una sola vía PRT tiene una capacidad mayor a la de una carretera de cuatro carriles y, como se vio anteriormente, con sistemas de control y frenado automáticos será posible mantener esos intervalos.

Para obtener la mayor capacidad de la vía, se utilizará:

- Un intervalo de 0.30 segundos con velocidad de crucero de 60 Km/hora.
- Un intervalo de 0.60 segundos con velocidad de maniobra de 30 Km/hora.

En ambos casos, la distancia de separación entre vehículos es de 1 metro.

Cuadro 22. Capacidad de las vías del sistema PRT.

Velocidad	Intervalo H	Intervalo D	Volumen de PRT	Separación intervehicular con PRT de 4 m
(Km/hora)	(seg)	(m)	(Veh/hora)	(m)
30	0.60	5.00	4,320	1.00
60	0.30	5.00	8,640	1.00

4.2.5. Capacidad de las estaciones PRT

El tiempo de salida y llegada de los pasajeros en las estaciones permiten determinar su capacidad, que se mediría en llegadas y salidas de vehículos por hora.

En estaciones Tipo 1, que se encuentran a nivel de la calle y en las de Tipo 3, que se encuentran elevadas a 6 metros, los pasajeros llegan a su ritmo, esperan en una fila y abordan el vehículo que se detiene en el andén.

Los tiempos de ingreso y egreso de los vehículos se basan en mediciones realizadas para estudiar el efecto del envejecimiento en la movilidad de la población de los países desarrollados (Ait El Menceur, 2006), (Crizzle, A., 2014) y de experimentación propia con personas de la tercera edad.

En la hora pico, al llegar un vehículo ocupado a la estación, éste se detiene, abre la puerta y permite que el pasajero descienda. Los tiempos de entrada y salida de un vehículo se estiman como sigue:

Tiempo de egreso del vehículo: 12 seg.

Luego, ingresa un pasajero que espera su turno.

Tiempo de ingreso al vehículo: 18 seg.

Duración de la maniobra: 30 segundos.

El vehículo cierra la puerta y se pone en marcha. Con estos tiempos de abordaje/desabordaje, se calcula la capacidad de generar viajes en cada andén:

$3600 \text{ (seg/hora)} * (\text{maniobra}/30 \text{ seg}) = 120 \text{ (viajes/hora)}$ por cada andén individual.

En las estaciones Tipo 2, donde la cabina del vehículo será descendida hasta el nivel del suelo, se debe considerar una demora adicional por el procedimiento de descenso y elevación de la cabina.

El proceso de entrada y salida de los vehículos es igual para las tres estaciones:

Tiempo de ascenso y descenso de las cabinas:

Se acostumbra limitar la aceleración vertical de los elevadores a un rango cómodo para el usuario, de entre 1 m/s^2 y 1.5 m/s^2 ; con un promedio simplificado a una octava parte de la aceleración de la gravedad ó 1.23 m/s^2 .

Para comodidad de usuario, en la primera parte del ascenso, se varía la aceleración desde cero hasta el valor máximo, en un plazo de 2 segundos. Se utiliza la Ecuación 2.8

$$a = Jt_j \quad (\text{Ec. 2.8}), \text{ donde:}$$

a = aceleración en m/s^2

J = variación de la aceleración en m/s^3

t_j = tiempo de aplicación de la variación de la aceleración

g = aceleración de la gravedad terrestre (9.81 m/s^2)

$$t_j = 2 \text{ seg} \quad a = \frac{1}{8} g \quad \text{entonces} \quad J = \frac{1}{8} g \frac{1}{2} \quad g = 9.81 \text{m/s}^2$$

$$J = 0.61 \text{ m/seg}^3$$

La velocidad que ya ha logrado el ascensor a los 2 segundos se calcula con la Ecuación 2.9

$$V = V_0 + \frac{1}{2} J t_j^2 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$V_0 = 0 \quad \text{entonces} \quad V = \frac{1}{2} J t_j^2 = \frac{1}{2} (0.61)(2)^2$$

$$V = 1.22 \text{ m/seg}$$

La posición del ascensor al terminar la variación de la aceleración se determina con la Ecuación 2.10

$$y_1 = y_0 + V_0 t_j + \frac{1}{6} J t_j^3 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$y_0 = 0 \quad V_0 = 0 \quad y_1 = \frac{1}{6} J t_j^3 = \frac{1}{6} (0.61)(2)^3 = 0.81$$

$$y_1 = 0.81 \text{ m}$$

Después de los 2 segundos iniciales, la aceleración se mantiene constante.

El resto del recorrido es de 6 m, menos la distancia recorrida en los primeros 2 segundos:

Se plantea la Ecuación 2.7 para averiguar el resto del tiempo de elevación

$$y = y_1 + V t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$6 = 0.81 + (1.22) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{8} (9.81) \cdot t^2$$

Resolviendo la ecuación, se obtiene el valor $t = 2.08 \text{ seg}$

El tiempo total de elevación es de 2 segundos iniciales, más 2.08 segundos,

entonces $T_{\text{elev}} = 4.08 \text{ seg}$.

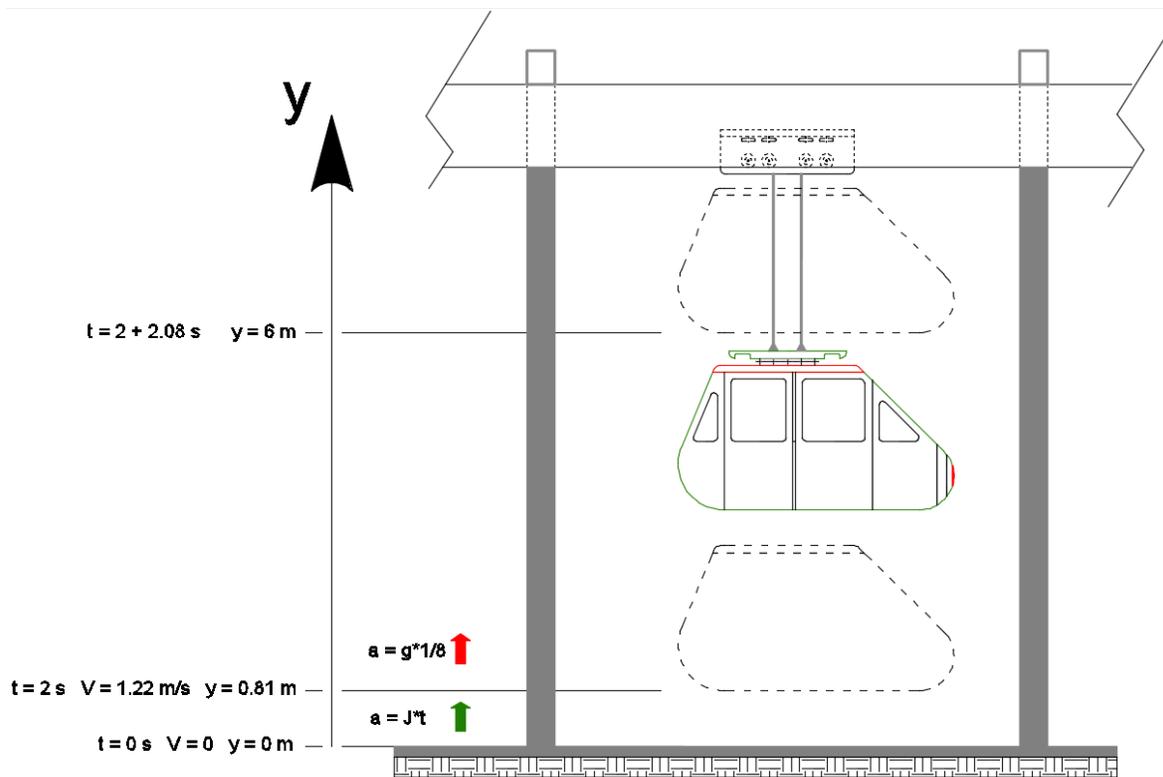


Figura 113. Tiempo de elevación de la cabina.

Para tener un mayor margen, se redondea el tiempo de elevación a 5 segundos y se asume que el tiempo de descenso será igual.

Los tiempos de ingreso y egreso de los vehículos se basan en mediciones realizadas para estudiar el efecto del envejecimiento en la movilidad de la población de los países desarrollados (Ait El Menceur, 2006), (Crizzle, A., 2014) y de experimentación propia con personas de la tercera edad. El tiempo para realizar las maniobras de abordaje/desabordaje, en las estaciones de Tipo 2, se calcula así:

Tiempo de descenso de la cabina desde 6 metros: 5 seg.

Tiempo de egreso del vehículo: 12 seg.

Luego, ingresa un pasajero que espera su turno.

Tiempo de ingreso al vehículo: 18 seg.

Tiempo de elevación de la cabina a 6 metros: 5 segundos

Duración de la maniobra: 40 segundos

$3600 \text{ (seg/hora)} * (\text{maniobra}/40 \text{ seg}) = 90 \text{ (viajes/hora)}$ por cada andén individual.

Cuando se conoce el número de viajes por hora y la capacidad de cada tipo de estación, se estima la cantidad de andenes necesarios en cada estación; por ejemplo:

En una estación de tipo 2, sin edificación y con elevador de cabinas, si el número de viajes es menor a 90 viajes por hora, se requiere un solo andén; entre 90 y hasta 180 viajes por hora se requieren 2 andenes y así sucesivamente.

Se ha determinado así la capacidad de los componentes críticos del sistema. El número de andenes en las estaciones y el número de vías en cada ramal será determinado por la demanda.

4.2.5.1. Acceso a las estaciones

La llegada de los vehículos desde las líneas de velocidad de cruce hasta las estaciones debe realizarse de forma gradual:

- Reducir la velocidad desde los 60 Km/h en la línea principal, hasta 30 Km/h para ingresar a la línea secundaria.
- Realizar los giros y maniobras necesarios para llegar a la estación.
- Frenar desde 30 Km/h hasta detenerse completamente en el andén o en el elevador.

Como se mencionó en el apartado **4.2.2. “Comodidad de los pasajeros”**, antes de aplicar una aceleración o desaceleración se realizará una transición de dos segundos durante los cuales se varía la aceleración desde 0 a su valor máximo de $0.5 g$ (4.905 m/s^2), que se analiza de acuerdo con las ecuaciones del apartado 2.2.3 (Movimiento rectilíneo con variación de la aceleración).

Las mayores longitudes de transición serán necesarias entre las mayores diferencias de velocidad:

- c. De 0 a 30 Km/h.
- d. De 30 a 60 Km/h.
- e. De 0 a 60 Km/h.
- f. De 60 a 0 Km/h.
- g. De 60 a 30 Km/h.
- h. De 30 a 0 Km/h.

Durante los primeros 2 segundos de la transición habrá una variación de aceleración, conocida como “*Jerk*”, desde 0 hasta el valor máximo de $0.5 g$ (4.905 m/s^2). De ese punto en adelante, se aplica la aceleración constante.

En las tablas siguientes se resumen los tiempos necesarios y las distancias recorridas durante las transiciones de velocidad, para diferentes tiempos de *Jerk*. Se resaltan los resultados para una transición de 2 segundos, porque es la más suave para el pasajero.

Cuadro 23. Distancias de aceleración de 0 a 30 Km/hora.

Aceleración desde 0 Km/hora a 30 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de aceleración
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
g/2	1	4.905	0	30	2.45	0.82	1.20	6.47	7.28
g/2	1.5	3.270	0	30	3.68	1.84	0.95	5.70	7.54
g/2	2	2.453	0	30	4.91	3.27	0.70	4.63	7.90

Cuadro 24. Distancias de aceleración de 30 Km/hora a 60 Km/hora.

Aceleración desde 30 Km/hora a 60 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de aceleración
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
g/2	1	4.905	30	60	10.79	9.15	1.20	16.46	25.61
g/2	1.5	3.270	30	60	12.01	14.34	0.95	13.61	27.95
g/2	2	2.453	30	60	13.24	19.94	0.70	10.45	30.39

Cuadro 25. Distancias de aceleración de 0 a 60 Km/hora.

Aceleración desde 0 Km/hora a 60 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de aceleración
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
g/2	1	4.905	0	60	2.45	0.82	2.90	27.70	28.52
g/2	1.5	3.270	0	60	3.68	1.84	2.65	26.94	28.78
g/2	2	2.453	0	60	4.91	3.27	2.40	25.86	29.13

Para un cambio de aceleración de desde 0 hasta el valor máximo de 0.5 g (4.905 m/s²) en dos segundos:

Las rampas para acelerar desde 0 a 30 Km/h deben tener una longitud de 8 metros.

Las rampas para acelerar desde 30 a 60 Km/h deben tener una longitud de 31 metros.

Las rampas para acelerar desde 0 a 60 Km/h deben tener una longitud de 30 metros.

El frenado exige más longitud de rampas, porque durante la transición de la aceleración se recorren distancias mayores:

Cuadro 26. Distancias de frenado de 60 Km/hora a 0.

Frenado desde 60 Km/hora a 0 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de frenado
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
-g/2	1	-4.905	60	0	14.21	15.85	2.90	20.60	36.44
-g/2	1.5	-3.270	60	0	12.99	23.16	2.65	17.20	40.36
-g/2	2	-2.453	60	0	11.76	30.06	2.40	14.10	44.16

Cuadro 27. Distancias de frenado de 60 Km/hora a 30 Km/hora.

Frenado desde 60 Km/hora a 30 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de frenado
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
-g/2	1	-4.905	60	30	14.21	15.85	1.20	13.52	29.37
-g/2	1.5	-3.270	60	30	12.99	23.16	0.95	10.12	33.28
-g/2	2	-2.453	60	30	11.76	30.06	0.70	7.02	37.09

Cuadro 28. Distancias de frenado de 30 Km/hora a 0.

Frenado desde 30 Km/hora a 0 Km/hora									
Aceleración máxima	Tiempo de Jerk	Cambio de aceleración (Jerk)	Velocidad inicial	Velocidad final	Velocidad luego de Jerk	Distancia luego de Jerk	Tiempo en aceleración máxima	Distancia en aceleración máxima	Distancia total de frenado
(m/s ²)	(seg)	(m/s ³)	(Km/h)	(Km/h)	(m/seg)	(m)	(seg)	(m)	(m)
-g/2	1	-4.905	30	0	5.88	7.52	1.20	3.53	11.04
-g/2	1.5	-3.270	30	0	4.65	10.66	0.95	2.21	12.87
-g/2	2	-2.453	30	0	3.43	13.40	0.70	1.20	14.59

Para un cambio de la desaceleración de desde 0 hasta el valor máximo de 0.5 g (4.905 m/s²) en dos segundos:

Las rampas para frenar desde 60 a 0 Km/h deben tener una longitud de 45 metros.

Las rampas para frenar desde 60 a 30 Km/h deben tener una longitud de 38 metros.

Las rampas para frenar desde 30 a 0 Km/h deben tener una longitud de 15 metros.

4.2.5.2. Configuración típica de estaciones

De acuerdo con estas longitudes de frenado, con las limitaciones en radios de giro y velocidades indicadas en el apartado 4.2.2. “Comodidad de los pasajeros”, se pueden configurar las transiciones entre las diferentes vías y también las estaciones.

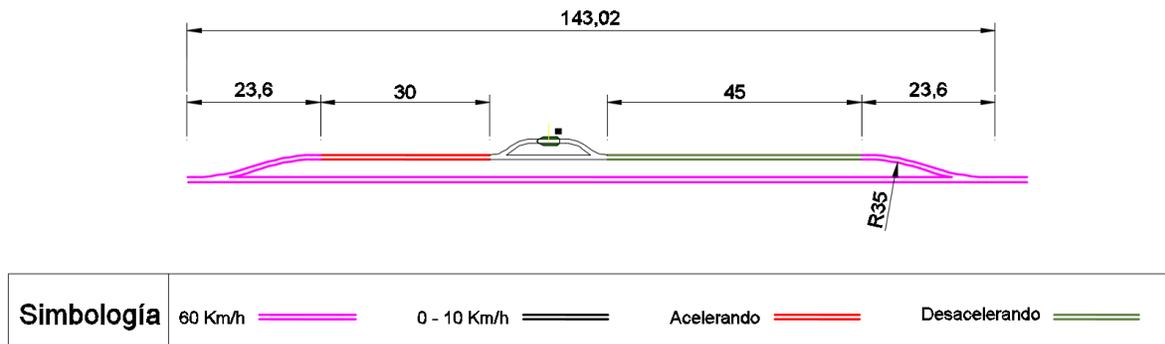


Figura 114. Ejemplo de estación pequeña paralela a la vía principal.

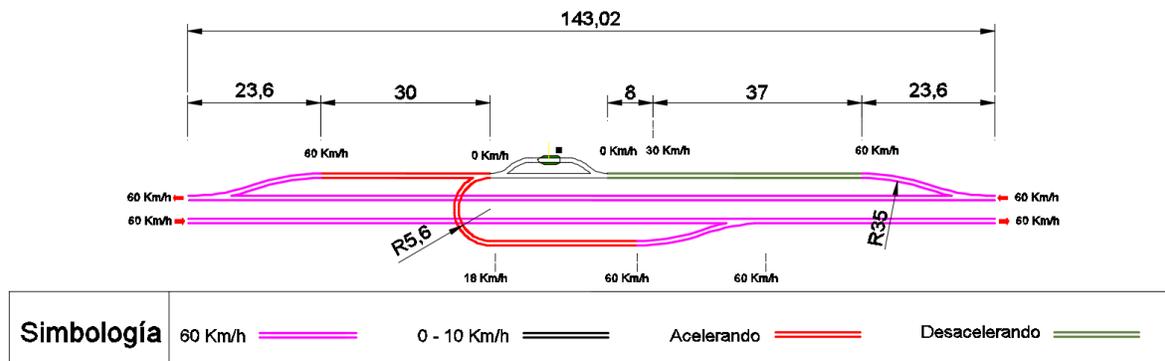


Figura 115. Ejemplo de estación pequeña paralela a la vía principal, con retorno.

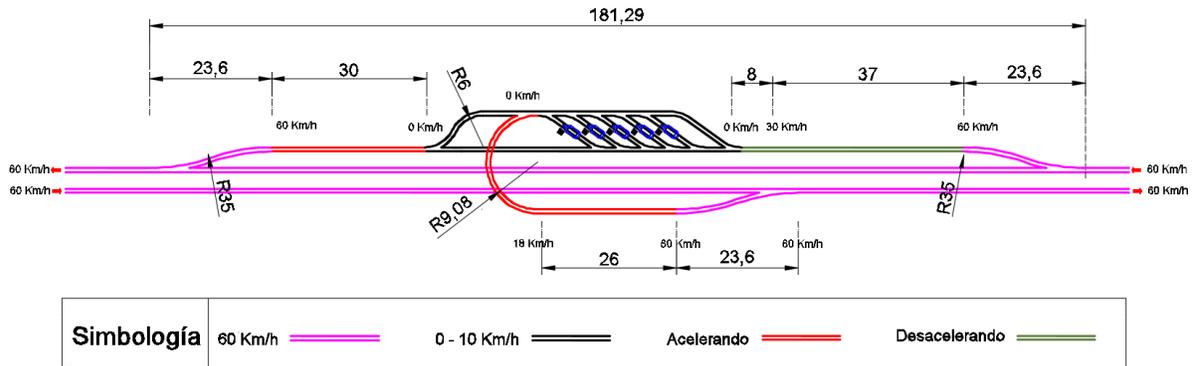


Figura 116. Ejemplo de estación múltiple paralela a la vía principal, con retorno.

Esta última estación de la Figura 116, ocupa mayor espacio en el derecho de vía. Cuando no existe suficiente espacio en la vía principal, se pueden utilizar vías secundarias que ingresen a los barrios y caseríos, adonde se construyen las estaciones necesarias. Las vías secundarias tendrían una velocidad de circulación de 30 Km/hora, para permitir curvas con radio tan pequeños como 12 metros. Los retornos se realizarán a diferente nivel y permiten cambiar de dirección (Ver Figura 117).

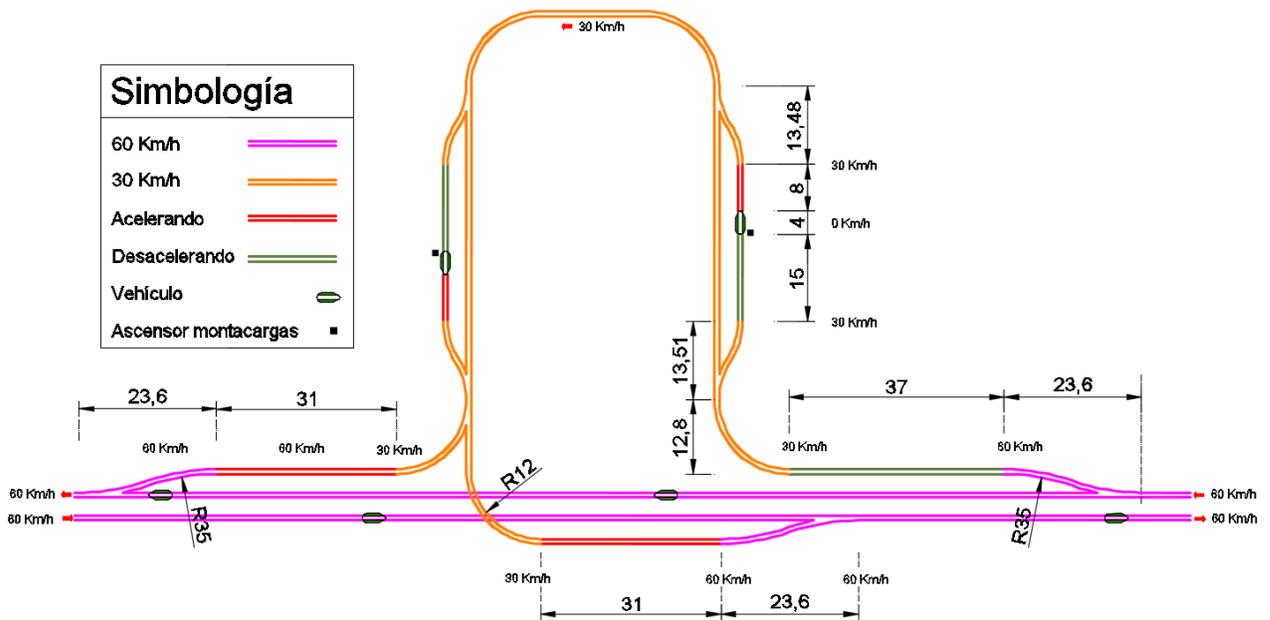


Figura 117. Ejemplo de estación en vía secundaria de 30 Km/h, dentro de barrios, con retorno.

4.2.6. Capacidad teórica del Sistema PRT

En el apartado 4.2.4. “Capacidad de la vía continua PRT”, se determinó su capacidad máxima teórica de transporte en 8,640 vehículos por hora a 60 Km/hora y de 4,320 vehículos/hora para una velocidad de 30 Km/hora (ver Cuadro 22). El aprovechamiento de esa capacidad dependería de si las estaciones son capaces de manejar el volumen de pasajeros necesario; sin embargo, como se mencionó en el apartado 4.2.5., la posibilidad de distribuir las estaciones a lo largo de la línea, y de aumentar o disminuir la capacidad de aquellas, mediante la adición o resta de andenes, permitirá que sean capaces de alimentar la línea, de existir la demanda suficiente de pasajeros. Por esta razón se puede afirmar que la capacidad de las líneas del sistema se puede siempre ajustar a un máximo de 8,640 vehículos por hora a 60 Km/hora y de 4,320 vehículos/hora para una velocidad de 30 Km/hora, con un patrón de viajes conocido y rutinario, que permita ajustar la capacidad de las estaciones. En el apartado 4.9.12.” Crecimiento orgánico y planificado de la red PRT”, se detalla un proceso paulatino de establecimiento del patrón de viajes.

4.2.7. Capacidad teórica de una carretera

La capacidad de una carretera como un sistema depende de la capacidad de sus varios elementos:

- Secciones continuas.
- Intersecciones.
- Rampas.

La máxima capacidad máxima teórica corresponde a la de los tramos continuos, como se vio en el apartado 2.1.3. “Análisis de carreteras” y es de 2,000 Vehículos/hora/carril, de acuerdo con el cálculo presentado en el apartado 4.2.4. “Capacidad de la vía continua PRT”.

Por lo general, las intersecciones tienen menor capacidad que las secciones continuas y se convierten en el elemento más crítico del sistema vial (Cal y Mayor et al, 2007).

Una intersección sin semáforo introduce una demora en los movimientos vehiculares con menos prioridad de paso. Por ejemplo, el movimiento directo y el giro hacia la derecha desde la vía principal no se ven demorados casi nunca, excepto al verse obligado un conductor a ceder el paso a peatones o ciclistas; el giro hacia la izquierda desde la vía principal sí sufre de una demora, porque debe ceder el paso a los vehículos que circulan en el sentido contrario (Cal y Mayor et al, 2007).

Las intersecciones con semáforo disminuyen la capacidad de la vía principal y le introducen una demora para dar paso seguro a los vehículos que transitan por las vías secundarias. Los tiempos de paso a cada movimiento vehicular en la intersección dependen de la magnitud de cada flujo y se calculan por iteración; buscando ejecutar simultáneamente la mayor cantidad de movimientos en el menor tiempo posible, para generar la menor demora a la totalidad de los vehículos de todas las vías que convergen en la intersección.

De acuerdo con los estudios realizados por el Transportation Research Board, la **capacidad máxima teórica** de una vía continua es de 2,000 vehículos/hora/carril (U.S. Department Of Transportation, 2004).

El corredor vial San José-Desamparados tiene secciones de carretera con:

- Dos carriles por sentido desde Plaza González Víquez, hasta la ciudad de Desamparados (Ruta Nacional 209). Existe semáforo en la mayoría de las intersecciones de este sector. Posee múltiples intersecciones con y sin semáforo, que aumentan la demora al transitarla.
- Un carril por sentido desde la intersección de Avenida 4 y Calle 3 en Desamparados (Centro Comercial Decosure) y hasta más allá del punto final de la red considerada, que termina en el Centro de Atención Integral de urbanización La Capri, en San Miguel de Desamparados. También existen semáforos en este tramo, especialmente del tipo peatonal. Actualmente presenta grandes demoras por el uso de semáforos peatonales descoordinados y un alto número de vehículos pesados.

La máxima capacidad teórica de estas carreteras se ve disminuida por la sucesión de intersecciones semaforizadas. Su capacidad real no puede ser mayor a aquella de la intersección en su trazado con menor capacidad:

- Sección Plaza González Víquez-Desamparados (Ruta Nacional 209).

Máx. teórico = 2 carriles por sentido * (2,000 vehículos/Carril/hora) = 4,000 vehículos/hora

En realidad, su capacidad disminuye a aproximadamente 1,026 vehículos/hora, en hora pico (Grant, M., 2019).

- Sección Decosure-La Capri.

Máx. teórico = 1 carril por sentido * (2,000 vehículos/Carril/hora) = 2,000 vehículos/hora

Su capacidad real se sitúa en, aproximadamente, 639 vehículos/hora por sentido, en hora pico (Fallas, J., 2018).

4.2.8. Comparación entre la capacidad de una carretera y el sistema PRT

Para comparar el sistema PRT con una carretera, en desempeño y en costo (ver apartado 4.6.3. “*Costo de construcción de una carretera*”), **se supone la construcción de una nueva carretera** entre San José y Desamparados, por las zonas donde se propone la instalación del sistema PRT.

En un apartado anterior se vio que la capacidad máxima teórica de una carretera continua es de 2,000 vehículos/carril/hora.

La vía PRT contará con una capacidad máxima teórica calculada en el apartado 4.2.4. “**Capacidad de la vía continua PRT**” de 8,640 vehículos/hora/vía.

$$8,640/2,000 = 4.32 \approx 4$$

De acuerdo con su capacidad máxima teórica, una sola vía PRT puede llevar el equivalente a una carretera continua de 4 carriles por sentido.

4.3. Trazado del sistema PRT

La vía propuesta serviría parte de los distritos de San Miguel, Gravilias, Desamparados, San Sebastián, San Francisco de Dos Ríos, Zapote, Catedral, Hospital, Carmen y Merced, en los cantones de Desamparados y San José.

La mayor parte del trazado es de líneas expresas a 60 Km/hora, que coincide con las rutas nacionales N° 206 y 209.

En el derecho de vía existente se instalaría una viga para cada sentido de circulación, más los desvíos necesarios para desacelerar, cambiar de dirección o llegar a una parada, que consisten en segmentos de vía paralelos a la principal, con velocidades de maniobra de 30 Km/hora.

En los sistemas de transporte público masivo por autobús, se establecen paradas a distancias tan cortas que no desanimen a los usuarios y tan largas que permitan una operación rápida de los autobuses. En Costa Rica, se acostumbra crear paradas a cada 400 ó 600 metros, para que los usuarios deban caminar un máximo de 300 metros para llegar a la parada más cercana. En un estudio de distancias que los usuarios caminan en San José, desde su casa hacia la parada de autobús, se determinó una media de 310 metros (Rodríguez-González, M., 2017). Para el sistema PRT, que busca aumentar la comodidad de los pasajeros y atraer a los usuarios de vehículo privado, se propone colocar las paradas a cada 400 m, para que los usuarios deban caminar un máximo de 200 hacia la parada más próxima.

Para acercar el servicio a los usuarios y tener más espacio de instalar las paradas, se usan los ramales secundarios dentro de los barrios.

En la Figura 118 se muestran dos kilómetros de vía. Las líneas verticales verdes marcan la ubicación de estaciones de diferente tipo cada 400 metros. Las líneas verticales rojas indican estaciones con retorno, separadas a 1.2 Km.

Aplicando este modelo a la red de calles entre Desamparados y San José, se plantea una vía principal, para viajar a 60 Km/hora por las carreteras nacionales N° 206 y 209 (Figura 119). Desde esa vía parten vías secundarias en las que se viajará a 30 Km/hora, que ingresan a algunos barrios para crear paradas y retornos. Se han supuesto paradas del Tipo 2, sin edificación y con un elevador, para tener más flexibilidad en caso de ser necesaria su reubicación. Se ubicaron las paradas a una distancia promedio de 400 metros una de otra. Los retornos se establecieron a una distancia promedio de un kilómetro.

La zona de influencia del proyecto se extiende a 200 metros a cada lado del trazado de las líneas del sistema PRT, que es la distancia que un usuario estaría dispuesto a caminar para llegar a la estación.

La línea principal se dividió para desviarla alrededor de la zona cercana a la Rotonda de la I Griega y evitar el tener que superar el paso a desnivel existente, elevando mucho la vía; también se dividió el recorrido de la línea principal en el centro de las ciudades debido a la estrechez de las calles.

Dentro de las ciudades de Desamparados y San José, se proponen líneas secundarias distribuidoras con paradas. En San José, esas líneas secundarias acercarían a los pasajeros a los hospitales San Juan de Dios y Calderón Guardia; a la Corte Suprema de Justicia, a las estaciones de tren del Atlántico y Eléctrico al Pacífico (ver Figura 120).

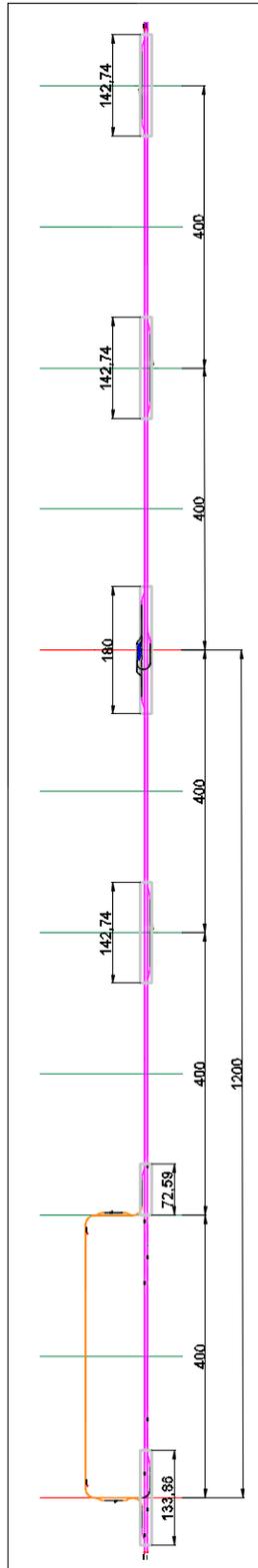


Figura 118. Disposición típica de vía con estaciones.

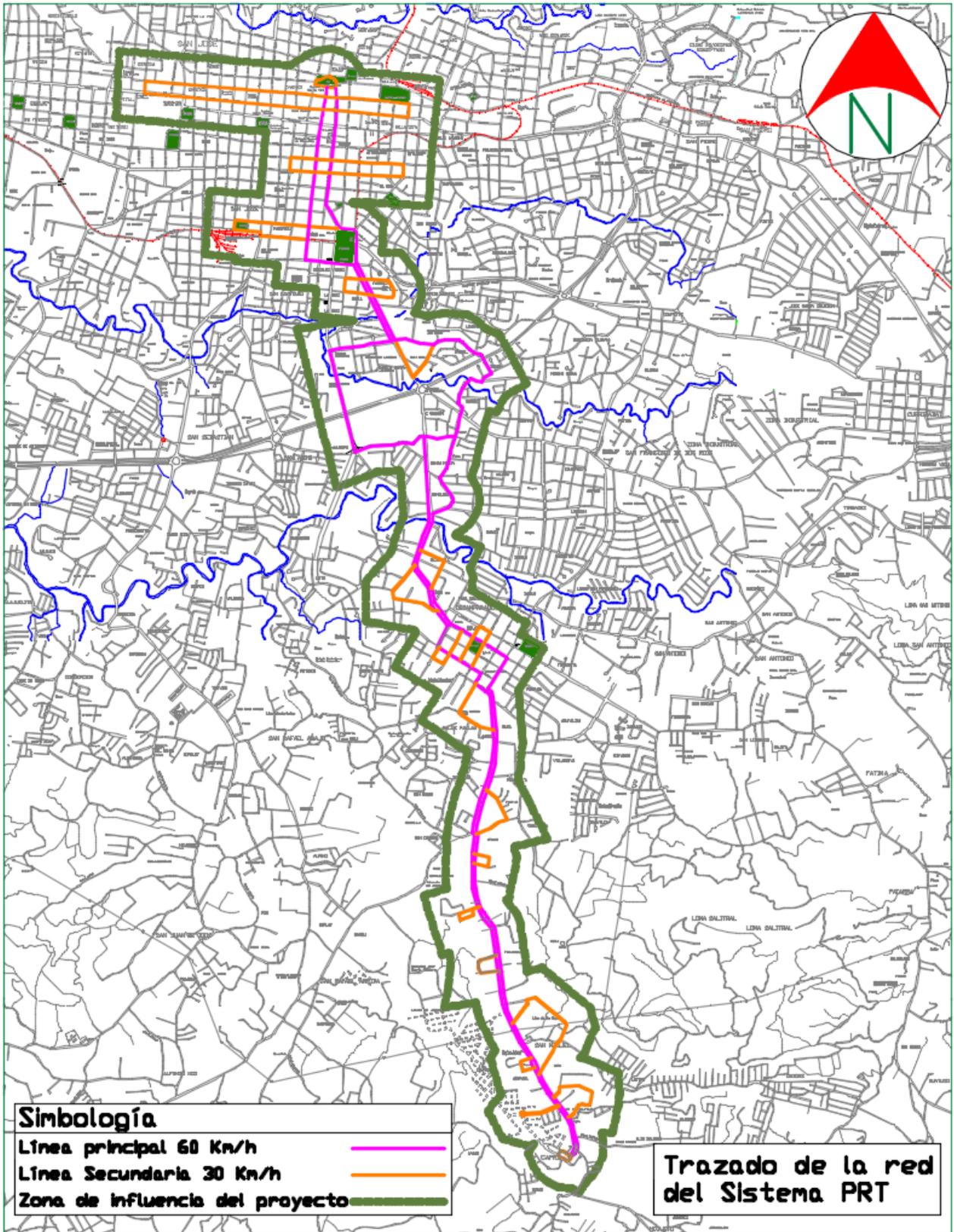


Figura 119. Trazado de la Red PRT San José – Desamparados.

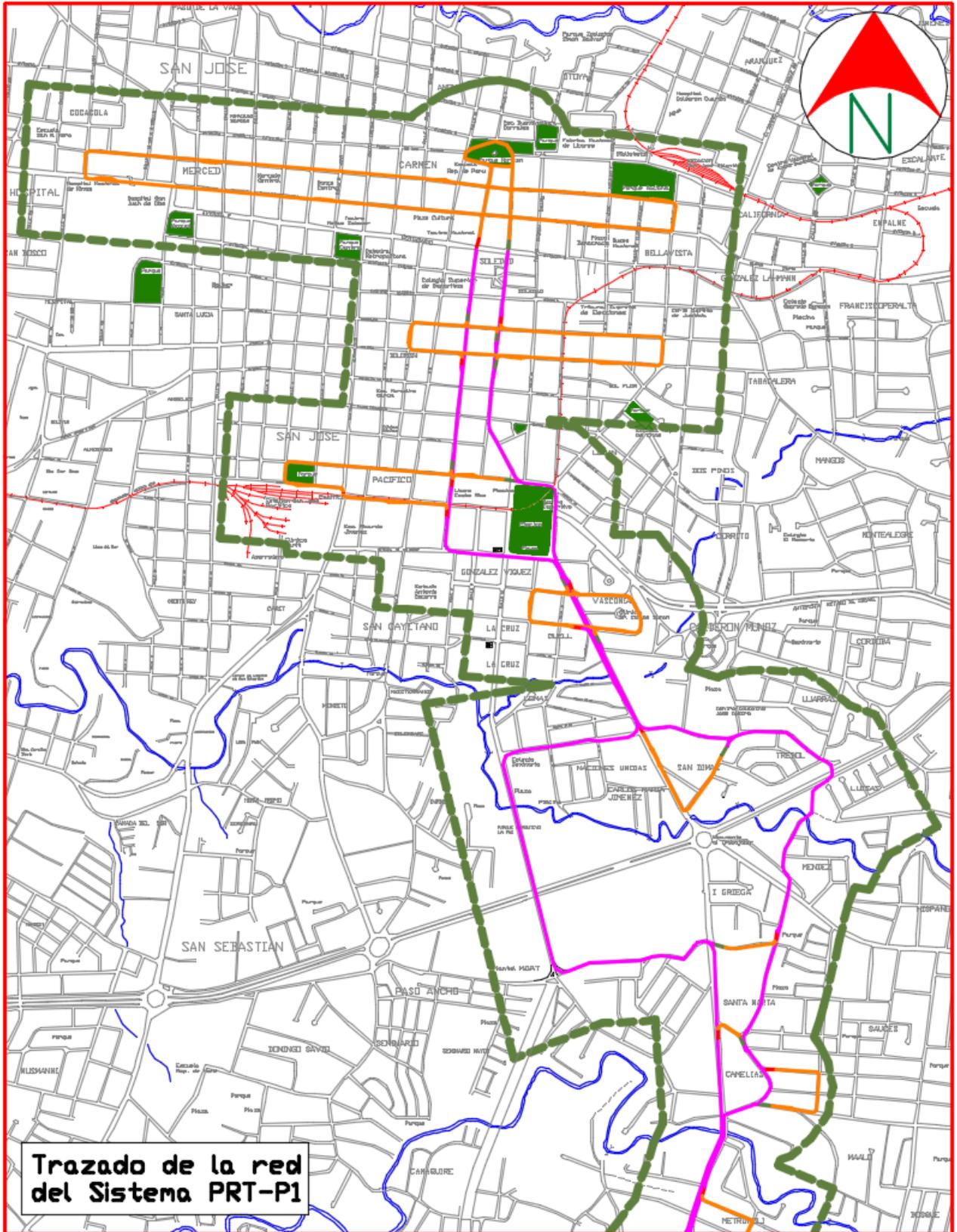


Figura 120. Sección 1 de la Red PRT San José – Desamparados.

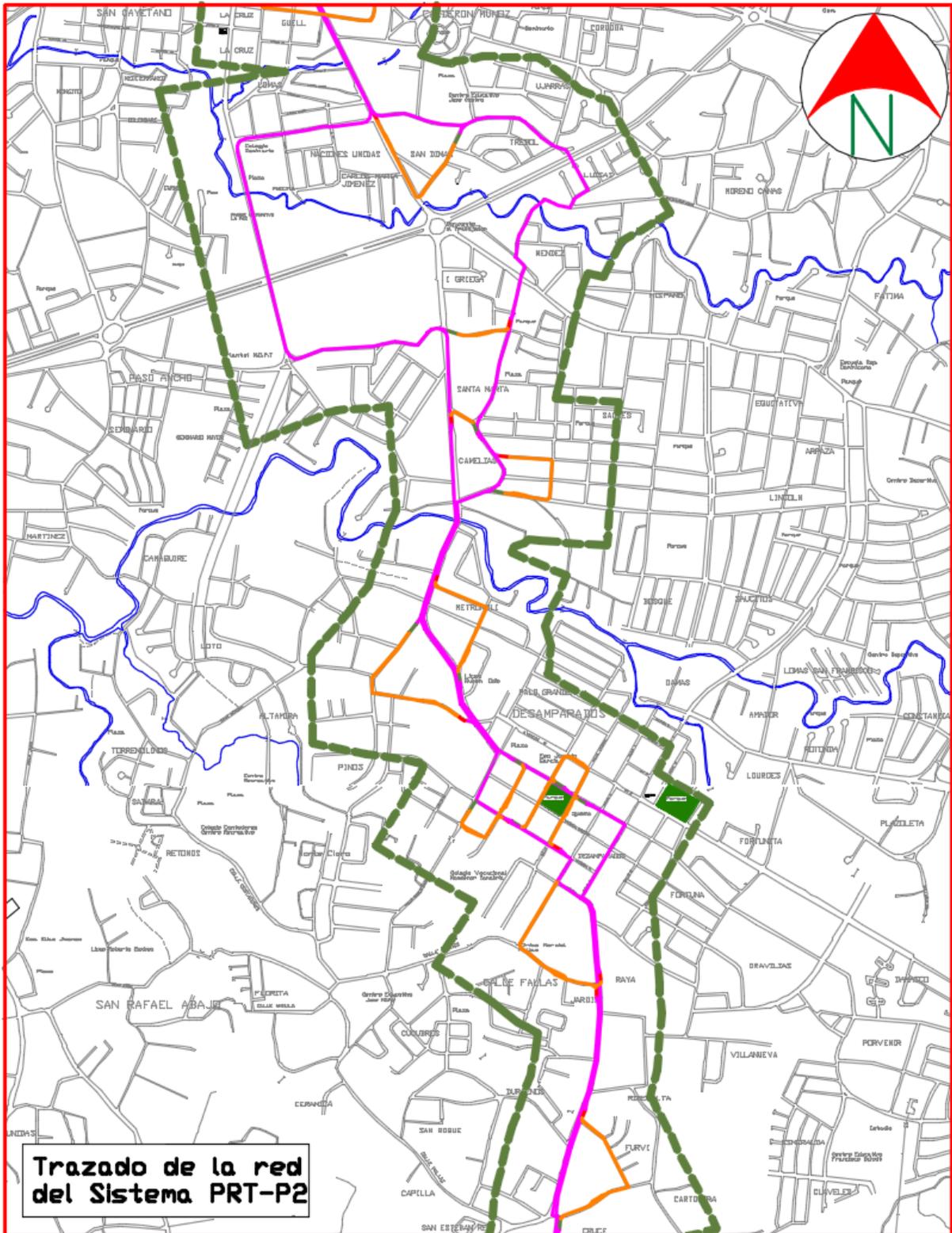


Figura 121. Sección 2 de la Red PRT San José – Desamparados.

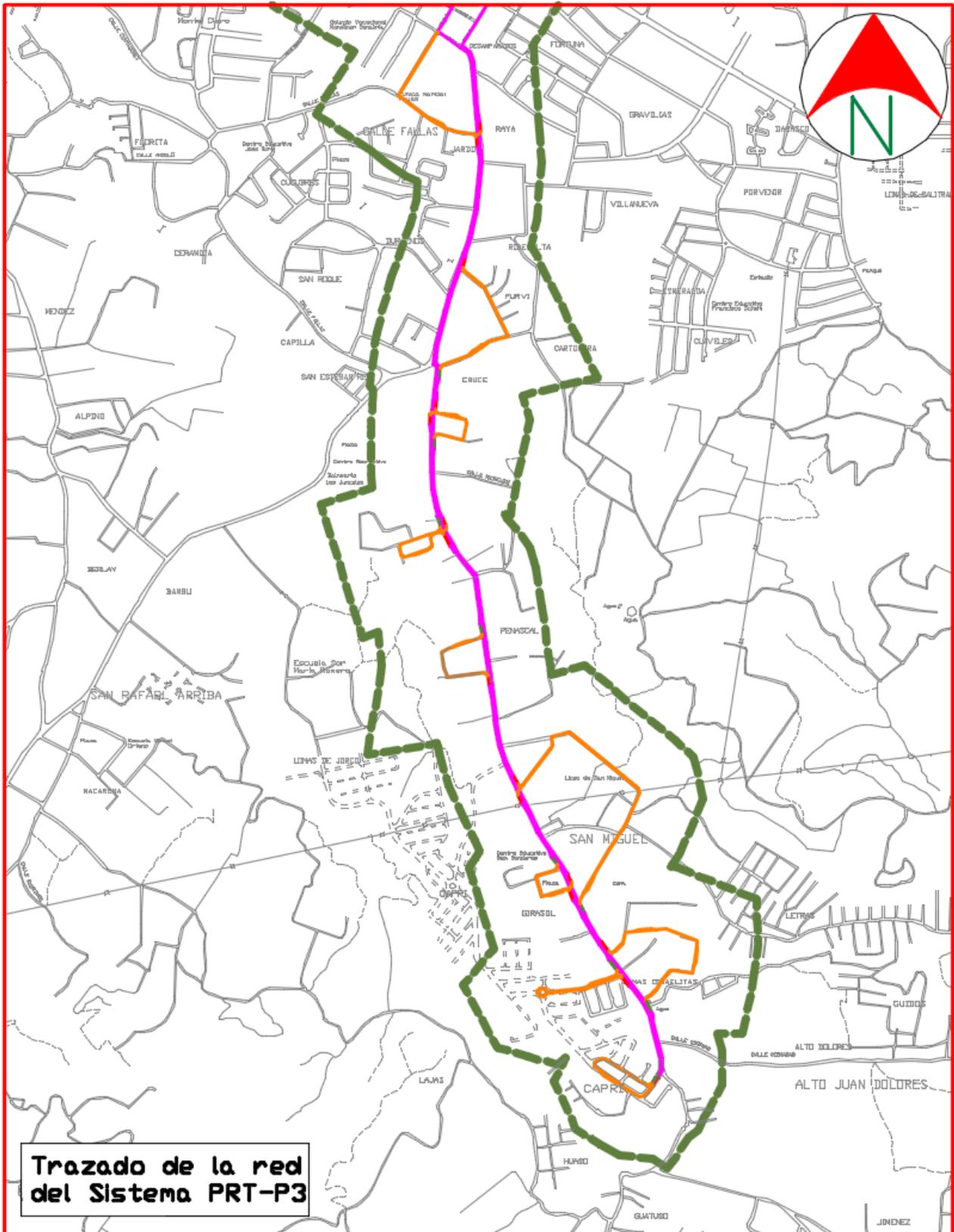


Figura 122. Sección 3 de la Red PRT San José – Desamparados.

4.4. Mercado de usuarios potenciales del Sistema PRT

El objetivo de este sistema PRT es ofrecer una mejor alternativa de viaje a los conductores de vehículo privado que se ven obligados a conducir a muy baja velocidad por calles congestionadas y manteniendo una concentración constante durante todo el viaje.

No todos los conductores se sumarán a este servicio, sino una porción de los que actualmente viajan en automóvil y autobús, entre las zonas que serán servidas por el sistema.

4.4.1. Matriz de generación de viajes (Matriz Origen-Destino)

Dentro del “Programa de Renovación Urbana para la Gran Área Metropolitana” (PRUGAM), se realizó un estudio de tránsito para mejorar el transporte público, que incluyó mediciones de la generación de viajes entre las diferentes zonas de la GAM, mediante una encuesta de hogares (LCR Logística, 2007). Se hizo distinción entre los modos de viaje por transporte público y por vehículo privado, y se realizaron proyecciones de volúmenes de viajes para varios años, desde el 2007 hasta el 2035.

El estudio determinó zonas homogéneas de generación y atracción de viajes; más de 400 zonas, en las que se determinó cuántos viajes parten hacia cada una de las otras zonas. Con esta información se generó una matriz de viajes llamada “Matriz Origen-Destino”.

Estos viajes se calculan para la hora punta de la mañana, cuando el pico de tránsito es más alto y sucede en menos tiempo que durante la tarde-noche.

Para este estudio se escogieron 25 zonas que serían atravesadas por la red PRT y se obtuvo una matriz Origen-Destino de 25x25 entradas.

La ubicación de las zonas en el terreno se observa en el mapa de la siguiente Figura 124:

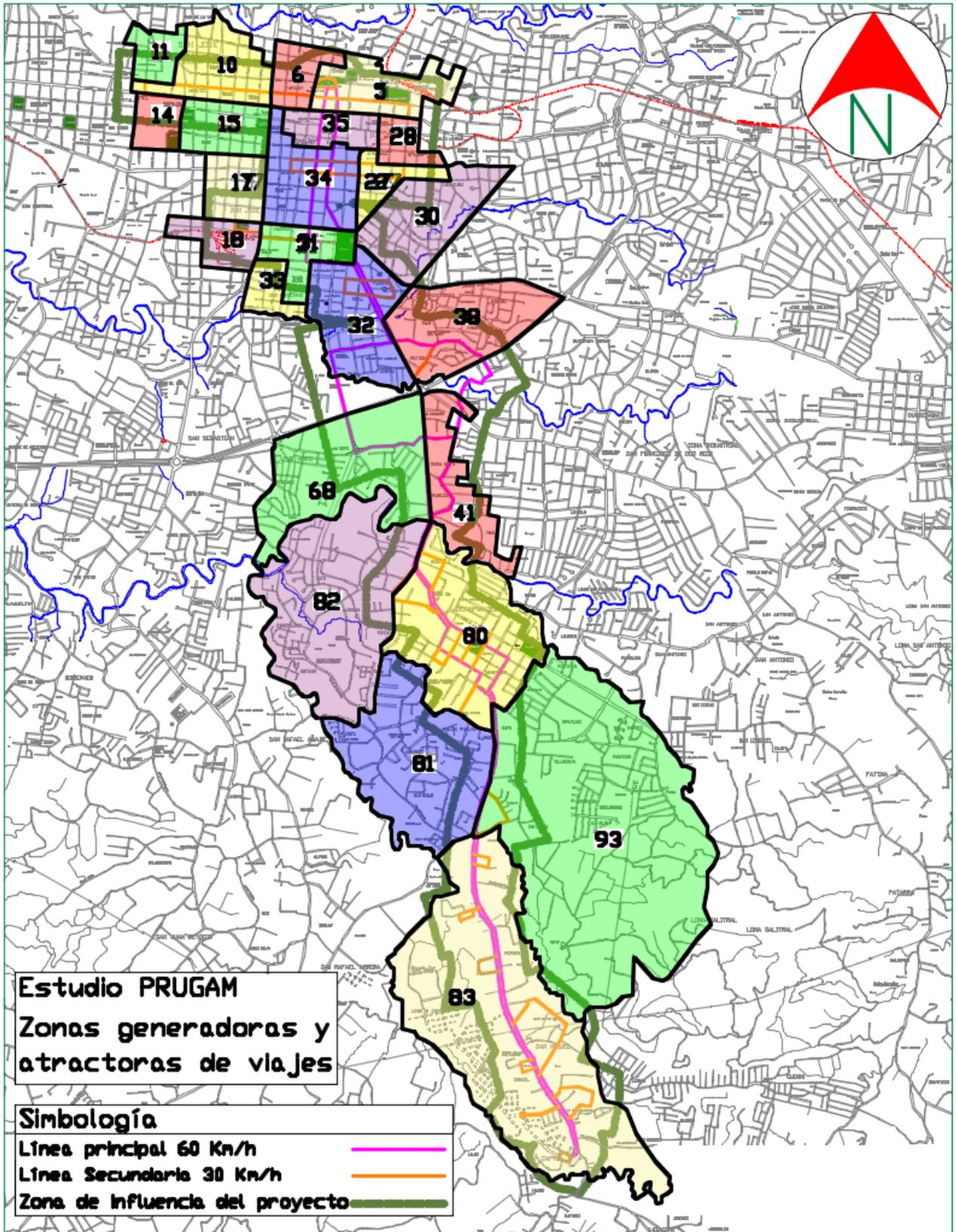


Figura 124. Zonas generadoras y atractoras de viajes.

La Dirección de Planificación Sectorial del MOPT facilitó los datos de las 25 zonas seleccionadas en la Matriz Origen/Destino del PRUGAM para el año 2017, separadas en modos de transporte: Una matriz para viajes en modo automóvil y la otra para los viajes en el modo Bus.

Cuadro 29. Personas viajando en automóvil entre zonas seleccionadas de Desamparados y San José, 2017.

Matriz de viajes en Automovil 2017 PRUGAM. Zonas seleccionadas de Desamparados-San José																												
Zona Destino de Viaje																												
Zona Origen de Viaje	O/D	5	6	10	11	14	15	17	18	27	28	30	31	32	33	34	35	38	41	68	80	81	82	83	93	94		
	5	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	6	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	10	0	8	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
	11	1	3	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	15	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	17	0	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
	18	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	27	1	5	4	0	2	7	1	0	0	0	0	0	2	0	0	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
	28	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	31	3	2	1	0	1	6	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	27
	32	7	2	1	0	1	6	3	0	3	5	1	0	0	0	23	3	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	58
	33	3	3	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	7	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	20
	34	1	5	1	0	7	21	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	40
	35	0	2	0	0	1	5	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	38	16	22	19	0	13	38	2	1	7	17	0	21	4	1	27	29	0	0	9	6	1	1	0	0	0	0	234
	41	1	3	2	0	2	13	0	0	0	1	0	5	10	0	1	0	3	0	0	25	2	2	0	1	0	0	71
	68	11	1	1	0	2	7	1	0	1	4	0	0	0	1	6	3	19	0	0	10	1	0	0	1	0	0	69
	80	16	40	35	0	27	81	4	2	5	21	0	20	19	1	31	31	11	7	40	0	11	10	6	7	0	425	
	81	18	41	43	1	18	65	3	2	4	27	0	18	14	1	28	38	8	6	26	238	0	16	15	2	1	633	
	82	4	9	12	0	4	1	0	1	7	0	4	9	0	3	2	2	10	0	0	27	0	1	22	0	0	118	
	83	6	17	19	0	15	44	0	0	1	4	0	3	4	0	6	4	2	0	9	129	28	7	0	18	12	328	
	93	21	38	45	0	29	107	3	3	4	24	0	20	14	1	31	30	8	8	32	9	1	17	10	0	0	455	
	94	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	190	0	0	192	
	109	209	194	1	122	411	19	9	28	117	1	95	81	5	166	172	59	32	122	418	71	54	32	51	13	2783		

Cuadro 30. Personas viajando en bus entre zonas seleccionadas de Desamparados y San José, 2017.

		Matriz de viajes enBus 2017 PRUGAM. Zonas seleccionadas de Desamparados-San José																									
		Zona Destino de Viaje																									
Zona Origen de Viaje	O/D	5	6	10	11	14	15	17	18	27	28	30	31	32	33	34	35	38	41	68	80	81	82	83	93	94	
	5	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	10	1	0	0	0	4	13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	21
	11	0	1	4	0	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
	14	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	15	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	17	3	5	2	0	7	22	0	1	1	3	0	3	0	0	11	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	62
	18	4	8	9	0	9	23	2	0	2	4	0	5	0	0	9	8	1	0	1	0	1	0	0	0	0	86
	27	1	1	1	0	1	2	0	0	0	3	0	4	0	0	5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	19
	28	0	1	1	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	30	6	16	13	0	11	30	2	0	6	10	0	12	3	0	9	17	6	0	2	3	1	0	0	0	0	147
	31	0	6	6	0	5	10	1	1	1	1	0	0	3	0	10	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	48
	32	2	23	23	0	17	40	0	2	1	15	0	28	0	1	7	30	13	0	15	12	1	0	1	1	0	232
	33	1	8	8	1	7	19	0	1	0	4	0	7	4	0	7	3	1	0	1	2	0	2	0	1	0	77
	34	3	7	7	0	2	0	1	1	2	5	1	5	0	0	0	13	0	0	1	1	0	1	0	0	0	50
	35	1	0	2	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10
	38	0	0	3	0	6	4	0	0	0	1	0	0	7	0	0	3	0	0	0	2	1	0	0	0	0	27
	41	6	15	13	0	8	22	1	1	2	9	0	5	0	1	14	15	3	0	16	11	2	0	2	3	0	149
	68	6	38	36	0	27	74	2	2	3	16	1	37	35	0	23	32	3	6	0	20	3	5	1	1	0	371
	80	1	6	3	0	4	3	0	0	2	1	0	5	1	0	6	6	4	0	0	9	4	3	24	0	0	82
	81	2	11	6	0	19	38	1	1	2	4	0	9	5	0	14	12	7	1	7	0	0	0	3	22	0	164
	82	19	53	50	1	47	114	5	4	10	30	1	35	18	1	59	65	20	0	63	255	1	0	9	3	1	864
	83	22	73	74	1	51	99	5	4	9	41	0	36	26	2	56	53	17	6	38	183	15	10	0	20	0	841
93	4	16	14	0	14	19	2	1	4	12	0	12	8	1	18	27	8	1	7	346	30	0	6	0	1	551	
94	26	69	71	1	54	131	6	5	13	47	2	47	28	2	67	77	16	6	51	252	32	17	18	31	0	1069	
	83	290	280	4	243	538	22	19	47	163	3	204	111	6	254	293	84	14	151	839	65	23	25	76	2	4908	

El total de viajeros en la hora pico de la mañana es de 2,783 en modo automóvil y de 4,908 en modo bus, para un total de 7,691 pasajeros.

De acuerdo con la práctica común, el volumen de tránsito en la hora pico en rutas urbanas representa entre el 8% y el 12% del tránsito total diario, tomándose el promedio de un 10%, según Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras con Enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial (SIECA, 2011).

Con este enfoque, se estima el total de viajeros durante el día

$$7,691 \times 10 = 76,910$$

Viajeros en la zona durante todo el día = 76,910

Y dentro de éstos 76,910 viajeros están los usuarios potenciales del sistema PRT.

Para predecir con más precisión cuántos utilizarían el sistema, hay que primero calcular los costos de construcción, operación y el rango de tarifas posibles; para usar un modelo de distribución modal.

4.5. Tamaño de la flotilla

La cantidad inicial de vehículos necesaria para mantener un servicio se calcula de la siguiente forma:

Para mantener un servicio constante, debe haber un vehículo en espera de ser abordado cuando un pasajero llega a la estación. En la estación puede haber un número de vehículos en espera para satisfacer la demanda proyectada, pero en una estación muy concurrida, es posible que no exista suficiente espacio para almacenar todos los vehículos que se necesitarán durante el periodo de mayor demanda. Entonces, deben traerse vehículos de otros lugares de la red, que estén en almacenamiento o, que ya hayan finalizado un viaje previo y estén listos para llevar a otro pasajero.

Por lo tanto, durante el tiempo que un vehículo se encuentra viajando debe haber un número suficiente de otros vehículos libres para atender nuevos pasajeros. ¿Y cuánto tiempo le toma hacer un viaje a un vehículo? Esto se puede establecer como un promedio para la red:

- Aunque el total de la red es de 14 km, la distancia máxima entre estaciones de la red es de 10,900 metros \approx 11 km.
- La distancia de viaje promedio en la red sería de 5.5 km.
- A una velocidad de crucero de 60 km/hora, se viaja 1 km por minuto. El viaje promedio de ida de 5.5 km tomaría 5.5 minutos y el viaje de regreso tardaría otros 5.5 minutos, para un total de 11 minutos.
- En el apartado 4.2.5. “Capacidad de estaciones”, se determinó que cada andén de una estación del tipo 2 tendría una capacidad de generar un viaje cada 40 segundos, ó 90 viajes por hora. Durante esos 11 minutos que tardaría un vehículo en salir y retornar a la estación, en un viaje promedio, se generarían:

$$(90 \text{ viajes}/60 \text{ minutos}) * 11 \text{ minutos} = 16.5 \approx 17 \text{ viajes}$$

- En la hora de mayor demanda, cada estación deberá disponer de 17 vehículos por andén para tener un flujo ininterrumpido de viajes, que permanecerán allí **o en un depósito cercano**.

Vehículos necesarios = 17 vehículos por andén, esperando un viaje.

Siguiendo el razonamiento anterior, en una red PRT con estaciones del Tipo 2, podemos estimar la cantidad de vehículos necesarios con la Ecuación 4.6:

$$\text{Número de vehículos de la red PRT} = \frac{(90 \text{ viajes}) * (\text{Long. Máx. entre estaciones})}{(60 \text{ min}) \quad (\text{Velocidad de crucero})} * (\text{número de andenes de la red}) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

En la red propuesta de 14 km, de acuerdo con los datos resumidos en el Cuadro 45, se han ubicado un total de 40 andenes y la distancia máxima entre estaciones es de 11 km; en estas condiciones, usando la Ecuación 4.6, se requeriría un máximo de vehículo calculado así:

$$\text{Máx. de vehículos PRT} = (90 \text{ viajes}/60 \text{ min.}) * (11 \text{ Km}/(60 \text{ Km}/60 \text{ minutos})) * 40 = 660 \text{ vehículos}$$

Normalmente se debe estimar un 10% adicional de vehículos, en previsión de sustituir aquellos que se encuentren en mantenimiento rutinario y, el total de vehículos de la red sería:

$$660 + 66 \text{ vehículos} = 726 \text{ vehículos.}$$

Este número se generaliza como $726 \text{ vehículos}/40 \text{ andenes} = 18.15 \text{ vehíc./andén} \approx 19 \text{ vehíc./andén}$

Conforme aumenta la demanda en los diferentes sitios, se construyen más andenes y se incorporan más vehículos, hasta llegar a utilizar toda la capacidad de la vía.

En la estación, sólo se dispondrá de espacio para 2 vehículos vacíos en espera por cada andén y los otros 17 vehículos por andén se pueden almacenar en depósitos cercanos a las estaciones, a una distancia que no cree una espera muy larga a los usuarios.

Si se acepta una espera del usuario de 1 ó 2 minutos para que llegue un vehículo vacío, los depósitos deberán ubicarse a un máximo de 2 km. Con ese tiempo de respuesta, cuando sale un vehículo de un andén, otro vehículo es despachado automáticamente desde el depósito más cercano, para tener siempre vehículos disponibles. Si hay más de dos usuarios pidiendo vehículo en un andén, los vehículos adicionales llegarán en el tiempo preciso para servir a los usuarios que hacen fila.

De esta manera se crean las estaciones más pequeñas posibles.

4.6. Estimación de costos

4.6.1. Costos del sistema PRT.

Para estimar el costo probable del sistema PRT, se parte de una comparación con elementos similares de otros sistemas; que tan sólo se usan de base para una estimación de costos y se aclara que no incluyen análisis estructurales, ni se consideran las diferencias entre sistemas para la aplicación de cargas.

En primer lugar, las vigas propuestas para el sistema PRT se pueden comparar con los otros sistemas tipo SAFEGE que operan en el mundo. Se tiene información del sistema SIPEM H-Bahn de Siemens (Silva, L., 1981) que soporta cargas comparables al sistema propuesto.

La distancia máxima entre las columnas de soporte de las vigas del sistema SIPEM es de 30 metros. Los vehículos SIPEM viajan a intervalos de 50 segundos, que a 60 Km/hora representan 833 metros; esto quiere decir que nunca hay más de un vehículo en cada tramo de vía. Son vehículos de transporte grupal rápido (GRT) con un peso máximo de 18,230 Kg y un peso promedio de 12,810 Kg.

En este estudio no se realizan cálculos estructurales, más, se comparan de forma análoga los componentes propuestos para el sistema PRT con otro sistema existente, en este caso el SIPEM H-Bahn de Siemens, que soporta solicitaciones mayores, como se verá a continuación:

En el sistema PRT propuesto, se estima que el peso de los vehículos individuales oscilará entre los 1,000 Kg (semejante a un vehículo pequeño completamente equipado) y los 1,600 Kilogramos (automóvil mediano); a los que se añaden 4 pasajeros de 100 Kg cada uno, para un total de 2,000 Kg/vehículo. En cada tramo de vía de 30 metros se podrán acomodar hasta 6 vehículos, guardando las distancias intervehiculares. El peso total sobre la viga será un poco menor al que actualmente soporta el sistema SIPEM, con la ventaja de tener la carga distribuida a lo largo de la viga.

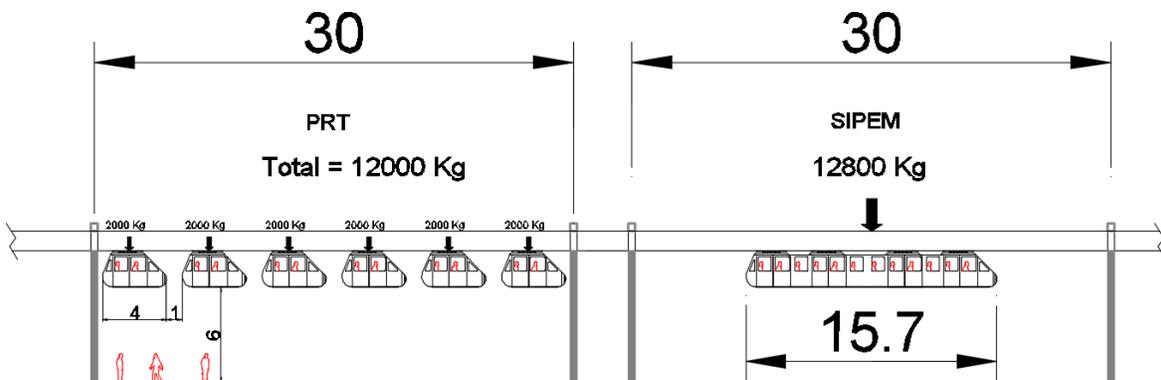


Figura 125. Comparación de cargas sobre la viga entre los sistemas PRT y SIPEM.

Con base en esta comparación, se puede generalizar que los componentes del sistema SIPEM (Silva, L., 1981), podrían soportar bien los vehículos PRT y se pueden usar de modelo para la estimación inicial de las dimensiones y pesos, no para cálculos estructurales:

- Vigas: Con un peso promedio de 600 Kg/metro (Silva, L., 1981).
- Curvas y transiciones: 900 Kg/metro.
- Columnas 10 m: Peso de 600 Kg/metro.

4.6.1.1. Costo de componentes básicos

El costo de los componentes ya instalados se calcula con base en el parámetro de costo actual que tiene la Dirección de Puentes del Ministerio de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Costa Rica que, en una estimación conservadora, oscila entre \$2 y \$3 por kilogramo de acero ya instalado y pintado en una estructura terminada. Se utilizará el valor promedio de \$2.5/Kg de acero.

Cuadro 31. Peso y costo de los componentes de viga del sistema PRT.

Componente	Peso unitario (Kg/m)	Costo unitario (\$/Kg)
Viga recta	600	2.5
Bifurcaciones	900	2.5
Curvas	900	2.5
Columnas 10 m	600	2.5

4.6.1.2. Equipo especial

Los elevadores para cada estación de un andén con capacidad de izar 2,000 Kg se cotizan en el mercado costarricense en \$12,000 ya instalados. En este caso no llevarán cabina propia pero sí un mecanismo de engarce y sujeción a la cabina del vehículo PRT.

En cada intersección y en cada estación se debe administrar el tránsito de los vehículos, en un modo de operación del sistema Cuasi-sincrónico y una computadora debe asignar la prioridad de paso de los vehículos PRT. Por razones de seguridad, se recomienda usar tres computadores (Irvin, J., 1978) que realicen simultáneamente esas operaciones pues, si una de las tres fallase, las otras dos anularán las órdenes incorrectas y continuarán llevando a cabo las operaciones de control. Adicionalmente, otros tres computadores servirán de respaldo o “espejo” en todo momento para que la información sea bien resguardada. Se tendrá comunicación por fibra óptica a lo largo de la vía.

Cuadro 32. Equipo especial de cada estación.

Equipo especial de estaciones			
Elemento	Cant.	Precio unitario	Precio total
	(un)	(\$)	(\$)
Elevador	1	12,000	12,000
Computadores	6	400	2,400
Modem	6	100	600
Terminal Fibra óptica	1	300	300
Total			15,700

La comunicación de todos los sistemas se realizaría mediante una red de fibra óptica, que viajaría dentro de la viga. El precio de la instalación de la fibra, sus ductos, amplificadores y conectores se estima, de acuerdo con los precios de instalación de fibra óptica en el Sistema Centralizado de Semáforos de San José de Costa Rica, en un costo promedio de \$18/m, con lo que el costo por kilómetro de la comunicación por fibra sería de \$18,000/Km.

Comunicación por Fibra Óptica = \$18,000/Km

El costo de los vehículos se estima en \$35,000.00 semejante al de un vehículo mediano moderno 2018, porque contará con sistemas análogos a los de vehículos particulares: dirección, unidad motriz, frenado, climatización interna, detectores de cercanía y otros. En la sección 4.6. “**Tamaño de la flotilla**” se calculó el número de vehículos necesarios en 19 unidades por cada andén de estación.

Vehículo típico = \$35,000/unidad

4.6.1.3. Costo de cada tipo de estación.

En el apartado 4.5.2.1. “**Acceso a las estaciones**”, se establece que en un kilómetro de vía se encontrará un retorno para cambio de dirección y una estación a cada 400 m (2.5 estaciones por Km, una de ellas con retorno):

De acuerdo con las dimensiones necesarias para frenar, estacionar, acelerar y cambiar de dirección que se vieron en la sección 4.2.5.2. “**Configuración de estaciones**”, se pueden calcular las longitudes de vía recta, las curvas y bifurcaciones necesarias para cada tipo de estación, para así estimar su costo:

Cuadro 33. Costo de una estación paralela con un andén.

Costo de Estación Paralela con 1 andén						
Componente	Cantidad	Unidad	Peso unitario	Peso total	Costo unitario	Costo Total
			(Kg/m)	(Kg)		(\$)
Viga recta	102	m	600	61,200	\$2.5/kg	153,000
Bifurcaciones	32	m	900	28,800	\$2.5/kg	72,000
Curvas	35	m	900	31,500	\$2.5/kg	78,750
Equipo especial	1	un	-	-	\$15,700/un	15,700
Vehículos	19	un	-	-	\$35,000/un	665,000
						984,450

Cuadro 34. Costo de una estación paralela de un andén, con retorno.

Costo de Estación Paralela 1 andén y retorno						
Componente	Cantidad	Unidad	Peso unitario	Peso total	Costo unitario	Costo Total
			(Kg/m)	(Kg)		(\$)
Viga recta	128	m	600	76,800	\$2.5/kg	192,000
Bifurcaciones	44	m	900	39,600	\$2.5/kg	99,000
Curvas	74	m	900	66,600	\$2.5/kg	166,500
Equipo especial	1	un	-	-	\$15,700/un	15,700
Vehículos	19	un	-	-	\$35,000/un	665,000
						1,138,200

Cuadro 35. Costo de un kilómetro instalado de viga simple.

Línea principal sencilla					
Componente	Longitud	Peso unitario	Peso total	Precio unitario	Precio Total
	(m)	(Kg/m)	(Kg)	(\$/Kg)	(\$)
Viga recta	1000	600	600,000	2.5	1,500,000

Cuando se instala una vía en sentido opuesto no se aumenta el número de estaciones, solamente se dobla la longitud de las vigas y el número de columnas.

Se añade el costo de las columnas de soporte, que en el sistema SIPEM logran claros máximos de 35 m. En este caso, se supone una separación conservadora entre columnas de 25 metros, para cubrir la necesidad de columnas adicionales en las bifurcaciones y estaciones:

Cuadro 36. Costo de columnas de soporte por cada kilómetro para una vía.

Costo de columnas de soporte por cada kilómetro para una vía							
Longitud	Peso/m	Peso total	Costo instalado	Costo unitario	Separación	Cantidad por Km	Costo por Km
(m)	(Kg/m)	(Kg)	(\$/Kg)	\$	(m)	(un)	(\$)
10	600	6,000	2.5	15,000	25	40	600,000

4.6.1.4. Costo por kilómetro del sistema PRT

El costo de un kilómetro de infraestructura para el sistema PRT se resume en el Cuadro 37:

Cuadro 37. Resumen de costos para 1 kilómetro de línea PRT en una dirección.

Costo de 1 Kilómetro de línea PRT simple			
Elemento	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
	un	(\$/un)	(\$)
Km de vía sencilla	1	1,500,000	1,500,000
Km de fibra óptica	1	18,000	18,000
Columnas por Km de vía simple	40	15,000	600,000
Estaciones paralelas	1.5	984,450	1,476,675
Estación paralela con retorno	1	1,138,200	1,138,200
			4,732,875

Y para la línea PRT con doble sentido de viaje, se resume el costo de cada kilómetro:

Cuadro 38. Resumen de costos para 1 kilómetro de línea PRT en dos direcciones.

Costo de 1 Kilómetro de línea PRT doble			
Elemento	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
	un	(\$/un)	(\$)
Km de vía sencilla	2	1,500,000	3,000,000
Km de fibra óptica	1	18,000	18,000
Columnas por Km de vía doble	80	15,000	1,200,000
Estaciones paralelas	1.5	984,450	1,476,675
Estación paralela con retorno	1	1,138,200	1,138,200
			6,832,875

El costo de un kilómetro típico de sistema PRT en doble sentido es de **\$ 6,832,875.00**

Eventualmente se deberá construir un centro de control para administrar y monitorear la operación de todo el sistema. El Centro de Control de Semáforos de San José tuvo un costo de \$2,000,000 en el año 2007; aplicando los IPC del Banco Mundial (Banco Mundial, 2019) se obtiene su valor en dólares de 2018 y el costo sería de $\$2,000,000 \times 1.253 = \$2,506,414$.

Un centro de control para el sistema PRT costaría aproximadamente **\$2,510,000**

Estos costos están en el mismo orden de magnitud de estimaciones semejantes para sistemas PRT, como el sistema ULTra PRT, que se estimó de la siguiente manera (Kerr, A. 2005):

- Vía de tránsito exclusiva: \$6,750,000/milla = \$4,218,750/km
- Estaciones: \$1,500,000/unidad; en la red propuesta se usan 2.5 estaciones por kilómetro, para un costo total de estaciones de \$3,750,000/km.
- Lo que resulta en un costo total por kilómetro de \$7,968,750, sin incluir los vehículos.

4.6.1.5. Costo de mantenimiento y operación de sistemas PRT

Existen pocos registros del costo de mantenimiento de un sistema PRT, sólo los administradores de dos sistemas han publicado cifras: la Universidad de West Virginia en Morgantown y el sistema ULTra PRT.

La Universidad de West Virginia en Morgantown tiene en funcionamiento el sistema más antiguo, con altos costos de mantenimiento. Como se describió en el apartado “**2.3.4.3. Sistemas desarrollados de Transporte Personal Rápido**”, el sistema de Morgantown requiere de mucho mantenimiento para limpiar la nieve de la vía y reponer equipos que han estado en uso desde 1975. Los costos anuales de mantenimiento de la red de 13.92 km y 71 vehículos son de \$5,085,293 (Forman, A., 2014); eso equivale a \$365,322.77 anuales por cada kilómetro de vía, que puede servir de base para calcular los costos de operación y mantenimiento de otras redes.

Costo anual de mantenimiento del PRT de Morgantown = \$365,322.77/km

Las otras cifras disponibles son del sistema ULTra PRT, que opera en el aeropuerto de Heathrow, en Londres.

ULTra estimó los costos para una red básica de 5 km y 25 vehículos, incluyendo la infraestructura y el personal necesario por cada kilómetro y creó una fórmula para estimar el costo anual de operación y mantenimiento (Jeffery, D., 2010), en miles de Euros:

Costo anual de operación (x 1,000 €) = $1,600 + 67(L-5) + 11(N-25)$

Donde:

L = longitud en km de vía en un sentido

N = Número de vehículos

Es claro que en esta fórmula se considera que el mantenimiento y operación de los primeros 5 kilómetros y 25 vehículos cuesta € 1,600,000; el mantenimiento de cada kilómetro adicional de vía en un sentido cuesta €67,000 y el de cada vehículo adicional cuesta €11,000 por año.

El tipo de cambio de euros a dólares estadounidenses en abril de 2019 es de $1€ = \$1.12$

El sistema PRT propuesto tendrá 14 kilómetros de vías en doble sentido; 2.5 estaciones por kilómetro, cada una con 17 vehículos (ver apartado “**4.6.1.3 Costo de cada tipo de estación**”).

El costo anual de operación y mantenimiento en miles de euros sería:

Costo anual = $(1600 + 67(2 \times 14 - 5) + 11((2 \times 14 \times 2.5 \times 17) - 25)) \times 1000 = €4,306,000$

y en dólares estadounidenses:

Costo anual mantenimiento y operación = \$4,822,720 **para toda la red.**

El costo anual de mantenimiento y operación **para un km de red** sería de \$344,480.

Para ser más conservador, se escoge una estimación de costos de operación y mantenimiento semejante al costo de WVU en Morgantown:

Costo anual de mantenimiento y operación para un km de red PRT sería de \$365,322.77
--

4.6.2. Costo de financiamiento del sistema PRT

Lo deseable es que la inversión inicial se amortice con los ingresos que se recibe de los pasajeros por tarifa de viaje, sin subsidios.

El modelo más sencillo de tarifa es el cobro por kilómetro recorrido.

El propósito del sistema PRT es dar una opción de viaje atractiva para los propietarios de automóvil particular, que sea:

- Tan cómoda como su propio vehículo.
- Que les permita viajar más rápido que conduciendo por las vías congestionadas.
- Más económica que tomar un taxi.

La tarifa actual de los taxis es de ₡645/km para el primer kilómetro (ARESEP, 2019). Este sería el límite superior de la tarifa que debería tener el sistema PRT, para ser atractivo a los usuarios de vehículo privado

Se estudia la amortización de los costos de construcción y mantenimiento con tarifas de ₡400/km, ₡350/km, ₡300/km, ₡250/km, y ₡200/km, para determinar cuál sería la mínima posible.

4.6.2.1. Condiciones de financiación

El costo de los fondos de construcción se estima en la tasa libor (3% a abril 2019), más 5% adicionales por intermediación financiera, para un total de 8%. El plazo, de acuerdo con la experiencia reportada por los funcionarios de la Secretaría de Planificación Sectorial del MOPT, se puede obtener fácilmente a 15, 20 ó más años; se escoge un plazo de amortización de 20 años. El tipo de cambio se estima en ₡620 = \$1 (marzo 2019).

Cuadro 39. Costo de construcción y mantenimiento del sistema PRT.

Item	Unidad	Cantidad
% Tasa LIBOR	%	3
% Adicional	%	5
% Tasa préstamo	%	8
Plazo	año	20
Tipo de cambio	₡/\$	620
Viaje promedio	km	7
Tiempo de viaje	minutos	7
Factor de amortización mensual	núm.	119.5543
Amortización mensual por \$1 millón	\$	8,364.40
Mantenimiento anual de 1 Km de PRT	\$	365,322.77
Costo de 1 Km de PRT	\$	6,832,875.00
Longitud de la red	km	14.019
Costo de toda la red PRT	\$	95,790,074.63
Costo de Centro de Control	\$	2,500,000
Costo total del proyecto	\$	98,290,074.63
Mantenimiento anual de Red PRT	\$	5,121,460
Mantenimiento mensual de toda la Red PRT	\$	426,788
Amortización mensual de toda la Red PRT	\$	801,226.57
Amortización mensual de Centro de Control PRT	\$	20,911.00
Amortización mensual de red y centro de control PRT	\$	822,137.57
Amortización y mantenimiento mensual de todo el sistema PRT	\$	1,248,925.89
Ingreso diario necesario para cubrir costos y amortización	\$	41,630.86
Ingreso diario necesario para cubrir costos y amortización	₡	25,811,135.14

Con estos costos y las posibles tarifas, se define el número mínimo de pasajeros para sostener financieramente el sistema.

Cuadro 40. Viajes necesarios con diferentes tarifas para autofinanciar el sistema PRT.

Tarifa PRT por Km	¢	200	250	300	350	400
Viaje PRT promedio	km	7	7	7	7	7
Costo viaje PRT promedio	¢	1,400	1,750	2,100	2,450	2,800
Viajes necesarios/día	unidad	18,437	14,749	12,291	10,535	9,218
Viajes necesarios/hora pico	unidad	1844	1475	1229	1054	922

4.6.2.2. Distribución modal

Existen varios métodos para estimar una distribución de viajeros por modo de transporte, las más conocidas son:

- Modelos de generación directa.
- Modelo de final de viaje.
- Modelo de intercambio de viajes.
- Modelo Logit.

En el “Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035” se creó un modelo logit para predecir el modo de transporte que elegirán los usuarios de una red de transporte (INECO, MOPT, 2011), calibrado utilizando las mismas matrices de viaje generadas para el programa PRUGAM.

El modelo es una formulación tipo Logit que considera la utilidad relativa de cada modo, basado en varios atributos de cada uno de esos modos; en este caso, los atributos son el tiempo y el costo, por lo que el modelo adquiere la siguiente forma:

$$P_{\text{MOD}O_i} = e^{U_i} / (e^{U_1} + e^{U_2} + e^{U_3}) \quad \text{donde:}$$

$P_{\text{MOD}O_i}$ = probabilidad de elegir el modo “i”

U_i = utilidad del modo “i” = $\beta(C_i + \text{VOT} * T_i)$

$\text{Costo}_{\text{MOD}O_i}$ = C_i

T_i = tiempo del modo “i”, en minutos

β = constante calibrada = -0.0005

VOT = Valor del tiempo = ¢29.98/minuto, utilizando el dato del salario mínimo de ¢309,146.00/mes (Decreto N° 41434-MTSS-2018).

Para calcular los atributos, se hace un detalle de sus componentes:

- Al realizar un viaje en auto se requiere de combustible, lubricantes, pagar estacionamiento y se supone una caminata desde él hacia el destino final, a un máximo de 200 metros. La economía de un auto mediano moderno de entre 1,266 kg y 1,515 kg es de 10.5 km/litro (TransportPolicy.net, 2019), el precio de la gasolina en abril de 2019 es de ₡602/litro (www.aresp.go.cr); el costo promedio de un cambio de aceite en abril 2019 es de ₡20,000 a cada 4,000 kilómetros recorridos (₡5 de aceite/Km).
- En un viaje en autobús se paga la tarifa (un promedio de ₡350 en la zona de Desamparados y San Miguel), se supone una caminata de 200 m (en 2 minutos) hacia la parada y se espera allí el bus hasta 5 minutos.
- Un viaje en PRT se calculará con tarifas de 200, 250, 300, 350 y ₡400/km; requiere caminar hacia una parada cercana a un máximo de 200 metros de distancia (en 2 minutos), que es la distancia máxima en la que se ha supuesto que el PRT mantiene su atractivo y esperar allí un máximo de 1 minuto antes de que arribe un vehículo vacío.
- La velocidad promedio de viaje en automóvil es de 14 kph (Grant, M., 2016).
- Con el sistema sectorizado de transporte público, la velocidad del autobús será de 17 kph (Cervero, R., 2013).
- El viaje es el promedio de la ruta, de 7 Km. En la distribución modal se utiliza la distancia del viaje promedio porque la tarifa de autobús está calculada para una distancia promedio y no se diferencia en recorridos cortos. Se tomará el total de viajeros de automóvil y de bus para la distribución modal en un viaje promedio, en vez de hacer la distribución en cada par de zonas de origen-destino.

Cuadro 41. Parámetros para calcular los atributos de funciones de utilidad.

Item	Unidad	Cantidad
Viaje prom.	Km	7
Economía	Km/litro	10.5
Precio Gas	₡/litro	602
Lubricante	₡/4000 Km	20,000
Parqueo	₡/60 min	1,000
Tarifa Bus	₡/viaje	350
Caminar	min/m	0.01
Veloc. Auto	kph	14
Veloc. Bus	kph	17
Veloc. PRT	kph	60

En el Cuadro 42 se resume el cálculo de las funciones de utilidad y la probabilidad de escoger cada medio de transporte para las diferentes tarifas del sistema PRT.

Cuadro 42. Cálculo atributos de costo y de tiempo de los modos de transporte.

	Unidad	Auto privado	Bus BRT	Posibles tarifas PRT (€/km)				
				200	250	300	350	400
Viaje promedio	Km	7	7	7	7	7	7	7
Economía de combustible	Km/litro	10.5						
Precio de combustible	€/litro	602						
Costo de combustible en viaje	€	401.33						
Gasto de lubricante	€/km	5						
Costo de lubricante	€	35						
Velocidad de vehículo	Km/hora	14	17	60	60	60	60	60
Costo parqueo	€/hora	1000						
Distancia a parqueo	m	200						
Velocidad de caminado	m/min	100	100	100	100	100	100	100
Tiempo de caminar a parqueo	min	2						
Tiempo de viaje en vehículo	min	30	24.7	7	7	7	7	7
Distancia a caminar a parada	m		200	200	200	200	200	200
Tiempo de caminar a parada	min		2	2	2	2	2	2
Tiempo de espera en parada	min		5	1	1	1	1	1
Costo viaje en transp. público	€		350	1400	1750	2100	2450	2800
Función de utilidad auto (U_{auto})		-1.19785						
Función de utilidad bus (U_{bus})			-0.7					
Función de utilidad PRT (U_{PRT})				-0.85	-1.02	-1.20	-1.37	-1.55
Probabilidad de usar auto (P_{auto})				0.24	0.26	0.27	0.28	0.29
Probabilidad de usar bus (P_{bus})				0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
Probabilidad de usar PRT (P_{PRT})				0.34	0.30	0.27	0.23	0.20

A continuación, se presenta el detalle del cálculo de la distribución modal para la tarifa de €250/Km:

$$U_{\text{auto}} = -0.0005 \cdot (1436.33 + (29.98 \cdot 32)) = -1.19785$$

$$U_{\text{bus}} = -0.0005 \cdot (350 + (29.98 \cdot 31.7)) = -0.6503$$

$$U_{\text{PRT}} = -0.0005 \cdot (1750 + (29.98 \cdot 10)) = -1.0249$$

Entonces,

$$P_{\text{BUS}} = e^{U_{\text{bus}}} / (e^{U_{\text{bus}}} + e^{U_{\text{auto}}} + e^{U_{\text{prt}}})$$

$$P_{\text{BUS}} = e^{(-0.6503)} / (e^{(-0.6503)} + e^{(-1.19785)} + e^{(-1.0249)}) = 0.44$$

$$P_{\text{AUTO}} = e^{U_{\text{auto}}} / (e^{U_{\text{bus}}} + e^{U_{\text{auto}}} + e^{U_{\text{prt}}})$$

$$P_{\text{AUTO}} = e^{(-1.19785)} / (e^{(-0.6503)} + e^{(-1.19785)} + e^{(-1.0249)}) = 0.26$$

$$P_{\text{PRT}} = e^{U_{\text{prt}}} / (e^{U_{\text{bus}}} + e^{U_{\text{auto}}} + e^{U_{\text{prt}}})$$

$$P_{\text{PRT}} = e^{(-1.0249)} / (e^{(-0.6503)} + e^{(-1.19785)} + e^{(-1.0249)}) = 0.30$$

$$P_{\text{BUS}} = 0.44$$

$$P_{\text{AUTO}} = 0.26$$

$$P_{\text{PRT}} = 0.30$$

En el apartado “4.4.1. Matriz de generación de viajes”, se vio que el número de viajeros en la hora pico entre **todos** los pares de origen y destino es de **7,691**. Con los resultados de la repartición modal se tiene lo siguiente:

Cuadro 43. Asignación de viajeros por modo de transporte.

Modo	Posibles tarifas PRT (€/km)									
	200		250		300		350		400	
	Prob.	Viajeros	Prob.	Viajeros	Prob.	Viajeros	Prob.	Viajeros	Prob.	Viajeros
Auto	0.24	1855	0.26	1963	0.2683	2064	0.28	2156	0.29	2241
Bus	0.42	3208	0.44	3394	0.46	3568	0.48	3728	0.50	3874
PRT	0.34	2628	0.30	2334	0.2678	2059	0.23	1806	0.20	1576
Total	1.00	7691	1.00	7691	1.00	7691	1.00	7691	1.00	7691

4.6.2.3. Número proyectado de viajes del sistema PRT

Los viajeros que usarán el PRT durante la hora pico podrían compartir el vehículo de forma semejante a como lo hacen en automóvil o taxi. En la hora pico de la mañana, la mayoría de viajes se realizan hacia el trabajo y centros de estudio. Para estos propósitos, las estadísticas indican que la ocupación promedio de los vehículos es de 1.6 personas/vehículo (Kuzmyak, 1981) y (Davis, Diegel, Boundy, 2015). Los viajeros ocuparían una flota que se calcula así:

$$\text{Flota} = \text{viajeros} / 1.6 \text{ personas/vehículo} = N^{\circ} \text{ vehículos PRT}$$

Cuadro 44. Número de viajes PRT generados con las diferentes tarifas.

	Posibles tarifas PRT (¢/km)				
	200	250	300	350	400
Viajeros/hora	2628	2334	2059	1806	1576
Viajeros/vehíc.	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
Viajes/hora	1642	1459	1287	1129	985

En el “Cuadro 40 “Viajes necesarios con diferentes tarifas para autofinanciar el sistema PRT”, se ve que para una tarifa de ¢300/km, se requieren 1,229 viajeros en la hora pico para financiar el sistema; además, con esa tarifa se generarán 1,287 viajes PRT, como se ve en el Cuadro 44, eso quiere decir que **habrá suficiente demanda de viajeros para no subsidiar el sistema en esta red**, con una tarifa de ¢300/km.

Durante la hora pico de la mañana, se conoce cuántos viajes se generan en cada zona y se estima la cantidad necesaria de estaciones. Se suponen estaciones de Tipo 2, donde cada uno de sus andenes tendrá la capacidad de generar 90 viajes por hora; cada viaje incluye una salida y una llegada.

El cuadro siguiente muestra las necesidades de estaciones por zona, para satisfacer la demanda de viajes, considerando una ocupación de 1.6 personas/vehículo:

Cuadro 45. Número de vehículos y estaciones por zona; porcentaje de uso de andenes.

Nº de zona	Salida de Viajeros	Viajes en Bus	Viajes en Auto	Viajes en PRT	Factor de ocupación de vehículo (pasaj/veh)	Salida de Vehículos PRT	Estaciones de 1 andén en zona	Vehículos por estación	Capacidad de andén (viajes/h)	% de uso de Andenes
5	10	5	3	3	1.6	2	1	2	90	1.88
6	7	3	2	2	1.6	1	1	1	90	1.31
10	39	18	11	11	1.6	7	1	7	90	7.31
11	23	11	6	6	1.6	4	1	4	90	4.31
14	5	2	1	1	1.6	1	1	1	90	0.94
15	8	4	2	2	1.6	1	2	1	90	0.75
17	79	36	21	21	1.6	13	1	13	90	14.81
18	90	41	24	24	1.6	15	1	15	90	16.88
27	49	23	13	13	1.6	8	1	8	90	9.19
28	11	5	3	3	1.6	2	1	2	90	2.06
30	155	71	42	42	1.6	26	1	26	90	29.06
31	75	35	20	20	1.6	13	1	13	90	14.06
32	290	133	78	78	1.6	49	1	49	90	54.38
33	97	45	26	26	1.6	16	1	16	90	18.19
34	90	41	24	24	1.6	15	1	15	90	16.88
35	20	9	5	5	1.6	3	1	3	90	3.75
38	261	120	70	70	1.6	44	2	22	90	24.47
41	220	101	59	59	1.6	37	1	37	90	41.25
68	440	202	119	119	1.6	74	1	74	90	82.50
80	507	233	137	137	1.6	86	4	21	90	23.77
81	797	367	215	215	1.6	134	3	45	90	49.81
82	982	452	265	265	1.6	166	2	83	90	92.06
83	1169	538	316	316	1.6	197	8	25	90	27.40
93	1006	463	272	272	1.6	170	3	57	90	62.88
94	1261	580	340	340	1.6	213	3	71	90	78.81
Total	7691	3538	2077	2077		1298	44	Prom. 24.44		Prom. 27.15
								Máx. 83		Máx. 92.06
								Mín. 1		Mín. 0.75

En el Cuadro 45, se observa que de algunas zonas salen muy pocos vehículos y su estación tendría un bajo uso (zonas 5, 6, 14, 15, 28 y 35), mientras que en otras zonas se requieren varias estaciones para cubrir la demanda (zonas 15, 38, 80, 81, 82, 83, 93 y 94). Un caso especial es la zona 83, que es muy extensa y para cubrir con paradas a cada 400 metros debió preverse la instalación de 8 estaciones.

El sistema PRT podría fácilmente satisfacer la demanda de viajes que se está proyectando en este caso desde las zonas analizadas, de 1,298 vehículos/hora, pues en el apartado 4.2.4. “Capacidad de la vía continua PRT”, se determinó que la vía principal tendría una capacidad máxima teórica de 8,640 vehículos/hora por cada dirección.

4.6.3. Costo de construcción de una carretera

Las comparaciones del sistema PRT no se realizan con las carreteras existentes entre San José y Desamparados, pues ya se vio que atraviesan un ambiente urbano y su capacidad es muy baja. Para una comparación más objetiva, se supone la construcción de una carretera que atraviese las mismas zonas por las que circularía el sistema PRT y se calculará y comparará su costo con el del PRT.

En Costa Rica se mantiene en una revisión constante del costo de construcción de obra vial, porque éste debe reflejar los cambios en el precio de los insumos, en las regulaciones de diseño y en las técnicas constructivas. Para tener una versión actualizada, se obtuvieron datos de estos costos al año 2017, en el estudio realizado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos estructurales, de la Universidad de Costa Rica (Picado M., 2017), donde se resume el costo por kilómetro de una obra vial terminada.

Los datos obtenidos se muestran en la Cuadro 46:

Cuadro 46. Costo de construcción de carreteras nuevas en Costa Rica, al año 2017.

Tipo de pavimento	Costo/Km	Costo/m ²	Ancho de sección
	(\$)	(\$)	(m)
Concreto	1,147,379.77	81.01	14.16
Asfalto	716,206.81	69.92	10.24

Fuente: (Picado M., 2017).

Como se determinó en la sección 4.2.7. “*Comparación entre la capacidad de una carretera y el sistema PRT*”, para igualar la capacidad teórica de transporte del sistema PRT, una carretera sin intersecciones ni semáforos debería tener 4 carriles por sentido de circulación. La sección de calzada, mediana y espaldones de una carretera semejante sería de 36 metros de ancho:

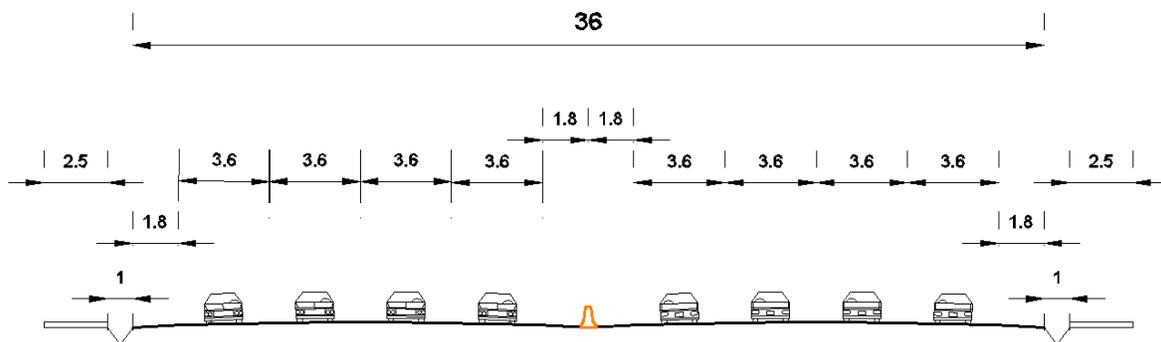


Figura 126. Sección de una carretera con la misma capacidad que la vía PRT.

4.6.3.1. Costo de la obra civil

Para comparar el costo de construir un sistema PRT con el de una carretera, se calcula costo de construir tal carretera con pavimento de asfalto, el material más económico, de la siguiente manera:

Ancho de vía en metros * 1,000 metros * \$69.92/m² = Coste de construcción de 1 Km de carretera

$$36\text{m} * 1,000\text{m} * \$69.92/\text{m}^2 = \$2,517,120.00$$

El costo de construcción de la carretera sería de \$2,517,120.00 por cada kilómetro

4.6.3.2. Costo del derecho de vía

En el caso de obras nuevas, al costo de construcción debe añadirse el precio de la tierra que servirá como derecho de vía. El Ministerio de Hacienda de Costa Rica ha determinado valores de terrenos para fines tributarios y los ha publicado mediante los “Mapas de Valores de Terrenos por Zonas Homogéneas”, disponibles en el sitio web del Ministerio (www.hacienda.go.cr).

Se consultaron los mapas que cubren el recorrido propuesto de la Red de Transporte Personal Rápido:

- a. Mapa de Valores de Terrenos por Zonas Homogéneas, Provincia 1 San José, Cantón 01 San José.
- b. Mapa de Valores de Terrenos por Zonas Homogéneas, Provincia 1 San José, Cantón 03 Desamparados (Sector Norte)

De los terrenos por los que pasa el proyecto PRT, el valor más alto corresponde a la zona homogénea 103-01-U01, “Multicentro Desamparados”, valorada en ₡2,000,000.00/ m² y el valor más bajo es el de la zona 101-11-U14, “Jazmín”, valorada en ₡65,000.00/m².

Para comparar el costo que supondrá el derecho de vía de una carretera con capacidad semejante y que sirva las mismas zonas que el sistema PRT; se tiene que el valor promedio de las tierras atravesadas por el sistema PRT es de ₡479,500.00/ m², con ese precio de la tierra, el costo del derecho de vía de la carretera equivalente se calcularía así:

$$(36 + 2.5 + 2.5)\text{m} * 1,000\text{m} * ₡479,500.00/\text{m}^2 = ₡19,659,500,000.00$$

Con el tipo de cambio promedio de abril de 2019 de $\text{C}\$603.00 = \1.00 US

$\text{C}\$19,659,500,000.00 = \$32,602,819.24$

4.6.3.3. Costo total de la carretera

Para construir una carretera que ofrezca la misma capacidad que la vía PRT, debe invertirse:

Cuadro 47. Costo de construcción de carretera con la capacidad de una vía PRT, al año 2017.

Carretera de 4 carriles por sentido con pavimento asfáltico	Costo/Km (\$)
Obra civil	2,517,120.00
Derecho de vía	32,602,819.24
Total	35,119,939.24

4.6.4. Comparación de costos entre una carretera y el sistema PRT

4.6.4.1. Comparación entre el costo de construir una carretera y construir el sistema PRT

Se compara el costo de dos sistemas con la misma capacidad de transporte de pasajeros:

-Un kilómetro de carretera de cuatro carriles por sentido de circulación = \$ 35,119,939.24

-Un kilómetro de sistema PRT con una viga por sentido de circulación = \$ 6,832,875.00

La diferencia a favor del sistema PRT, que ya incluye los vehículos, es de **\$ 28,462,064.24/Km**.

El costo del sistema PRT es una fracción del costo de la carretera y representa un porcentaje calculado así:

$\text{Costo Km PRT} \cdot 100 / \text{Costo Km carretera} = \$ 6,832,875.00 / \$ 35,119,939.24 = 19.46\%$

El costo inicial de un sistema PRT es un 80.54% más barato que una carretera de la misma capacidad.

4.6.4.2. Costo de mantenimiento de una carretera

Las carreteras se pueden intervenir de varias formas y el costo de las obras varía de acuerdo con la complejidad de los procedimientos, condiciones del sitio y el tipo de material empleado. La periodicidad de las intervenciones de una carretera depende de las condiciones de operación: el volumen del tránsito, la composición del tránsito, el clima de la zona, el drenaje apropiado, etc.; normalmente, una carretera se opera por varios años antes de requerir una reparación.

En el cuadro siguiente se presentan los costos promedio de los procedimientos más comunes a realizar en una carretera en Costa Rica, compilados en el estudio “Costos de Carreteras en Costa Rica” (Picado M., 2017) realizado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME):

Cuadro 48. Costo de diferentes intervenciones de carreteras en Costa Rica.

Proyecto	Ancho de calzada	Calzada de Asfalto		Calzada de Concreto	
	(m)	Costo/m ²	Costo de 1 Km	Costo/m ²	Costo de 1 Km
Construcción	36	\$69.92	\$2,517,120	\$81.01	\$2,916,360
Mejoramiento	36	\$28.74	\$1,034,640	\$56.04	\$2,017,440
Mantenimiento	36	\$12.32	\$443,520	\$12.42	\$447,120
Reconstrucción	36	\$23.07	\$830,520	\$53.08	\$1,910,880

4.6.4.3. Comparación entre el costo de mantener una carretera y mantener el sistema PRT

Es difícil hacer una comparación directa de ambos elementos de transporte porque la carretera es un medio sobre el que se realiza el transporte con vehículos sobre ruedas y el sistema PRT incluye el medio (la vía exclusiva), los vehículos y las estaciones de abordaje.

La comparación del mantenimiento y operación de ambos modos debe incluir el costo en el que incurren los dueños de vehículos para viajar por cada kilómetro de carretera.

La economía de un auto mediano moderno de entre 1,266 kg y 1,515 kg es de 10.5 km/litro (TransportPolicy.net, 2019), el precio de la gasolina en abril de 2019 es de ₡602/litro (www.aresp.go.cr); el costo promedio de un cambio de aceite es de ₡20,000 a cada 4,000 kilómetros recorridos (₡5/km). La carretera a analizar es comparable en capacidad con el sistema PRT y tiene 4 carriles por cada sentido. Con estas cantidades se calcula el costo de recorrer un kilómetro de carretera.

Cuadro 49. Cálculo del costo anual de circular por 1 Km de carretera de 4 carriles por sentido.

Item	Unidad	Cantidad
Precio Gas	¢/litro	602.00
Economía	Km/litro	10.50
Economía	litro/Km	0.095238
Costo gas	¢/Km	57.33
Lubricante	¢/4000 Km	20,000
Costo Lubric.	¢/Km	5
Costo por Km	¢/Km	62.33
Volumen/hora	Vehíc/carril/hr	2,000
Num. carriles	carril	8
Total vehíc./hr	vehículos	16,000
Total vehíc./día	vehículos	160,000
Costo total/día	¢/Km	9,972,800
Costo total/año	¢/Km	3,640,072,000
Costo total/año	\$/Km	5,871,083.87

El costo de operar la carretera es el costo de circular por ella.

Se supondrá que la carretera a comparar es de asfalto y que su mantenimiento se realizará cada 2 años:

Costo anual de operación de 1 Km de carretera de 4 carriles por sentido = \$5,871,083.87

Costo anual de mantenimiento = \$443,520/2 \longrightarrow + \$221,760.00
\$6,092,843.87

Cuadro 50. Comparación de costos de operación y mantenimiento.

Costo de operación y mantenimiento anual			
Item	Unidad	Cantidad	Costo
Carretera de 4 carriles por sentido	km	1	\$6,092,843.87
Sistema PRT de 1 viga por sentido	km	1	\$365,322.77

Se ve, entonces, que el costo de operación y mantenimiento del sistema PRT será apenas una fracción de los costos de operar y mantener una carretera con igual capacidad.

4.7. Vehículos particulares que dejarían de circular

Antes de realizar la repartición modal del apartado 4.6.2.3., los viajeros entre las zonas estudiadas usaban dos modos: automóvil y bus.

El total de viajeros en la hora pico de la mañana es de 2,783 en modo automóvil y de 4,908 en modo bus, para un total de 7,691 pasajeros

Luego de incorporar el sistema PRT a la oferta de transporte, se tiene otra situación; algunos usuarios de automóvil y otros más de autobús pasarían a usar el modo de transporte PRT. Con una tarifa de ₡300/km, el sistema sería rentable y produciría una distribución modal como se ve en el cuadro siguiente:

Cuadro 51. Cambio proyectado en el uso de modo de transporte.

Modo	Viajeros en la hora pico de la mañana				Diferencia (Unidad)
	Sin PRT		Con PRT a ₡300/km		
	Porcentaje (%)	Cantidad (Unidad)	Porcentaje (%)	Cantidad (Unidad)	
Bus	63.81	4908	46.00	3538	-1370
Auto	36.19	2783	27.00	2077	-707
PRT	0.00	0	27.00	2077	2077
Total	100.00	7691	100.00	7691	0

Se ve que 707 personas dejarían de usar el vehículo particular en la hora pico de la mañana, número que, con una ocupación de 1.6 pasajeros por vehículo particular, da un total de:

$$707 \text{ personas} / 1.6 \text{ personas/vehículo} \approx 442 \text{ vehículos en hora pico}$$

$$\text{Factor diario/hora pico} = 10$$

$$442 \text{ vehículos en hora pico} * 10 = 4,420 \text{ vehículos diarios}$$

Generalizando este número a todo el día, con un factor de 10, se puede ver que, durante todo el día, dejarán de circular 4,420 automóviles en las zonas atendidas por la red del sistema PRT.



Figura 129. Sección de la red con el mayor flujo de vehículos modelada en Synchro 6.

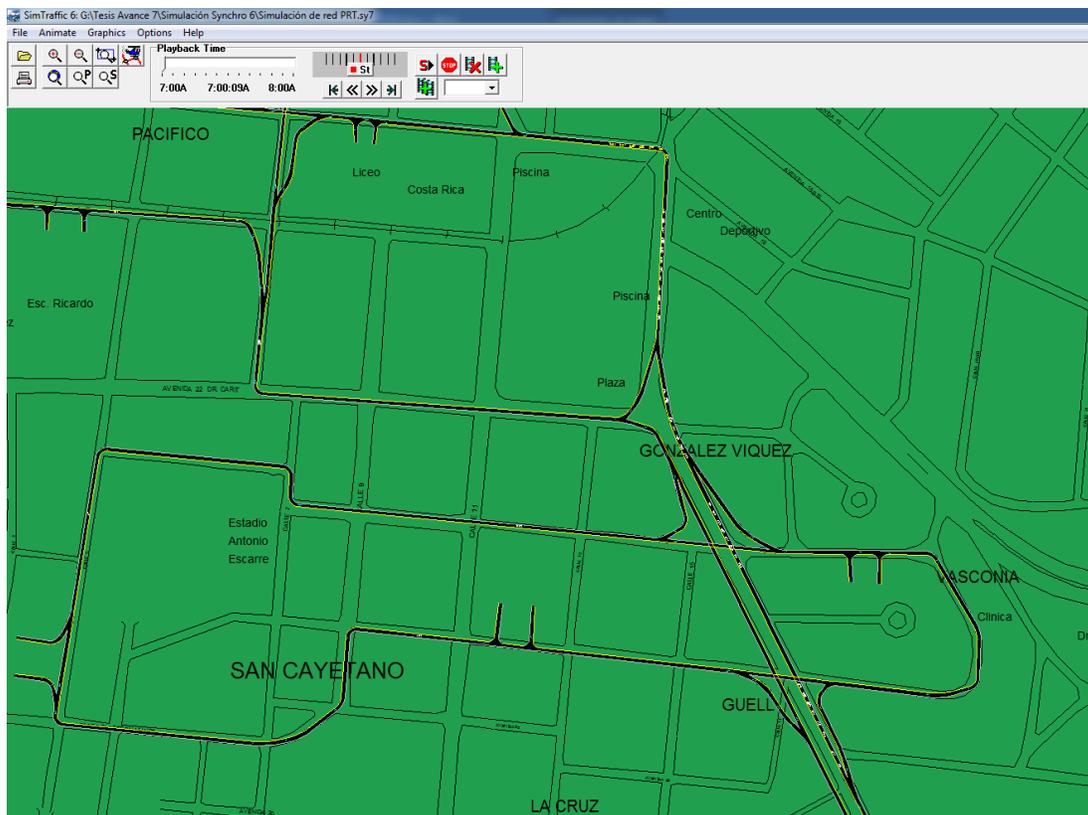


Figura 130. La misma sección simulada en Sim Traffic 6.

En la simulación se observa claramente la formación de pelotones de vehículos muy cercanos (Figura 131) y los espacios entre los grupos que permiten la incorporación del tránsito entrante, sin crear colas de espera en ningún punto de convergencia de vías (Figura 132 y Figura 133).

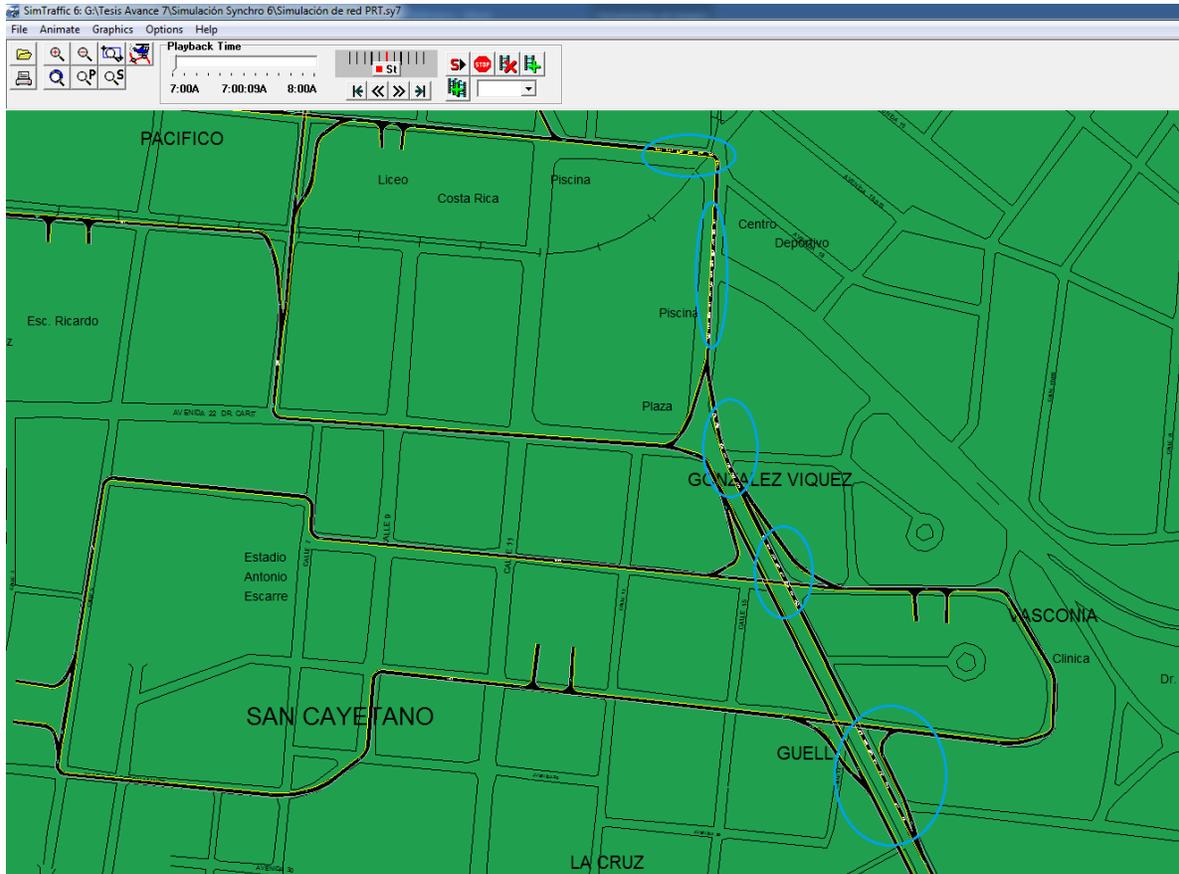


Figura 131. Formación de pelotones de vehículos.

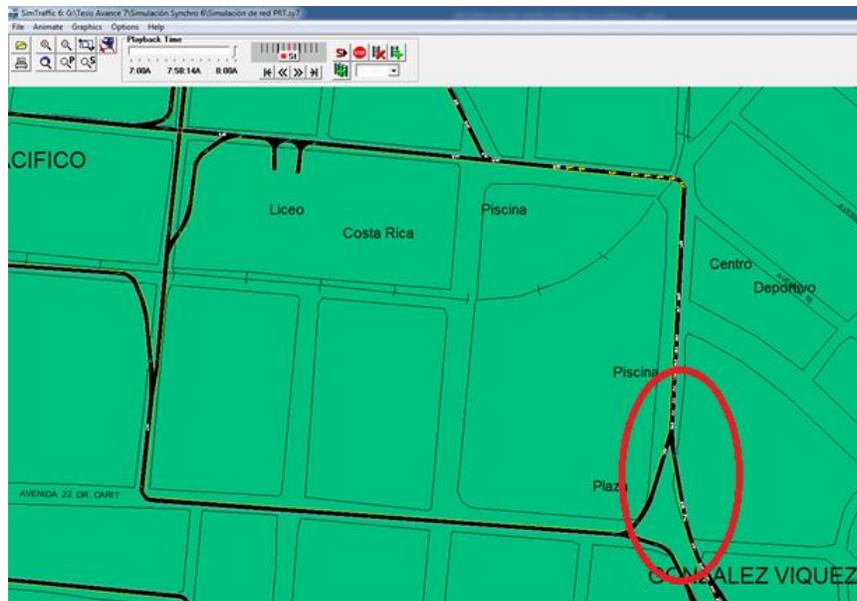


Figura 132. Convergencia de flujos en la intersección más transitada.

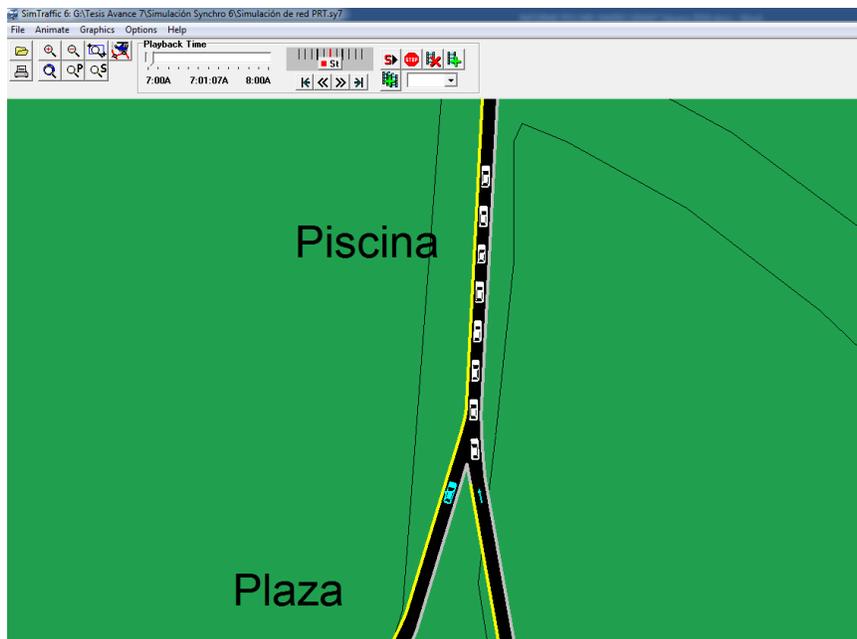


Figura 133. Convergencia de flujos sin formación de colas.

Los programas Synchro 6 y Sim Traffic 6 modelan los flujos de vehículos con los patrones de comportamiento aleatorio de los conductores individuales. El control computarizado del sistema PRT permitiría generar espacios entre los pelotones de vehículos organizadamente, para incorporar los flujos convergentes en intersecciones, de una manera incluso más fluida de como lo presentan los programas computacionales diseñados para modelar flujos vehiculares aleatorios.

4.9. Comparación del sistema PRT con otros sistemas de transporte.

Hasta ahora se ha resaltado que el propósito del sistema PRT es bajar la demanda de viajes por vehículo privado y no competir con, sino más bien complementar a otros medios de transporte público.

4.9.1. Capacidad de otros sistemas de transporte.

En el apartado “2.3.6.1. Capacidad del PRT”, se explicó que los sistemas PRT que operan hoy no se han concebido para tener una capacidad de transporte superior a la de una carretera, más, el sistema de PRT propuesto sí tendría una capacidad máxima teórica superior a cuatro veces la de una carretera y se puede comparar con la capacidad de otros sistemas de transporte masivo:

Cuadro 52. Capacidad de sistemas de transporte público para llevar pasajeros.

Modo de Transporte	Pasajeros por unidad	Unidades por tren	Intervalo promedio (Headway)	Vehículos por hora	Máxima capacidad una dirección	Capacidad dos direcciones
	(un)	(un)	(seg)	(vehículos)	(pasajero/h)	(pasajero/h)
Metro	320	8	120	30	76,800	153,600
Tren Ligero (LRT)	225	4	120	30	27,000	54,000
BRT Alta Gama (Bogotá)	270	1	21.5	167	45,209	90,419
PRT propuesto	4	1	0.3	8640	34,560	69,120

Fuente: Cervero, R. (2013)

Este Cuadro 52 se ha realizado suponiendo que el sistema PRT opere a su máxima capacidad, con todos los asientos ocupados, sólo para fines comparativos de la capacidad teórica con los demás sistemas de transporte. De acuerdo con esta comparación, el sistema PRT propuesto tendría una capacidad máxima teórica mayor que la de un tren ligero y que se acercaría a la de un sistema BRT de alta gama (con carriles exclusivos para los autobuses), con la ventaja de que el PRT no requeriría un terreno adicional al derecho de vía existente.

4.9.2. Comparación de costos.

Además de comparar la capacidad, se puede también comparar el costo de construcción y de mantenimiento de los sistemas de transporte público.

Cuadro 53. Costo de construcción y mantenimiento de sistemas de transporte público.

Modo de Transporte	Pasajeros por unidad	Unidades por tren	Intervalo promedio (Headway)	Vehículos por hora	Máxima capacidad una dirección	Capacidad dos direcciones	Costo promedio construcción	Costo de operación
	(un)	(un)	(seg)	(vehículos)	(pasajero/h)	(pasajero/h)	(M\$/km)	(M\$/km)
Metro	320	8	120	30	76800	153600	104.5	5.30
Tren Ligero (LRT)	225	4	120	30	27000	54000	21.5	7.58
BRT Alta Gama (Bogotá)	270	1	21.5	167	45209	90419	8.4	2.94
PRT propuesto	4	1	0.3	8640	34560	69120	6.83	0.37

Nuevamente, se ve una comparación ventajosa para el sistema PRT, con la menor inversión inicial y el menor mantenimiento, para ofrecer una gran capacidad de transporte.

Las tarifas de esos sistemas no se comparan entre sí porque, generalmente, los transportes masivos presentan subsidios para promover el patrocinio de los usuarios. El sistema PRT se propone para no recibir subsidios de tarifa y, aun así, competir favorablemente con el uso del vehículo privado en la suma de rapidez de viaje, tarifa aceptable y comodidad semejante.

4.9.3. Comparación de modos.

Existe un ámbito de acción ideal en el que se ha desarrollado cada medio de transporte actual, y esa idoneidad ha permitido que se conserve en uso hasta hoy. En ciertos casos, los ámbitos de algunos modos de transporte pueden mostrar un traslape parcial entre ellos, pero eso no implica la sustitución de un modo por el otro.

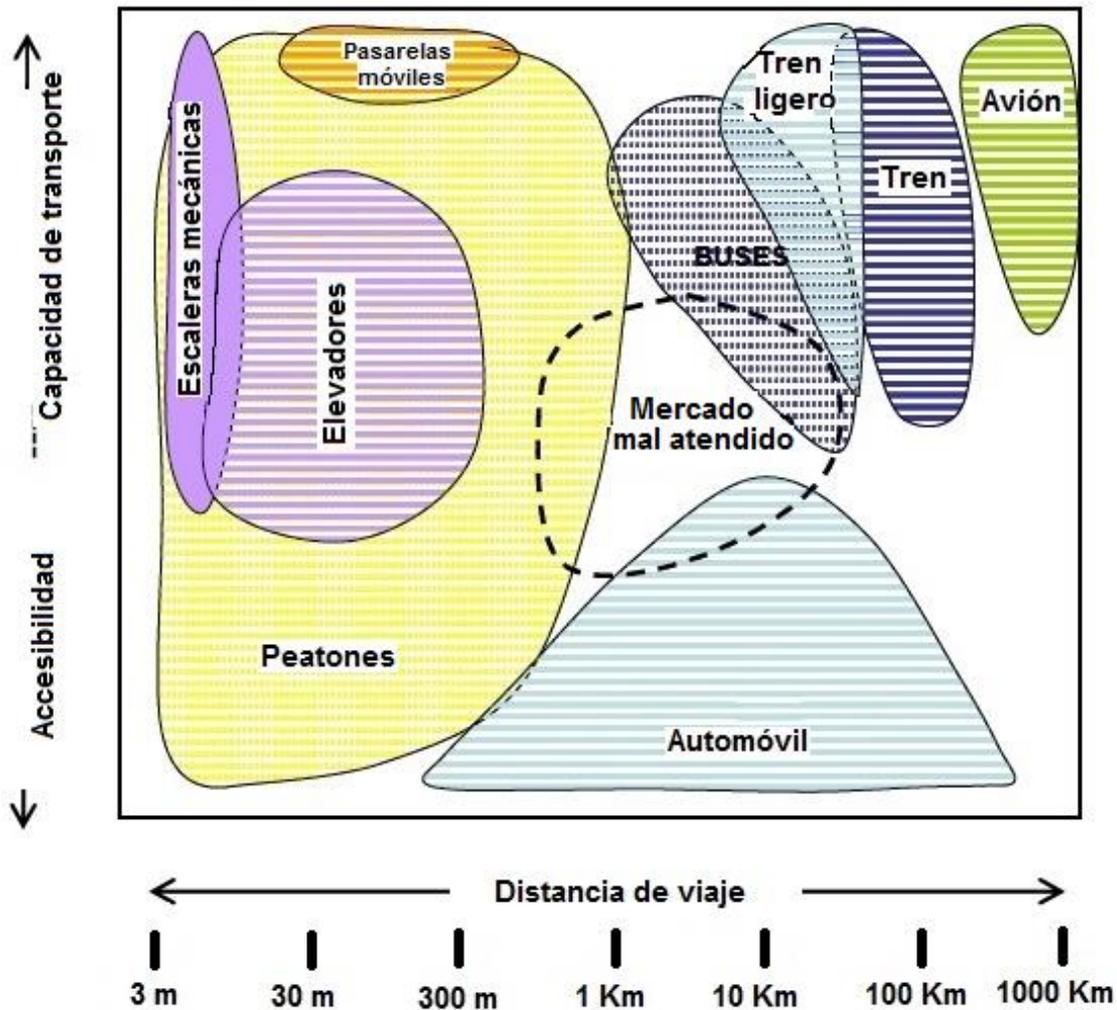


Figura 134. Comparación conceptual del espectro Accesibilidad-Capacidad para varios modos de transporte, de acuerdo con la distancia que deben recorrer los viajeros.

En la figura anterior se observa que, fuera de distancias peatonales, el automóvil es el modo de transporte con mayor accesibilidad, pero con poca capacidad de transporte; los buses, trenes y aviones tienen gran capacidad de transporte, pero poca accesibilidad. En el gráfico se ve un área no atendida, para un medio de transporte con accesibilidad de buena a mediana; con capacidades medias y para distancias de pequeñas a medianas.

El sistema PRT propuesto sería apropiado para cubrir ese mercado no atendido porque:

- Tendría una velocidad de cruceo mediana (60 kph), apta para entornos urbanos.
- Con capacidad de transporte de mediana a alta, de acuerdo con la separación mínima que sea permitida entre los vehículos.
- Serviría en viajes a distancias mayores de 200 metros, pues las estaciones se encontrarían a distancias promedio de 400 m y distancias menores a 100 kilómetros. Esto último se debe a que es conveniente que las personas no realicen viajes sentados ininterrumpidamente por periodos mayores a una hora, para prevenir la formación de coágulos sanguíneos; con velocidades de cruceo de 60 Km/h, la distancia máxima a recorrer entre dos puntos de una red PRT sería de 60 Km. La distancia en línea recta entre San Ramón de Alajuela y Paraíso de Cartago es de 70 Km entonces, la red del sistema PRT y su crecimiento futuro estaría inscrita dentro de la Gran Área Metropolitana.
- Aunque tendría una capacidad máxima teórica muy cercana a la de los sistemas de buses BRT y mayor a la del tren ligero (ver Cuadro 52 y Cuadro 53), el costo más elevado de la tarifa no subsidiada del PRT lo colocaría lejos de ser una competencia directa de los buses y más bien podría complementarlos, como se verá en el apartado “4.9.5. *Promoción de viajes multimodales*”. El BRT y el PRT son comparables en capacidad teórica, como se ve en el Cuadro 52.; en precio no lo son, porque es mucho más barato el autobús actual y, aunque al momento actual (setiembre 2019) no se ha publicado tarifa para el BRT de Costa Rica, se espera que se mantenga en el mismo rango de precio del autobús y con mejor servicio. En principio, ambos sistemas están pensados para atender a segmentos diferentes: el BRT a usuarios actuales de autobús con presupuesto limitado y el PRT a los de auto privado que rutinariamente pueden gastar más.

Si en el gráfico anterior se dibujara el ámbito en que se desarrollaría el sistema PRT, resultaría como se muestra en la Figura 135:

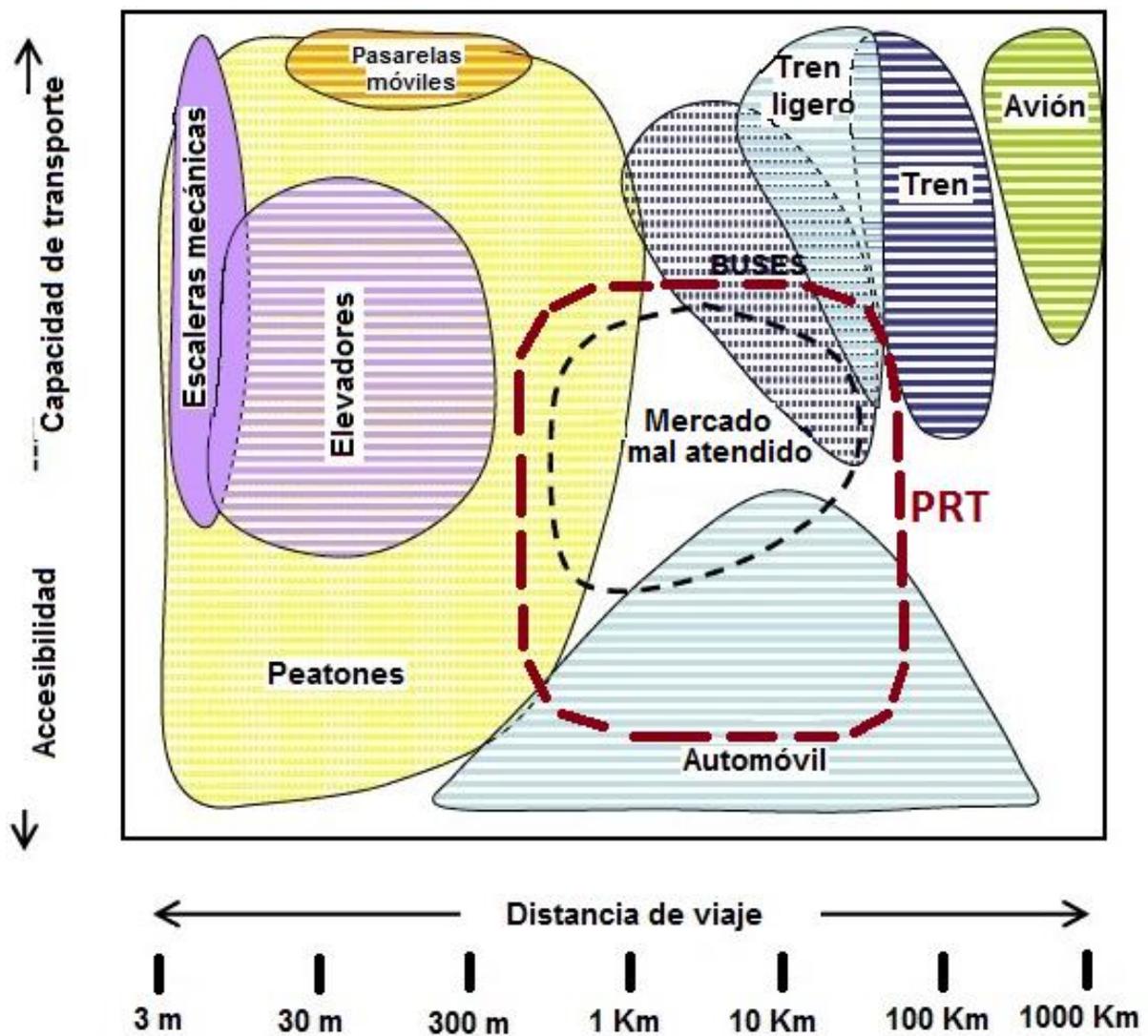


Figura 135. Mercado meta del sistema PRT.

4.9.4. Ámbitos de uso del sistema PRT

Con base en la información que se resume en la Figura 134 y la Figura 135, se tiene que los transportes públicos ofrecen una accesibilidad limitada y, además:

- El autobús tiene capacidades medias y altas para el recorrido de distancias medias.
- El tren ligero tiene capacidad alta para recorridos medios.
- El tren grande tiene muy alta capacidad para recorridos largos.
- El avión tiene muy alta capacidad para recorridos muy largos.
- El sistema PRT tendría muy buena accesibilidad y una capacidad media y alta para recorridos medios.

- El automóvil privado ofrece gran accesibilidad y baja capacidad para todo tipo de distancia de viaje.

Se puede aprovechar las ventajas de cada uno de los modos de transporte público existentes para que, formando una red entre ellos, permitan prescindir por completo del auto particular, como se verá a continuación:

4.9.5. Promoción de viajes multimodales

Uno de los atractivos que tiene el uso del vehículo particular sobre el transporte público, es la posibilidad realizar un viaje de puerta a puerta. El sistema PRT llevaría rápidamente a los viajeros a estaciones que podrían estar en su destino final, pero en el caso contrario, el pasajero debería caminar o tomar otro medio de transporte para el último trayecto de su viaje. Los modos más prácticos son:

- Caminar desde la estación PRT hasta el destino final.
- Llevar una bicicleta en el vehículo PRT y usarla para llegar hasta el destino final.
- Tomar un taxi en la última parada PRT.

Cualquier otro medio de transporte público puede mejorar su accesibilidad mediante la red del sistema PRT, que funcionaría como alimentadora de autobuses, teleféricos, trenes y trenes subterráneos.

Mediante aplicaciones móviles se puede coordinar con otros medios de transporte, como se verá a continuación.

4.9.6. Aplicación móvil

Una posible estrategia de simbiosis con el sistema de taxis de Costa Rica es la utilización de una aplicación móvil, promovida por el sistema PRT, que permita al usuario utilizar el sistema PRT y, a la vez, llamar un taxi que lo espere en la estación donde termina su viaje en el sistema PRT y que lo lleve a su destino final; el sistema le avisaría al taxista la hora y el lugar de llegada del pasajero a recoger.

Funciones adicionales, introducidas gradualmente a esa aplicación móvil, permitirían coordinar con otros modos de transporte público, sean o no masivos, que se vayan incorporando al sistema de información del PRT, como trenes, teleféricos y autobuses. Algunos ejemplos son la aplicación Rejseplanen de Dinamarca (www.rejseplanen.dk), Hyperdia y Jorudan de Japón (www.jrailpass.com), que coordinan el recorrido caminando, viajando por taxi, por autobús y tren, para viajar de un origen a un destino y escogiendo la combinación de modos para hacer el viaje más rápido, o el menos costoso, o el más corto en distancia (generalmente, el más ecológico).

4.9.7. El uso del sistema PRT como alimentador de otros modos de transporte.

El sistema PRT serviría como un alimentador de sistemas de transporte masivo, llevando con rapidez los pasajeros desde y hacia las estaciones de:

- Tren Rápido Metropolitano. La pequeña red propuesta en este ejemplo se conecta con las dos estaciones principales del sistema ferroviario.
- Estaciones de autobús regionales.
- Sistema sectorizado de autobuses del área metropolitana, pudiendo sustituir algunas rutas alimentadoras, especialmente en los horarios en que no hay servicio de buses.
- Sistemas de teleférico que se puedan establecer en la zona del sistema PRT.

4.9.8. Creación de estaciones en sitios públicos y privados

La atracción de viajes que ejercen instituciones públicas como:

- Ministerios
- Hospitales
- Instituciones autónomas
- Universidades
- Escuelas y colegios.
- Municipalidades y centros cívicos
- Aeropuertos
- Parques y estadios,

además de lugares privados que también atraen muchos viajes como:

- Centros comerciales.
- Centros de diversión y turísticos.
- Centros de oficinas
- Instituciones educativas privadas,

crean actualmente situaciones de congestión vehicular, que dificultan y/o restan disfrute a la experiencia en esos lugares.

Dependiendo de la cantidad de usuarios potenciales, es factible la instalación de estaciones del sistema PRT en esos lugares, facilitando su acceso.

No siempre es necesario construir nuevas edificaciones para crear estaciones PRT, se pueden adaptar espacios en edificios existentes, especialmente en terceros pisos, que tendrían un nivel semejante a la altura de viaje de los vehículos PRT.

También hay muchos edificios en el centro de las ciudades que se encuentran parcialmente vacíos y podrían servir para instalar andenes de abordaje/desabordaje, eliminando la necesidad de construir algunas estaciones en sitios muy congestionados y, a la vez, dando un nuevo uso e interés comercial

a tales edificios pues, las primeras plantas podrán albergar comercios y servicios para atraer a los viajeros del sistema PRT.

Algunas estaciones dejarían de funcionar en los horarios en que los sitios públicos y privados que las alojan cierran sus puertas; las computadoras centrales del sistema PRT no enviarían vehículos a las estaciones cerradas, sino a las que se encuentren más cercanas al sitio de interés, pero dentro de la vía pública.

4.9.9. Conocimiento de los patrones de viajes

La información que los usuarios introduzcan en el sistema PRT cuando piden un vehículo para viajar entre estaciones, se puede recolectar para construir patrones de flujo de viajeros y predecir:

- Adónde y cuándo se requiere un mayor número de vehículos vacíos para atender la demanda de viajes.
- Si fuera conveniente establecer viajes de ruta fija con vehículos más grandes, tipo Group Rapid Transit (GRT) y en cuáles horarios.
- Adónde se necesita un mayor número de andenes, estaciones y depósito de vehículos en espera.

También, la información recolectada mediante la aplicación móvil mencionada en el apartado 4.9.6., ayudará a identificar orígenes y destinos del interés de los viajeros, hasta los que sea conveniente alargar el sistema e instalar nuevas estaciones del sistema PRT.

4.9.10. Transporte de mercancías

Especialmente en horario no pico, se puede aprovechar la capacidad de transporte del sistema PRT en el movimiento de mercancías, con ayuda de contenedores o tarimas (paletas o “pallets”) diseñados para los espacios internos de los mismos vehículos, dándoles un doble uso. Conforme se desarrolle el mercado de transporte de carga, se pueden introducir vehículos especiales para este fin. Esto permitiría a los comercios tener un inventario mínimo y con elementos frescos, porque se pueden reabastecer con rapidez una o varias veces al día, con la facilidad que les ofrecería este sistema.

4.9.11. Uso de la red con vehículos de emergencia.

La rapidez de transporte en zonas congestionadas que ofrecerá el sistema PRT, podría ser aprovechada para vehículos PRT equipados como ambulancia. En los hospitales se instalarían andenes aparte del servicio regular de pasajeros, para uso exclusivo de las ambulancias. En caso necesario, el control central del sistema PRT le generaría una ruta preferencial a la ambulancia, desviando a otros vehículos con menos prioridad por otras rutas.

4.9.12. Crecimiento orgánico y planificado de la red PRT

La red del sistema PRT se puede desarrollar gradualmente, por etapas, iniciando en los corredores y zonas con mayor demanda de viajes y extendiéndose gradualmente hacia las zonas menos generadoras o atractoras de viajes. De esa forma, no sería necesario recurrir a grandes subsidios para financiar la construcción y operación. Además, el PRT es una tecnología novedosa, que requiere un proceso de aprendizaje de parte de los proveedores del servicio y otro proceso de familiarización para los usuarios.

Como una estrategia para el desarrollo del sistema PRT, se puede proceder de la siguiente manera:

4.9.12.1. Etapa 1. Desarrollo de prototipo operacional de la Red PRT.

Este prototipo se puede desarrollar en un ambiente autocontenido, como un campus universitario, un aeropuerto, un complejo hospitalario, un centro de oficinas o un centro comercial. En esta etapa se prueba la maquinaria (*hardware*), los programas de control (*software*) necesarios para su operación y las interfaces del sistema con los usuarios.

4.9.12.2. Etapa 2. Inicio de aplicación comercial.

Luego de completadas las pruebas del prototipo, se unen dos o más destinos con vías troncales que sirvan de base para el crecimiento de una red. Los destinos iniciales deben poseer un poder de generación y atracción de viajes relativamente grande: distritos comerciales, centros de estudio, hospitales, oficinas gubernamentales, grandes paradas de autobús o ferrocarril.

4.9.12.3. Etapa 3. Calibración paulatina de los parámetros de funcionamiento.

La velocidad de operación y el intervalo mínimo de separación entre vehículos se pueden modificar gradualmente, desde valores más conservadores hacia aquellos que mejoren paulatinamente la capacidad del sistema, conforme se van ajustando y comprobando los sistemas de control y de seguridad. Por ejemplo, se puede comenzar operando a velocidades bajas y, a pesar de ello, obtener mayores capacidades de transporte de vehículos que un carril de carretera continua. En el Cuadro 54 se muestra la variación en la capacidad de transporte del sistema, conforme se aumenta la velocidad de operación y se disminuye el intervalo de seguimiento entre los vehículos PRT:

Cuadro 54. Capacidad máxima teórica de vía PRT para varias velocidades de operación.

Velocidad de operación PRT	Intervalo de seguimiento o "Headway" (H)	Distancia (D)	Separación mínima entre vehículos PRT de 4 m de longitud	Volumen máximo teórico de vía PRT (Ecuación 4.5.)
(Kph)	(seg)	(m)	(m)	(Veh/hora)
20	0.9	5	1	2880
25	0.72	5	1	3600
30	0.6	5	1	4320
35	0.51	5	1	5040
40	0.45	5	1	5760
45	0.4	5	1	6480
50	0.36	5	1	7200
55	0.33	5	1	7920
60	0.3	5	1	8640

Las velocidades y la capacidad de transporte y de las estaciones se aumentarían una vez que las pruebas, los ajustes y las estadísticas de uso aumenten la confianza de los técnicos que construyan y operen el sistema, así como también la del público usuario. Este proceso de ajustes se puede realizar en un periodo de entre 9 meses y 3 años (Gronning, R. 2009).

4.9.12.4. Etapa 4. Expansión de la red entre nodos importantes.

Después de establecer varios nodos primarios y, conforme aumenta la demanda de viajes, se procede a densificar las vías del sistema PRT a modo de red, para permitir la comunicación más directa entre orígenes y destinos, sin necesidad de ingresar a los nodos principales, que siempre van a tener más demanda de viajes y tender más a la saturación.

4.9.12.5. Etapa 5. Expansión hacia nuevos nodos primarios.

Es volver a repetir las etapas 2, 3 y 4 de forma sucesiva, hasta lograr una cobertura del servicio en todas las zonas con potencial comercial.

4.9.12.6. Etapa 6. Integración intermodal.

En el apartado 4.9.5., se explica el uso del sistema PRT como integrador para crear una red de medios de transporte público que permita un viaje entre origen y destino de puerta a puerta, sin necesidad de usar el vehículo privado. Esta etapa se puede realizar de manera simultánea con la Etapa 4.

4.9.12.7. Etapa 7. Introducción de vehículos PRT de emergencia.

Cuando se haya consolidado el uso de la red se podrán introducir nuevos servicios, como los vehículos PRT tipo ambulancia, estacionados en los hospitales y centros de Cruz Roja, que se desplazarían por toda la red hasta donde sean requeridos.

4.10. Consideraciones paisajísticas del Sistema PRT

El sistema PRT está pensado para desarrollarse dentro del derecho de vía pública, que actualmente está compartido por peatones, acceso a viviendas y comercios; vehículos de transporte privado, de transporte público, de carga y, también, por infraestructura de transmisión eléctrica, de iluminación y de comunicaciones. Cada una de esas actividades ocupa un espacio en algún nivel del derecho de vía.

Si bien cada sitio de instalación del sistema PRT tendrá sus condiciones particulares y retos por resolver, se pueden prever soluciones para casos generales:

4.10.1. Afectación al paisaje.

Desde los primeros días en que se ha propuesto la instalación de sistemas de transporte tipo PRT elevados en ambientes urbanos, se ha producido controversia de parte de grupos que sostienen que tales sistemas afearían las ciudades como, en su momento, lo hicieron los trenes elevados en las ciudades industriales, a principios del siglo XX. Este es un aspecto subjetivo, que **debe valorarse en cada caso** particular y en cada sector, de cada ciudad en la que se instalen estos sistemas.

Debe evitarse desarmonizar el entorno de edificios y sectores históricos de las ciudades, construyendo infraestructura que no respete el estilo del lugar, pero en ese aspecto, las ciudades de la GAM de Costa Rica no poseen grandes distritos históricos y el sistema PRT está pensado para atraer viajeros desde orígenes de viaje ubicados hasta a 200 metros de la línea o estación. Con esas condiciones, será posible acercar el sistema hasta los lugares de interés de los viajeros, sin demeritar el entorno histórico y arquitectónico.

4.10.2. Falta de espacio en las aceras.

El sistema PRT se encontrará elevado sobre columnas, cuyas secciones transversales ocuparían espacio sobre las aceras. Para evitar un exceso de columnas y postes, se le daría un carácter de uso múltiple a las columnas y también a las vigas del sistema PRT, lo que permitirá prescindir de algunos de los postes instalados actualmente en las aceras; por ejemplo:

- Instalación del alumbrado público en las columnas del sistema PRT. Ya que serán columnas con una altura promedio de 9 metros, podrán también servir de soporte a las luminarias de la calle. Entonces se eliminan de las aceras los postes y columnas redundantes.
- Las columnas podrían ser tan intrusivas como las del sistema SIPEM H-Bahn que se explica en la introducción, con secciones de alrededor de 70x70 cm. En caso necesario, se tomaría parte del espacio que hoy sirve de estacionamiento con boleta en las calles de las ciudades, para instalar postes y estaciones sin edificación (Tipo 2), sin estrechar las aceras.
- Uso del espacio interno de las vigas para llevar tendidos de cables telefónicos y de fibra óptica. Con esto se pueden eliminar los postes que actualmente llevan cables telefónicos,

coaxiales y fibra óptica. Las fibras y cables se encontrarán protegidos de los elementos y se pueden rentar a las compañías de comunicación y de televisión por cable para allegar más recursos que amorticen la infraestructura.

- En las zonas muy congestionadas, en vez de construir grandes estaciones, se favorecerá el uso de edificios existentes de tres o más pisos, acondicionados para funcionar como estaciones de múltiples andenes, para tampoco tener que ocupar mayor espacio en la vía pública (Figura 139).

4.10.3. Alineamiento con las construcciones existentes.

No se prevén problemas de alineamiento con las construcciones adyacentes al paso del sistema PRT, porque se procurará alinear las columnas de soporte con el borde de la calle, como hoy sucede con los postes de alumbrado público; los vehículos eléctricos y silenciosos viajarán bajo la viga, a una separación suficiente para evitar colisiones con las columnas y las construcciones (ver Figura 100 y Figura 136). De esta forma se evitará afectar a las propiedades vecinas al proyecto.

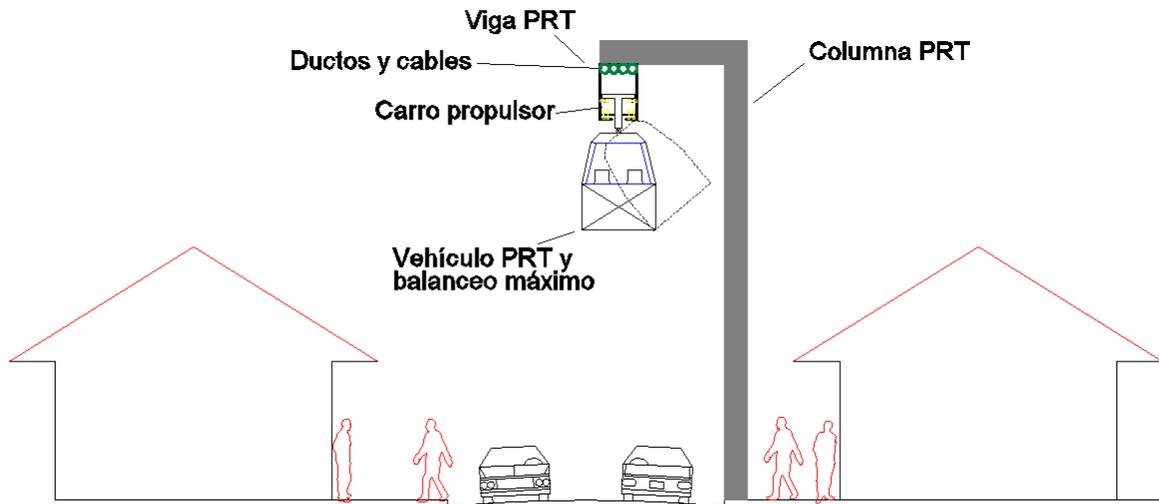


Figura 136. Vía PRT en una calle estrecha típica, con un sentido de circulación PRT.

Otros posibles acomodos del sistema PRT en espacios reducidos se muestra en las siguientes figuras:

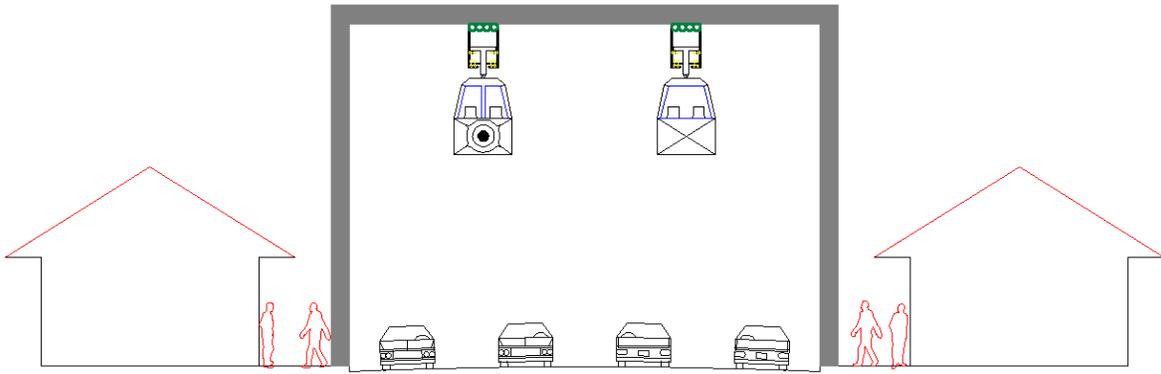


Figura 137. Dos vías PRT paralelas, con doble sentido de circulación.

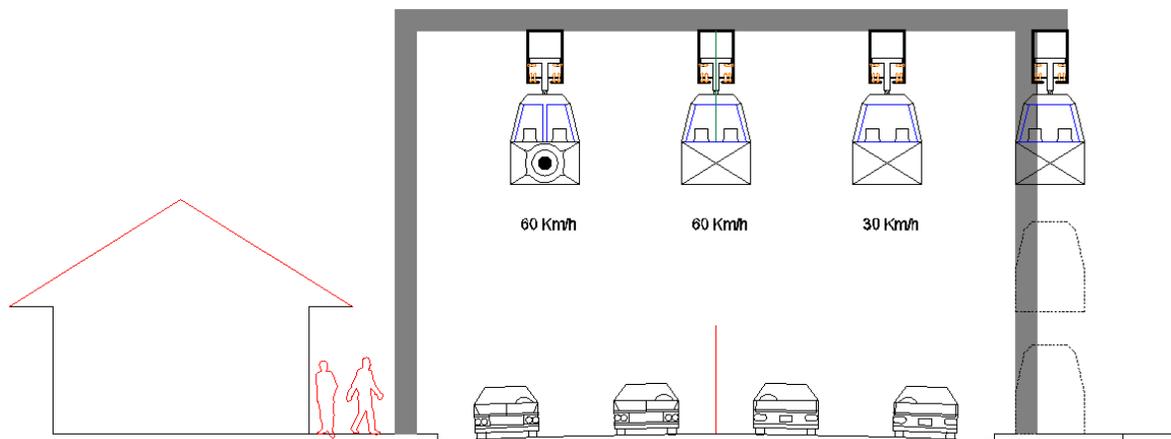


Figura 138. Dos líneas PRT de media velocidad, una de baja velocidad y estación sin edificación.

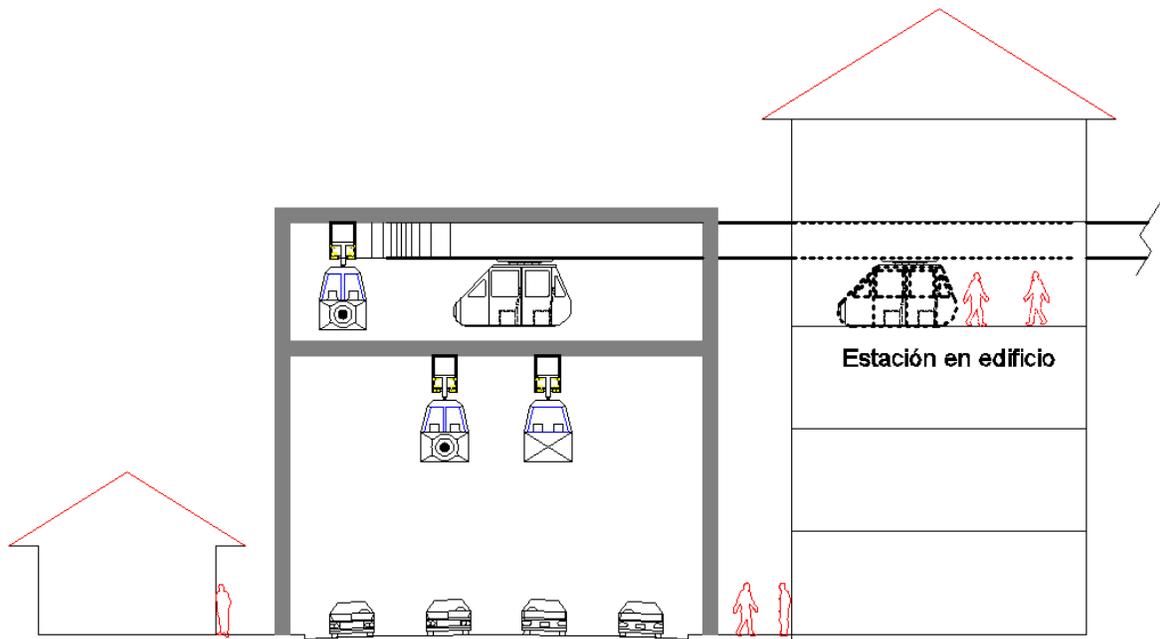


Figura 139. Estación PRT en edificio alto y vías PRT en varios niveles.

4.10.4. Coexistencia del sistema PRT con la red de distribución de electricidad.

Los tendidos eléctricos de media y alta tensión se pueden colocar en extensiones de las columnas PRT, que estarán separadas a distancias de 25 metros, de manera semejante a los postes que utilizan actualmente como sostén (ver Figura 140).

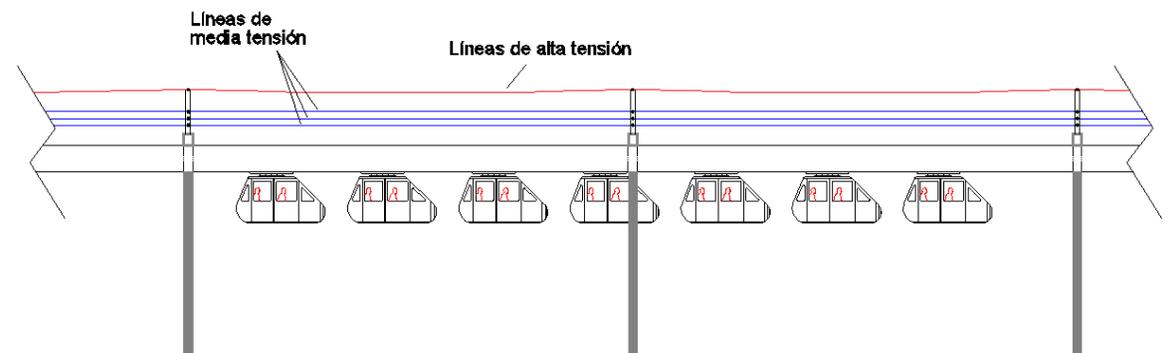


Figura 140. Líneas eléctricas de media y alta tensión sobre columnas PRT.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Capacidad de transporte del sistema PRT

Se escogieron las características de un sistema PRT dentro de lo que al día de hoy es técnicamente posible y se determinó que su capacidad máxima teórica de transporte, de **8,640 vehículos/hora/vía**, es cuatro veces superior a la de una carretera continua de un carril por sentido que ocupa un mayor derecho de vía. Los viajeros del sistema PRT podrían viajar sin interrupciones a una velocidad de cruce de 60 Km/hora, en un sistema que ofrece mayor seguridad, por estar separado del tráfico vehicular y peatonal regular.

Hasta ahora, en el mundo se han construido sistemas automáticos de transporte de personas que se han enfocado en la automatización para economizar en contratación de personal operativo y no en crear un sistema que supere la capacidad del modo de transporte automóvil. Es mejor desarrollar este nuevo sistema que conjugue todos los elementos necesarios para aprovechar las ventajas de capacidad y costo que ofrece el concepto PRT.

5.1.2. Mercado de usuarios potenciales

Para la red modelada y de acuerdo con los cálculos realizados mediante el modelo Logit desarrollado para el Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035 (INECO, MOPT 2011), se determinó que existe un mercado de 7,691 viajeros que, en la hora pico, se desplazan en automóvil y bus entre los distritos centrales de los cantones de San José y Desamparados como mercado meta del sistema PRT. De esas 7,691 personas, 2,059 viajarían por el sistema PRT en 1,287 vehículos automatizados.

Con los factores conocidos de las redes de tránsito, estos valores se pueden extender a todo el día, resultando un número de 20,590 viajeros en 12,870 vehículos PRT por día.

Además, se determinó que este número de usuarios del sistema PRT sería suficiente para financiar su construcción, operación y mantenimiento.

5.1.3. Cantidad de vehículos particulares que pueden dejar de circular

El modelo de asignación modal determinó que, con la puesta en marcha del sistema PRT, 707 personas se cambiarían de viajar en auto durante la hora pico, al nuevo sistema; con una tasa de ocupación de 1.6 pasajeros/auto, significa que saldrían de circulación dentro del área de influencia estudiada, 490 vehículos particulares en la hora pico y 4,900 vehículos en todo el día.

5.1.4. Comparación de capacidad de transporte de pasajeros de una carretera y del sistema PRT

El sistema PRT tendría una capacidad máxima teórica de movilizar 8,640 vehículos/hora, por cada vía; la capacidad máxima de una carretera continua es de 2,000 vehículos/hora por cada carril. Una sola vía del sistema PRT tendría la capacidad de una carretera de 4 carriles.

5.1.5. Costo de construcción del sistema PRT

Se estimó el costo por kilómetro inicial del sistema PRT con todo y vehículos en \$ **6,832,875.00/km**, dólares estadounidenses. Este costo es apenas un 19.46 % de aquel de una carretera de igual capacidad, que no incluye los vehículos, cual es \$ 35,119,939.24/km, incluyendo la compra del derecho de vía.

5.1.6. Estrategias de uso del sistema PRT

Durante la operación continuada del sistema PRT, el computador central podrá recopilar:

- La información correspondiente a los orígenes y destinos de cada viaje.
- Los horarios de esos viajes y las frecuencias de viaje en cada día del año, incluyendo fechas especiales.

Esta información del sistema PRT permitiría crear una base de datos para:

- Planificar la infraestructura necesaria en cada sitio.
- Determinar la flota necesaria cerca de cada estación.

Esa misma centralización de la información facilitaría la incorporación de aplicaciones móviles para coordinar el uso de taxis y otros modos de transporte que lleven al viajero a su destino final de una manera:

- Multimodal.
- Coordinada.
- Rápida.
- Segura.

Una ventaja adicional de tener una aplicación móvil que integre al sistema PRT con otros medios de transporte es que permitiría recolectar la información precisa de los deseos de viaje más allá de las estaciones PRT, con lo cual se podrá inclusive planificar la expansión del sistema con mucha mayor precisión.

La gran capacidad que puede desarrollar el sistema PRT permitiría usar la red para transporte de carga, especialmente en horarios no pico y obtener mayores réditos por el uso más constante de los equipos.

La agilidad de viajar en el sistema PRT sin paradas entre el origen y el destino final, se puede aprovechar también para movilizar vehículos PRT equipados para atender emergencias, como el caso de ambulancias.

El arrendamiento de los espacios internos de las vigas de soporte del sistema PRT y hasta servicio de fibra óptica para las empresas de televisión por cable y comunicaciones, permitirá allegar más recursos monetarios para el desarrollo y operación del sistema.

5.1.7. Implementación gradual del sistema.

La implementación del sistema por etapas sucesivas, permitirá el desarrollo progresivo de: los sistemas, de la estrategia para el manejo de la flota, de las interfaces con el usuario; resolviendo los problemas conforme se vayan identificando y teniendo presente siempre, como metas a lograr, lo siguiente:

- Dar la máxima seguridad al usuario y al público en general.
- Desarrollar la mayor capacidad del sistema, que satisfaga la necesidad de transporte de los usuarios.
- Obtener los resultados con el menor uso de recursos, con mayor eficiencia.

5.1.8. Poca probabilidad de congestión en el sistema PRT

De acuerdo con los cálculos realizados, en la red que se ha estudiado en este caso, durante la hora pico se tendría un patronazgo suficiente para mantener el sistema PRT de 2,059 viajeros/hora, que usarían 1,287 vehículos/hora; una cantidad mucho menor que el máximo teórico de 8,640 vehículos/hora. Cualquier aumento en el número de viajeros, aumentaría tempranamente los ingresos y permitirían efectuar anticipadamente las ampliaciones en los puntos que se identifiquen como cuellos de botella dentro del sistema PRT.

5.1.9. Potencial del sistema PRT para mejorar el ornato

La necesidad de ocupar un espacio entre los 6 y 9 metros sobre el suelo de la vía pública, obliga a reordenar las líneas eléctricas y de comunicaciones que van paralelas y transversales a la vía, para liberar el espacio por el que viajarían los vehículos PRT. La relocalización de todos esos cables se puede negociar con sus propietarios, para que los instalen en los espacios libres dentro y sobre las columnas y vigas de soporte del sistema PRT, como se explica en el apartado 4.10. “*Consideraciones paisajísticas del Sistema PRT*”. Además de esconder los cables, se podrán retirar los postes que actualmente sirven de sostén a esos cables y todo ello dará una mejor presentación y orden en las vías por donde circule el sistema PRT.

En conclusión, el paisaje se tornaría más placentero, con una infraestructura más ordenada de la que hoy existe en la mayoría de las ciudades de Costa Rica.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Inversión en el desarrollo del sistema PRT en Costa Rica

En vista de la ventaja de ofrecer una alta capacidad de transporte, con mayor seguridad, menor contaminación ambiental y por un costo mucho menor al de una carretera comparable, se recomienda invertir en el desarrollo de un sistema PRT para Costa Rica, primero en su mayor aglomeración urbana, la Gran Área Metropolitana (GAM). Esto incluye realizar evaluaciones adicionales, comparaciones con otros medios de transporte adicionales, desarrollo de prototipos, integración de equipos y sistemas de control, no incluidos en los alcances de este proyecto.

Y se debe desarrollar el sistema y no comprar uno de los ya existentes, porque el enfoque de los existentes ha sido economizar gastos operativos de los conductores y personal mediante la automatización, dejando de lado el necesario aumento de la capacidad de transporte y, ese sería el fin principal de este desarrollo: un aumento notorio de la capacidad de transporte con un mínimo de inversión, para ofrecer una mejor alternativa en costo y tiempo a los usuarios de vehículo privado.

5.2.2. Entidad promotora del sistema PRT.

Es conveniente crear una entidad para desarrollar el sistema PRT en Costa Rica, dentro del Gobierno (un departamento, una dirección o una institución), que NO dependa financieramente del grupo de instituciones que actualmente regulan el transporte público y ferroviario, para evitar lo que sucedió en los EEUU durante los años 60's y 70's del siglo XX, cuando la *Urban Mass Transportation Administration* (UMTA) financió los programas de desarrollo de sistemas PRT y, a la vez, administraba las redes de infraestructura y las actividades de los proveedores de transporte (Anderson, J., 2009); con el problema de que los fondos para el PRT fueron desviados hacia inversiones en los sistemas y tecnologías ya existentes. Entonces, el financiamiento para el desarrollo del sistema PRT en Costa Rica NO debe estar bajo la influencia, ni en manos del Consejo de Transporte Público, del Consejo Nacional de Vialidad, ni del Instituto Costarricense de Ferrocarriles, para que los fondos no sean desviados a los quehaceres rutinarios de tales entidades.

Un buen ejemplo de organización institucional para el avance tecnológico, independiente de los avatares políticos y que también es de los EEUU, fue la creación en 1915 del Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (National Advisory Committee for Aeronautics - NACA), que fue una entidad dedicada a la investigación y el desarrollo de tecnología aeronáutica, regentada por técnicos y funcionarios de carrera en vez de políticos y que, más tarde, se convertiría en la NASA (National Aeronautics and Space Administration).

5.2.3. Implementación gradual del sistema.

Se recomienda seguir un proceso gradual de desarrollo e implementación, para que el sistema se inicie y crezca de la forma más fácil y natural para el medio y los usuarios, de acuerdo con lo que se explica en el apartado 4.9.12 “*Crecimiento orgánico y planificado de la red PRT*”, en un proceso de 7 etapas:

- Etapa 1. Desarrollo de prototipo operacional de la Red PRT.
- Etapa 2. Inicio de aplicación comercial entre nodos importantes.
- Etapa 3. Calibración paulatina de los parámetros de funcionamiento.
- Etapa 4. Densificación de la red entre nodos importantes.
- Etapa 5. Expansión hacia nuevos nodos primarios.
- Etapa 6. Integración intermodal.
- Etapa 7. Introducción de vehículos PRT de emergencia.

Se ha mencionado un campus universitario como un sitio ideal para introducir el sistema PRT en sus primeras etapas y resolver allí sus primeros detalles técnicos, porque los estudiantes universitarios poseen los niveles educativos más altos de una población y están en un proceso formativo, que abre sus mentes a aceptar nuevos conceptos.

5.2.3.1. Sector inicial del sistema PRT

En esta investigación se examinó el corredor San José-Desamparados, que no presenta demasiados viajeros en automóvil privado entre ellos, aunque sí ofrece un número de viajeros suficiente para sostener financieramente al sistema PRT, sin necesidad de subvenciones.

Para la zona estudiada de la GAM, se recomienda que el primer trazado del sistema PRT de uso comercial incluya, como mínimo, la red propuesta en la Zona Central de San José (distritos Carmen, Merced, Hospital y Catedral) para conectar los siguientes puntos que, de acuerdo con las matrices de Origen-Destino, son grandes generadores y atractores de viajes:

- Estaciones de ferrocarril.
- Estaciones de autobuses regionales.
- Hospitales.
- Oficinas gubernamentales.
- Centros académicos.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2getthere. www.2getthere.eu

Advanced Transit Association. www.advancedtransit.org/

Aerospace Corporation (1980). *The Aerospace Corporation: its work, 1960-1980*. Aerospace Corp. El Segundo, California.

Ait El Menceur M.O., Pudlo P., Découfour N., Bassement M., Gillet C., Chateauroux E., Gorce P., Lepoutre F.X. (2006). AN EXPERIMENTAL PROTOCOL TO STUDY THE CAR INGRESS/EGRESS MOVEMENT FOR ELDERLY AND PATHOLOGICAL POPULATION. Université de Valenciennes, Valenciennes, France. LBMH, LRE_T32-INRETS, Bron, France.

Alonso, J. (2015). SkyTran: el “aerotaxi” que cambiará nuestras ciudades ya está aquí. www.abcblogs.abc.es/proxima-estacion/otros-temas/viajar-skytran-taxi-aereo-israel.html

Anderson, J. (1996). Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit. Conference on PRT and Other Emerging Transit Systems, Minneapolis.

Anderson, J. (1998). Control of Personal Rapid Systems. *Journal of Advanced Transportation*, 32:1, 57-74. www.hindawi.com

Anderson, J. (2009). Evolution of Personal Rapid Transit. PRT International, LLC. www.faculty.washington.edu/jbs/itrans/Evolution%20of%20PRT1.pdf

Anderson, J. (2009). How to Design a PRT Guideway. In *Automated People Movers 2009* (pp. 436–449). American Society of Civil Engineers. [http://doi.org/doi:10.1061/41038\(343\)38](http://doi.org/doi:10.1061/41038(343)38)

Anderson, J. (2016). Contributions to the Development of Personal Rapid Transit. Volume I. Advanced Transit Association. www.advancedtransit.org/

Antlauf W., Bernardeau F., Coates K. (2004). Fast Track. *Civil Engineering Magazine*. American Society of Civil Engineers. www.thetransitcolaition.us

ARESEP – Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos de Costa Rica. www.aresep.go.cr

Australian Cycling Promotion Fund Foundation (ACPF). www.cyclingpromotion.com.au

- Banco Mundial. (2019). Inflación, precios al consumidor (% anual) – United States. https://datos.bancomundial.org/indicador/FP.CPI.TOTL.ZG?end=2019&locations=US&name_desc=true&start=2007&view=chart
- Batten M., Francis E. (1997). Automated Control of the Raytheon Personal Rapid Transit System. Washington University. <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/avc.htm>
- Bishop, Richard (2005). Intelligent Vehicle Technologies and Trends. Boston: Artech House. p. 300. ISBN 978-1580539111
- Bly, P., & Teychenne, P. (2005). Three Financial and Socio-Economic Assessments of a Personal Rapid Transit System. In Automated People Movers 2005 (pp. 1–16). American Society of Civil Engineers. [http://doi.org/doi:10.1061/40766\(174\)39](http://doi.org/doi:10.1061/40766(174)39)
- Brand C., Preston J. (2005). The Supply of Public Transport – A Manual of Advice. Transport Studies Unit. University of Oxford
- Burger, Marsden (2008). Cabintaxi's Experience with Sub-second Headways. Washington University. www.staff.washington.edu/jbs/itrans/subsecond_headways.htm
- Cal y Mayor, R. & Cárdenas G., J. (2007). Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones, 8ª edición. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.
- Cervero, R. (2013). Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport. Working Paper 2013-01. Institute Of Urban And regional Development. University Of California In Berkeley. August 2013.
- Cicchino, Jessica (2016). Effectiveness of Forward Collision Warning Systems with and without Autonomous Emergency Braking in Reducing Police-Reported Crash Rates. Insurance Institute for Highway Safety. 1005N. Glebe Road, Suite 800 Arlington, VA 22201, EEUU
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (2006). Informe Sobre el Congestionamiento del Flujo Vehicular en la Gran Área Metropolitana de San José: recopilación, análisis y posicionamiento.
- Crhoy.com, (2013). <https://archivo.crhoy.com/presas-y-abandono-de-infraestructura-vial-aumentan-consumo-de-combustible-y-contaminacion-por-emisiones/nacionales/>
- Crizzle, A., Vrkljan, B., Kajaks, T., Gish, J. & Fleisig, R. (2014). A Systematic Review of Driver Ingress and Egress Using Passenger Vehicles: Considerations for Designers. Journal of Ergonomics.

OHMICS International 5716 Corsa Ave, Suite 110
Westlake, Los Angeles CA 91362-7354, USA.

Davis, S., Diegel, S., Boundy, R., (2015). Transportation Energy Data Book: Edition 34. Vehicle Technologies Office. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. US Department of Energy.

Davis, J. & R., Johnson, R., Stepanek, J., Fogarty, J. (2008). Fundamentals of Aerospace Medicine, Fourth Edition. LIPPINCOTT, WILLIAMS & WILKINGS, a Wolters Kluwer business. 530 Walnut Street, Philadelphia, PA 19106.

Diario Extra - Costa Rica. www.diarioextra.com

Diario La Tribuna Honduras. www.latribuna.hn

Duke TODAY. (2017). Remembering Duke's Railway. Office of Communication Services. Duke University, Durham, North Carolina. www.today.duke.edu

Fallas, Jorge David (2018). Análisis de la Vialidad de San Miguel de Desamparados. MOPT-03-05-01-0415-2018. Dirección General de Ingeniería de Tránsito. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. República de Costa Rica.

Federal Transit Administration. (2004). "Characteristics of BRT for decision making." (PDF). Federal Transit Administration. 1 August 2004. p. ES-5.

Fichter, Donn (1964). Individualized Automated Transit and the City, B. H. Sikes, 1430 East 60th Place, Chicago, Illinois 60637.

Forman, Arlie (2014). West Virginia University – Morgantown Personal Rapid Transit 2014 Annual Agency Profile. www.transportation.wvu.edu/prt/.
www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/transit_agency_profile_doc/2014/30107.pdf

Forschung Stadtverkehr N° 25 (1979). Summary report. Communications on research aimed at improving transport conditions in cities, towns and other built-up areas. Transport Policy Department. Federal Minister of Transport. Bohn-Bad Godesberg, Federal Republic of Germany.

Furman, Burford (2014). Automated Transit Networks (ATN): A Review of the State of the Industry and Prospects for the Future. Mineta transportation Institute. College of Business. San José State University. California, CA 95192-0219.

Ghaseminejad, Sahand (2015). What are linear motors? Kajeh Nasir Toosi University of Technology. Teheran, Iran. DOI: 10.13140/RG.2.2.16250.18887

Grant, M. (2016). Optimización Radial San Pedro, julio 2016. DVT-DGIT-S-2016-257. Dirección General de Ingeniería de Tránsito. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. República de Costa Rica.

Grant, M. (2019). Estimación del efecto de la demarcación de un carril exclusivo para autobuses y medidas de mitigación en Desamparados Centro, San José. MOPT-03-05-01-0016-2019. Dirección General de Ingeniería de Tránsito. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. República de Costa Rica.

Gronning, Richard (2009). Brick-Wall Stops and PRT. Washington University.
www.faculty.washington.edu/jbs/itrans/brickwall-stops.doc

Grover, C., Knight, I., Simmons, I., Couper, G., Massie, P., & Smith, B. (2008). Automated Emergency Brake Systems: Technical requirements, costs and benefits. Published Project Report PPR 227. Transport Research Laboratory Limited. Crowthorne House, Nine Mile Ride, Wokingham, Berkshire, RG40 3GA, United Kingdom.

Gustafsson, J., Lohmann, R., & Lowson, M. (2013). Personal Rapid Transit Live Applications Challenges. In *Urban Public Transportation Systems 2013* (pp. 347–356). American Society of Civil Engineers. <http://doi.org/doi:10.1061/9780784413210.031>

Gustafsson, Jörgen, & Lennartsson, Svante (2013). Vectus PRT Concept and Test Track Experience. Vectus Ltd. http://www.vectusprrt.com/uploads/51828CFFA_6B1A.pdf

Hamilton, W. & Nance, D. (1969). —Systems Analysis of Urban Transportation, *Scientific American*, 221:19-27.

Hoberock, L. (1976). A Survey of Longitudinal Acceleration Comfort Studies in Ground Transportation Vehicles. Research Report 40. United States Department of Transportation Office of University Research, Washington, D.C. 20590.

Hoverboard. www.max93.net.

INECO, Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica, (2011). Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011-2035, Volumen 3, Modelo de Transportes, Metodología. Fondo de Preinversión del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica de Costa Rica.

Innovative Transportation Technologies, (2018). Washington University.
<https://staff.washington.edu/jbs/itrans>

Instituto Nacional de Estadística y Censos (Costa Rica), 2011. X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda: Resultados Generales. 1 ed. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Mayo 2012.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (Costa Rica), 2011. “Resultados Generales. X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011”. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Mayo 2012.

Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo. (1983). Plan Regional Metropolitano GAM Gran Área Metropolitana. Oficina Planeamiento Área Metropolitana. Dirección de Urbanismo. Instituto Nacional de vivienda y Urbanismo. San José, Costa Rica.

Irving, J., Bernstein, H., Olson, C., Buyan, J. (1978). Fundamentals of Personal Rapid Transit. Lexington Books. DC Heath & Company. Lexington, Massachusetts, EEUU.

Japan Rail Pass. www.jrailpass.com.

Jeffery, David (2010). Guidelines for Implementers of Personal Rapid Transit. School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, England. NICHES+ European Commission. www.niches-transport.org

Kerr, A. D., James, P. A., & Craig, A. P. (2005). Infrastructure Cost Comparisons for PRT and APM. ASCE APM05 Special Sessions on PRT. American Society of Civil Engineers.

Kudarauskas, Nerijus (2007). Analysis of emergency braking of a vehicle. *Transport*, 22:3, 154-159. <https://doi.org/10.1080/16484142.2007.9638118>

Kuzmyak, R. (1981). *Vehicle Occupancy: Report 6, 1977 Nationwide Personal Transport Study*. US Department of Transportation. Highway Statistics Division (HHP-44) Federal Highway Administration 400 Seventh Street, S.W.-Room 3300 Washington, D.C. 20590, EEUU.

Laithwaite, Eric (1987). *A History of Linear Electric Motors*. Macmillan Publishers Limited. Palgrave, London.

LCR Logística SA (2007). *Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM*. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos PRU-GAM, Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana (GAM) del Valle Central de Costa Rica, ALA/2002/001-068 (ex CRI/2002/0429). Proyecto financiado con fondos de la Unión Europea.

Levy, Edward (2013). *Rapid Transit In Toronto: A Century of Plans, progress, Politics and Paralysis*. Residential & Civil Construction Alliance of Ontario <http://www.rccao.com/research/files/2014-04-16-Levy.pdf>

Litvak, Isaiah; Maule, Christopher (1982). *The Light-Rapid Comfortable (LRC) Train and the Intermediate Capacity Transit System (ICTS): Two Case Studies of Innovation in the Urban Transportation Equipment Manufacturing Industry*. University of Toronto/York University Joint Program in Transportation.

Lohmann, Robert (2009). *Personal Rapid Transit: Innovation Lasting*. www.2getthere.eu

Mc Donald, Shannon Sanders (2011). *Creating Fully Sustainable Walkable Communities with PRT (Personal Rapid Transit)*. Transportation & Development Institute of ASCE Congress. American Society of Civil Engineers 2011.

Mercedes Benz AG. www.mercedes-benz.com

Merritt, William (1993). *Reflections on the New Systems Study Project*. Proceedings of the Automated People Movers IV conference held at Las Colinas, Texas in 1993, pp 35-59. American Society of Civil Engineers. [www.asce.org. http://staff.washington.edu/jbs/itrans/reflec2.htm](http://staff.washington.edu/jbs/itrans/reflec2.htm)

Minderhoud, M., & Van Zuylen, H. (2005). Willingness-to-Pay for Personal Rapid Transit in the City of Almelo. In *Automated People Movers 2005* (pp. 1–11). American Society of Civil Engineers. [http://doi.org/doi:10.1061/40766\(174\)34](http://doi.org/doi:10.1061/40766(174)34)

The Monorail Society. www.monorail.org

National Aeronautics and Space Administration (2009). NASA Partners to Revolutionize Personal Transportation. www.nasa.gov/topics/nasalife/features/unimodal.html

Neufert, Ernst (1982). *Arte de Proyectar en Arquitectura*. 13 Edición. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, España.

Office of Technology Assessment (1975). *Automated Guideway Transit*. Senate Committee On Appropriations. Congress of The United States of America. U.S. Government Printing Office Washington, D.C. 20402

Office of Technology Assessment, (1980). *Impact of Advanced Group Transit Technology*. Congress of The United States of America. U.S. Government Printing Office Washington, D.C. 20402

ORFE. Operations Research & Financial Engineering. Princeton University. <https://orfe.princeton.edu/>

Physics World. Maglev. Department of Physics. The Chinese University of Hong Kong. www.hkphy.org/articles/maglev/maglev_e.html

Picado Muñoz, M., Fonseca Chaves, F., Sequeira Rojas, W., Loría Salazar, G., (2017). *Costos de Carreteras en Costa Rica*. Programa de Infraestructura del Transporte. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. Universidad de Costa Rica.

ProDUS UCR. Programa de Investigacion en Desarrollo Urbano Sostenible. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. <https://produs.ucr.ac.cr/>

PRT Consulting, Inc. <http://www.prtconsulting.com>

Rabinovich, Ari, (2014). Israel's Largest Defense Company to Build World's First Elevated Transit Network in Israel. www.haaretz.com/iai-to-build-first-ever-elevated-transit-network-in-israel-1.5253182

Radford, Arthur; Cooke, Frederick (1969). A New Transportation System for the Automatic Handling of Bulk Materials and Supplies in Offshore and Underwater Environments. First Annual Offshore Technology Conference, 18–21 May 1969, Houston, Texas. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. The Conference.

Rail for the Valley. Lower Fraser Valley British Columbia. <http://www.railforthevalley.com/>

Railway Technology. <http://www.railway-technology.com>

Raney, Steve; Young, Stan (2004). "Morgantown People Mover" (PDF). TRB 2005 Reviewing Committee: Circulation and Driverless Transit (AP040). Archived (PDF) from the original on 22 May 2015. Retrieved 2008-12-18.

Rejseplanen. www.rejseplanen.dk.

Richards, Francis (2001). *Future Transport in Cities*. Taylor & Francis Group. Milton Park, 2-4 Park Square, Milton, Abingdon OX14 4RN, Reino Unido.

Robertson, Ari (2015). *The Road Not Taken – How we found (and lost) the dream of Personal Rapid Transit*. www.theverge.com. <http://bit.ly/2UXfs1i>

Rodríguez-González, M., Agüero-Valverde, J. (2017). Walking distances from home to bus stops in San José, Costa Rica: real, perceived, and stated-preference distances. *Advances in Transportation Studies*, 43, pp. 63-74.

Rydell, Edmund (2001). *The Transportation Renaissance: The Personal Rapid Transit Solution*. Xlibris Corporation, Bloomington, Indiana.

Schweizer, J., Mantecchini, L., & Greenwood, J. (2011). Analytical Capacity Limits of Personal Rapid Transit Stations. In *Automated People Movers and Transit Systems 2011* (pp. 326–338). American Society of Civil Engineers. [http://doi.org/doi:10.1061/41193\(424\)30](http://doi.org/doi:10.1061/41193(424)30)

Science & Technology (2004). Magnetically Levitated Train Takes Flight. Lawrence Livermore National Laboratory. www.str.llnl.gov/str/October04/Post.html

SIECA – Secretaría de Integración Económica Centroamericana (2011). Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras con Enfoque de Gestión de Riesgo y Seguridad Vial. 3ª. Edición. www.sieca.org.gt

Silva L., Comparato T., Watt C. & Heckelmann W., (1981). Development/Deployment Investigation of H-Bahn System. US Department of Transportation. Urban Mass Transportation Administration 400 Seventh Street, S.W.-Room 3300 Washington, D.C. 20590, EEUU.

Sirand-Pugnet, Bernard (1997). De la Grand-mère à Météor. ID Éditions, 1997

Smart Car. www.smart.com/es/dealers/smartcenter-master/es/index/smart-fortwo/safety.html

Sproule, William J. (2016). Stanley Dashew, the Dashaveyor, and the Toronto Zoo Domain Ride. 15th International Conference on Automated People Movers and Automated Transit Systems, April 17–20, 2016 | Toronto, Ontario, Canada

Sproule, William J.; Neumann, Edward (1991). The Morgantown PRT: It Is Still Running at West Virginia University. *Journal of Advanced Transportation*, 25:3, 269-280. www.hindawi.com

Suzuki, H., Nakatsuji, T. (2014). Dynamic estimation of headway distance in vehicle platoon system under unexpected car-following situations. 4th International Symposium of Transport Simulation-ISTS'14, 1-4 June, Corsica, France. www.elsevier.com/locate/procedia. www.sciencedirect.com.

Traffic Technology Today. (2017). Ultra Fairwood to build the world's largest autonomous vehicle transportation system in the UAE. www.traffictechnologytoday.com

Transport Policy.net. Japan:Light-Duty: Fuel Economy. <https://www.transportpolicy.net/standard/japan-light-duty-fuel-economy/>

Transportation Research Board. (2010). Highway Capacity Manual 2010. Transportation Research Board. 500 Fifth Street, NW, Wasingtong, DC 20001. EEUU.

Tsuchiya, M., Ohsaki, H. (2000). Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors. IEEE Transactions on Magnetics, Volume 36, Issue 5. IEEE Magnetics Society.

Ultra Global PRT. (2012). History of Ultra. <http://www.ultraglobalprt.com/about-us/library/pdfs/>

Urban Transit System Cabintaxi (1972). Hagen Project Planning Summary. Arbeitsgemeinschaft Cabintaxi DEMAG+MBB. www.staff.washington.edu/jbs/itrans/hagenstudy.pdf

U.S. Department Of Transportation. (2004). Signalized Intersections: Informational Guide. Federal Highway Administration. Publication FHWA-HRT-04-091. Turner-Fairbank Highway Research Center, 6300 Georgetown Pike, HSR 20, Room No. T301, McLean, VA 22101.

U.S. Department Of Transportation. (2016). Creation of Department of Transportation – Summary. <https://www.transportation.gov/50/creation-department-transportation-summary>

Voice, D. (2010). Monorails of the World: A History of Passenger Monorails. Adam Gordon Books. London. United Kingdom.

Wahl, Paul. (1971). Personal Rapid Transit, Popular Science, noviembre 1971, páginas 73-77.