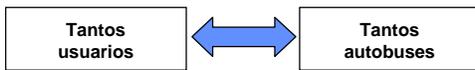


1 GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

1.1 INTRODUCCIÓN

Dimensionamiento



El objetivo de esta guía es ofrecer al lector un procedimiento de dimensionamiento de rutas de autobuses que contribuya al mejoramiento del sistema de transporte urbano.

Para ser adecuado, el dimensionamiento de una ruta debe lograr un equilibrio entre la oferta de transporte y la demanda de usuarios; es decir, para un determinado número de usuarios, cierto número de autobuses de tal manera que satisfagan criterios de calidad y rentabilidad en el servicio.

Destacan entre las acciones que hay que realizar las siguientes:

Acciones a realizar

- **Conocer a donde desea trasladarse el usuario de una ruta**
- **Conocer la demanda de usuarios que pretenden realizar estos viajes**
- **Conocer el comportamiento de la ruta y su estructura física (derrotero, paradas, infraestructura)**

Todas estas acciones contemplan otros elementos como lo son la velocidad, el tipo y capacidad de las unidades y el tipo de superficie de rodamiento empleada.



A su vez, no se debe perder de vista que el servicio debe proveerse dentro de niveles de calidad acordes con la tarifa pagada.

Esta tarea de dimensionamiento de rutas es una parte esencial de cualquier empresa transportista y forma parte del proceso de planeación de la operación de transporte público.

Los productos principales del dimensionamiento de una ruta de autobuses son los siguientes:

Productos

- **Parámetros de dimensionamiento de la ruta**
- **Especificación del servicio**

Finalmente, se presenta un ejemplo práctico de dimensionamiento de una ruta a partir de los resultados mostrados en la *Guía de Estudios de Campo* que forma parte de las Guías de USTRAN.

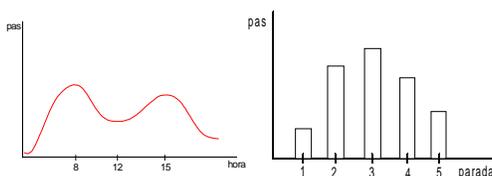
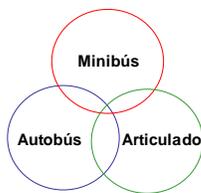
1.2 DIMENSIONAMIENTO DE UNA RUTA DE TRANSPORTE

El dimensionamiento de una ruta de autobuses se realiza a partir de una serie de datos, los cuales se obtienen para grupos de días semejantes, como pueden ser los días hábiles, sábados y domingos y, días feriados. Estos datos deben ser representativos y deben corresponder a situaciones normales de servicio.

La información que se utiliza se relaciona con la oferta y la demanda observada en ruta y es la siguiente:

Información utilizada

- oferta del servicio
- demanda de pasajeros por periodo del día
- demanda de pasajeros en la sección de máxima demanda
- ocupación máxima o factor de ocupación
- índice de rotación
- cantidad de salidas por periodo
- intervalo
- tiempo de recorrido y de ciclo
- volumen promedio diario
- características del derrotero (extensión, ubicación de paradas y tipo de pavimento existente)
- características físicas del parque vehicular



Dentro de los aspectos de la oferta destaca el tipo de unidad a utilizar así como su desempeño operacional. A su vez, la demanda se centra en la cantidad de pasajeros transportados así como en la variación de la misma a lo largo del día y a lo largo de un recorrido.

El dimensionamiento de una ruta de autobuses puede ser realizado manualmente siguiendo los procedimientos señalados a continuación o bien mediante la utilización de los procedimientos informáticos.

Antes de proceder a establecer el procedimiento de dimensionamiento, es indispensable entender los elementos básicos que intervienen en el diseño.

1.2.1 DEFINICIÓN DE ELEMENTOS BÁSICOS

Las Figuras 1 y 2 muestran las representaciones gráficas comúnmente utilizadas en la operación de rutas de transporte público, las cuales contienen los elementos básicos que se definen a continuación:

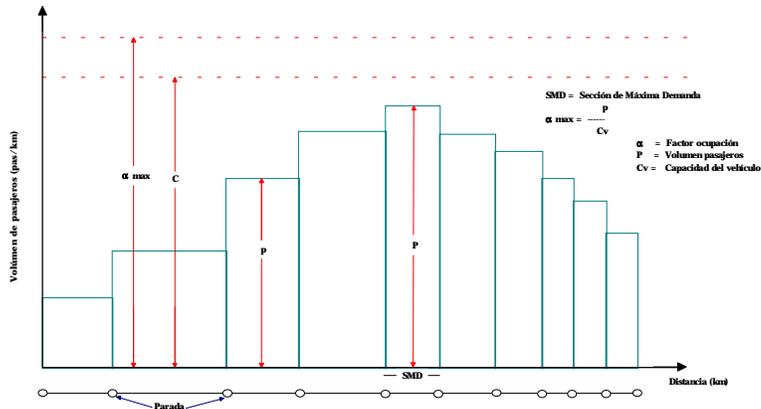


Figura 1.
Representación gráfica de términos a la distribución de la demanda de pasajeros y capacidad.

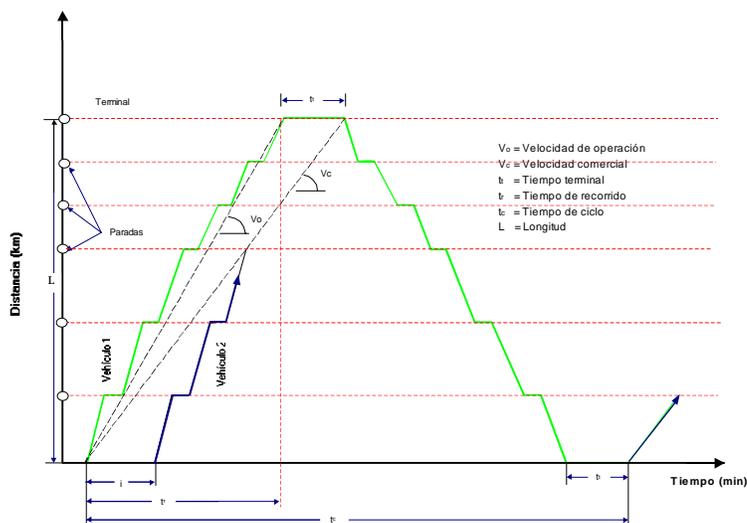
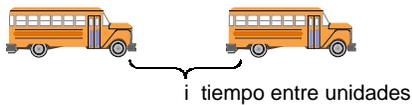


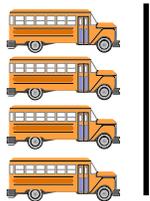
Figura 2.
Representación gráfica de los parámetros relacionados al recorrido de los vehículos y a su programación.

1.2.1.1 INTERVALO



El intervalo (i) es la porción de tiempo, comúnmente expresada en minutos, entre dos salidas sucesivas de vehículos de transporte público en una ruta.

1.2.1.2 FRECUENCIA DE SERVICIO



Tantas unidades en 1 hora

La frecuencia (f) es el número de unidades que pasan un punto dado en la ruta durante una hora (o cualquier periodo de tiempo considerado).

1.2.1.3 CAPACIDAD VEHICULAR



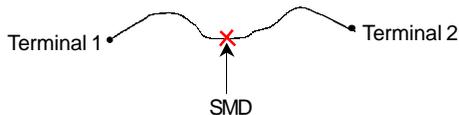
Pasajeros sentados + pasajeros de pie

1.2.1.4 VOLUMEN DE PASAJEROS



Tantos pasajeros en 1 hora

1.2.1.5 SECCIÓN DE MÁXIMA DEMANDA



1.2.1.6 VOLUMEN DE DISEÑO

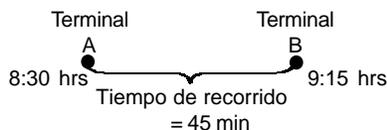


Tantos pasajeros abordo en SMD

1.2.1.7 CAPACIDAD DE LÍNEA OFRECIDA

C mayor o igual que P
 $C \geq P$

1.2.1.8 TIEMPO DE RECORRIDO



La capacidad vehicular (C_V) es el número total de espacios en el vehículo tanto de pie como sentados. Así por ejemplo, un autobús con 37 asientos y una área disponible de $8.10m^2$, bajo la consideración de 8 usuarios por m^2 , da una capacidad vehicular de $C_V=37 + (8.1 \times 8) = 64.8 \sim 65$ pas/veh. A su vez, una combi ofrece 9 asientos por lo que $C_V=9$ pasajeros/vehículo.

El volumen de pasajeros (p) es el número de usuarios que pasan por un punto fijo durante una hora. El volumen de pasajeros varía conforme las variaciones de la hora del día, día de la semana y época del año.

La sección de máxima demanda es el punto dentro de la ruta donde se tiene el mayor número de usuarios abordo y establece el volumen de diseño de la ruta. La SMD se muestra en la Figura 1 anterior.

El volumen de diseño (P) es el que se presenta en la sección de máxima demanda de una ruta, y en consecuencia, el mayor volumen de cualquier parada o sección a lo largo de la ruta, como se muestra en la Figura 1 anterior. Este volumen es el parámetro básico para determinar la capacidad de línea que debe ofrecerse.

La capacidad de la ruta (C) es el número total de espacios ofrecidos en un punto de una ruta durante una hora y es resultado del producto de la frecuencia y la capacidad vehicular. Naturalmente, se debe proveer de una capacidad igual o mayor que P .

$$C = f * C_V$$

donde:

- C = Capacidad de línea [pasajeros/hora]
- f = Frecuencia [vehículos/hora]
- C_V = Capacidad del vehículo [pasajeros/vehículo]

El tiempo de recorrido (t_r) es el tiempo que emplea un vehículo de una terminal (cierre de circuito) a la terminal opuesta en una ruta. El tiempo de recorrido se expresa usualmente en minutos.

1.2.1.9 FACTOR DE OCUPACIÓN

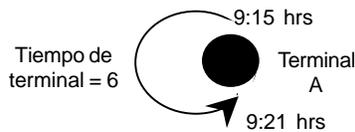
Resulta de dividir el número de usuarios abordo de una unidad entre la capacidad vehicular.

$$a \text{ max} = \frac{P}{Cv}$$

donde:

- a = factor de ocupación
- P = pasajeros abordo o volumen de diseño
- Cv = capacidad vehicular

1.2.1.10 TIEMPO DE TERMINAL



Tiempo terminal permite:

- mantener intervalo uniforme
- recuperar demoras

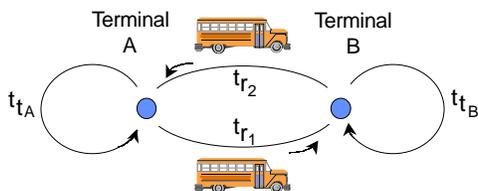
Es el tiempo (t_t) entre que llega y vuelve a salir un vehículo de la terminal o cierre de circuito . Su propósito es contar con tiempo para dar la vuelta al vehículo, para dar un descanso al operador y, para permitir los ajustes necesarios en el horario. Este tiempo permite, mantener un intervalo uniforme y/o recuperar las demoras en las que se ha incurrido.

Por ello, el tiempo de terminal está determinado en función de los descansos de los operadores, del tiempo requerido para efectuar las actividades de chequeo por parte del despachador y de la propensión a demoras en la ruta. El tiempo de terminal se expresa a través de dividir el tiempo terminal y el de recorrido.

$$g = \frac{t_t}{t_r}$$

El rango para este coeficiente g se ubica entre 0.12 y 0.18.

1.2.1.11 TIEMPO DE CICLO O VUELTA



El tiempo de ciclo (t_c) es el tiempo total de viaje redondo para una unidad de transporte, esto es, el tiempo que tarda en volver a pasar la misma unidad por un punto determinado. Este tiempo resulta de:

$$t_c = t_{r1} + t_{r2} + t_{t1} + t_{t2}$$

donde:

- t_c = tiempo de ciclo
- t_{r1} = tiempo de recorrido de ida
- t_{r2} = tiempo de recorrido de vuelta
- t_{t1} = tiempo de terminal 1
- t_{t2} = tiempo de terminal 2

1.2.1.12 TAMAÑO DEL PARQUE VEHICULAR



Operación



Reserva



Mantenimiento y reparación

1.3 CRITERIOS PARA DETERMINAR LOS ELEMENTOS BÁSICOS DE DIMENSIONAMIENTO

1.3.1 INTERVALOS

Requerimientos:

- Proveer de una capacidad adecuada que permita cumplir con la demanda de usuarios.
- Ofrecer cierta frecuencia mínima con el fin de mantener un servicio

El tamaño del parque vehicular (N_p) es el número total de unidades que operan en una ruta y con el que se atiende adecuadamente la demanda de pasajeros. El tamaño del parque vehicular consiste del número de vehículos requeridos para el servicio durante la hora de máxima demanda en todas las rutas (N); los vehículos en reserva (N_r) y, los vehículos que están en mantenimiento y reparación (N_m), es decir:

$$N_p = N + N_r + N_m$$

Los criterios que determinan el dimensionamiento son el intervalo, el factor de ocupación, el tamaño del parque vehicular y la capacidad vehicular.

Los requerimientos para determinar los intervalos son los siguientes:

La frecuencia que da la capacidad necesaria para cumplir con la demanda se obtiene de dividir la carga en la sección de máxima demanda entre el número promedio de pasajeros asignados a cada vehículo. Se expresa como:

$$f = \frac{P}{a \cdot C_v}$$

o bien:

$$i = \frac{60 \cdot a \cdot C_v}{P}$$

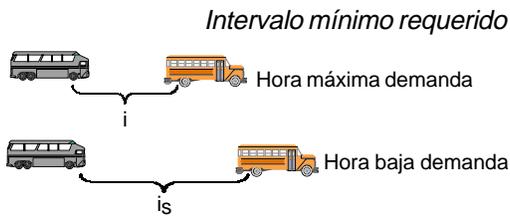
Facilidad de memorización del intervalo

00 00 00 00
 30 15 10 05
 00 30 20 10
 00 30 15
 40 20
 50 25
 00 30
 35
 40
 45
 50
 55
 00

Para facilitar la memorización del intervalo y la elaboración de horarios, es recomendable que los intervalos mayores de 6 min se repitan cada hora. Por lo tanto, el intervalo debe ser divisible como número entero entre 60, esto es:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.5 (7/8), 10, 12, 15, 20 y 30

Al utilizar intervalos mayores de 30 min es recomendable el manejo de valores de 40, 45 y 60 min por lo que el intervalo debe ser redondeado hacia abajo al valor más cercano a estos valores.



1.3.2 FACTOR DE OCUPACIÓN

Características de operación

En el caso de las horas de baja demanda u horas valle, durante los fines de semana o en aquellas rutas con poca demanda, normalmente se maneja un intervalo mínimo requerido para mantener el servicio, al cual se le conoce como intervalo de servicio (i_s).

El factor de ocupación a influye en las siguientes características de la operación del transporte público:

- **El nivel de comodidad del usuario.** Un valor alto de a trae como resultado un número considerable de usuarios de pie y la sobrecarga del vehículo.
- **Costos de operación.** El uso de un valor alto de a , implica un menor número de unidades para transportar un número dado de usuarios que da una menor cantidad de unidades operando da en consecuencia una menor frecuencia y con ello mayores tiempos de espera al usuario. Un valor alto de a resulta en un mayor tiempo de ascenso/descenso, con lo cual se reduce la velocidad de operación y afecta directamente a los costos de operación.

Selección de a

La selección de un valor de a debe ser realizada de tal forma que se logre un balance entre los factores antes mencionados.

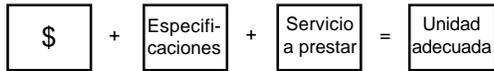
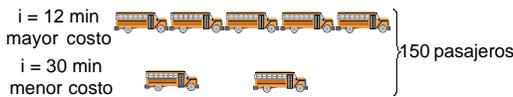
Condiciones que requieren un valor α bajo	Condiciones que requieren un valor α alto
<ul style="list-style-type: none"> • Variaciones grandes en el volumen de usuarios. • Se desea una relación asientos/de pie mayor. • Longitud promedio de recorrido grande. • Alto porcentaje de usuarios de la tercera edad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Volumen mas o menos constante de usuarios. • Se desea una relación asientos/de pie mayor. • Longitud promedio de viaje pequeña. • Alto porcentaje de niños en edad escolar.

Una primera aproximación considera dividir el número de asientos y la capacidad total del vehículo C_s/C_v y a partir de los valores encontrados se utilizan los siguientes lineamientos:

Lineamientos para a

- El valor mínimo de a debe ser *menor* que la relación C_s/C_v . Este valor garantiza asientos a todos los usuarios excepto por algunos periodos cortos.
- El valor máximo de a recomendable es de 0.9 el cual debe ser utilizado para horas de máxima demanda en el caso de contar con una sección de máxima demanda corta y en donde volumen de pasajeros no varía significativamente de un día a otro.

1.3.3 TAMAÑO DEL PARQUE VEHICULAR Y LA CAPACIDAD DE VEHÍCULO



1.4 EJEMPLO DEL DIMENSIONAMIENTO DE UNA RUTA

1.4.1 PASO 1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA

Para un volumen dado de pasajeros en una ruta, el servicio puede ser proporcionado por una cantidad pequeña de unidades de gran capacidad o bien, por una cantidad mayor de unidades de baja capacidad. La segunda combinación resulta en una mayor frecuencia, pero requiere una inversión total y costos de operación mayores que la primera combinación.

Es saludable que una empresa de transporte realice un análisis detallado de los costos por operar determinado tipo de unidad; establezca las condiciones en que operará el equipo y evalúe la calidad del servicio que resultará del uso de cada tipo de vehículo, antes de efectuar cualquier compra de unidades.

La naturaleza misma del procedimiento para dimensionar una ruta se facilita al mostrar los pasos que se deben seguir, a partir de un ejemplo.

Los parámetros principales que deben tenerse presente para el dimensionamiento de una ruta son los siguientes:

Parámetro	Ejemplo	Como se obtiene:
Longitud de la ruta en una dirección	$L = 10 \text{ km}$	Medida en plano
Tiempo de recorrido	$t_r = 45 \text{ minutos hora pico (HMD)}$ $t_r = 40 \text{ minutos hora valle (HV)}$	Estudio de ascenso/descenso
Volumen del diseño en la SMD (HMD)	$P = 375 \text{ usuarios hora pico}$	Resultados ascenso-descenso
Capacidad del vehículo	$C_v = 45 \text{ asientos} + 25 \text{ de pie} = 70 \text{ espacios}$	Especificaciones del vehículo
Factor de ocupación	$\alpha = 0.70$	Según norma <i>Calidad Servicio</i>
Intervalo de servicio	$i_s = 20 \text{ minutos}$	Según norma <i>Calidad Servicio</i>
Tiempo de terminal mínimo	$t_t = 6 \text{ minutos}$	Según <i>Contrato Colectivo de Trabajo</i>

1.4.2 PASO 2. DETERMINACIÓN DEL INTERVALO

Se calcula el intervalo i a partir de la siguiente ecuación:

$$i = \frac{60 \times \alpha \times C_v}{P} = \frac{60 \times 0.7 \times 70}{375} = 7.84 \text{ minutos}$$

Redondeo i

i calculado comparado con i servicio

El valor del intervalo debe ser redondeado hacia abajo al valor práctico más cercano.

En este caso el valor calculado del intervalo es de $i = 7.84$ y este es más pequeño que $i_s = 20$ minutos, entonces el valor de 7.5 minutos es el que se considera como intervalo a la hora pico y 20 minutos como valor de servicio mínimo a prestar.

1.4.3 PASO 3. CÁLCULO DEL TIEMPO DE CICLO

El tiempo de ciclo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 t_c &= 2 (t_r + t_t) \\
 &= 2 (45 + 6) = 102 \text{ minutos para la hora pico} \\
 &= 2 (40 + 6) = 92 \text{ minutos para la hora valle}
 \end{aligned}$$

1.4.4 PASO 4. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DEL PARQUE VEHICULAR



OK autobús entero



NO parte autobús

Nuevo tiempo de ciclo

El parque vehicular se determina mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$N = \frac{t_c}{i}$$

Ya que el parque vehicular N debe ser un valor entero, el resultado de la expresión anterior se redondea hacia arriba. Para el ejemplo:

$$N_{HMD} = \frac{102}{7.5} = 13.6 \sim 14 \text{ vehículos en la HMD}$$

$$N_{HV} = \frac{92}{20} = 4.6 \sim 5 \text{ vehículos en la HV}$$

A partir de estos nuevos resultados se ajusta el nuevo tiempo de ciclo a partir de autobuses enteros, lo que implica:

$$\begin{aligned} t_c &= N \cdot i \\ &= 14 \times 7.5 = 105 \text{ minutos HMD} \\ &= 5 \times 20 = 100 \text{ minutos HV} \end{aligned}$$

A continuación se calcula un nuevo tiempo de terminal (t_t):

$$t_t = \frac{t_c - 2t_r}{2}$$

$$t_t = \frac{105 - 2(45)}{2} = 7.5 \text{ minutos HMD}$$

$$t_t = \frac{100 - 2(40)}{2} = 10 \text{ minutos HV}$$

Los resultados anteriores permiten dimensionar la ruta, sintetizando los parámetros de dimensionamiento de la manera siguiente:

Concepto	Hora de máxima demanda	Hora valle
Intervalo	7.5 min	20 min
Tiempo de ciclo	105 min	100 min
Tiempo de terminal	7.5 min	10 min
Tamaño de la flota	14 veh	5 veh
Velocidad comercial	11.4 km/h	12 km/h
$t_t/t_o (\varphi)$	0.17	0.25

El cuadro siguiente muestra un ejemplo de cómo presentar este análisis, así como los parámetros para su dimensionamiento.

CONCEPTO	SIMBOLOGIA	UNIDAD DE MEDIDA	EJEMPLO	
			(HMD)	(HV)
Volúmen del diseño	P	pas/h	375	---
Capacidad del vehículo	Cv	espacios	70	70
Factor de ocupación	α	---	0.7	---
Tiempo recorrido c - p	t_{r1}	min	45	40
Tiempo recorrido p - c	t_{r2}	min	45	40
Tiempo recorrido total	t_r	min	$t_{r1}+t_{r2}=90$	80
Tiempo de terminal	t_t	min	$t_{t1}+t_{t2}=7.5+7.5=15$	20
Tiempo de ciclo	t_c	min	$t_r+t_t=90+12=105$	100
Longitud (ida+vuelta)	L	km	20	20
Velocidad de operación	V_o	km/h	13.3	15
Velocidad comercial	V_c	km/h	11.4	12
t/t_c	γ	---	$15/90 = 0.17$	$20/80=0.25$
Intervalo	i	min	7.5	20
Número de unidades requeridas	$N=t_c/i$	veh	$105/7.5=14$	$100/20=5$
Eficiencia del itinerario	$\eta_v=t_r/t_c$	---	$90/105=0.86$	$80/100=0.80$
	$\eta_v=V_o/V_c$	---	$11.4/13.3=0.86$	$12/15=0.80$
	$\eta_v=1/(1+\gamma)$	---	$1/(1+0.17)=0.86$	$1/(1+0.25)=0.80$

1.5 INTERVALOS EN RUTAS TRONCALES

La unión de dos o más rutas o ramales en una sección troncal común crea el problema de mantener intervalos uniformes y cargas iguales entre las diferentes unidades que transitan por el tramo troncal.

Aspectos a considerar en la troncal

- Si se tienen n ramales con volúmenes de usuarios similares, se programa su operación con el mismo intervalo.
- Si las unidades provienen de rutas diferentes y se alternan en el tramo troncal, entonces efectúan sus recorridos con intervalos i/n .
- Si los ramales presentan volúmenes de pasajeros diferentes, entonces no es posible lograr la operación con intervalos uniformes y cargas uniformes en la línea troncal. En tales casos, se opera el tramo troncal con distintas cargas en las unidades o bien, sin un intervalo uniforme para todos los ramales.

El intervalo promedio en el tramo troncal se calcula mediante la siguiente expresión:

$$i_{t \text{ min}} = \frac{60}{f_t} = \frac{60}{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n}$$

donde:

f_t = frecuencia en el tramo troncal

f_1, f_2, f_n = frecuencias en los ramales.