

Método simplificado de dimensionamiento para líneas urbanas de autobuses (*)

Por EDUARD ALBORS FREIXEDAS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
TRANSPORTES DE BARCELONA, S.A.

El presente artículo pretende exponer una metodología para el dimensionamiento de una línea de autobuses urbanos en explotación. El método se basa en la obtención de los tiempos de recorrido entre terminales y los flujos de viajeros en los tramos de mayor carga en cada sentido. Este procedimiento se está utilizando en la actualidad para la elaboración de los horarios en las líneas de Transportes de Barcelona, S.A.

1. INTRODUCCION

El transporte público debe adquirir en España una importancia superior a la que actualmente posee. Esta afirmación clara y rotunda, es válida especialmente para las ciudades con poblaciones superiores a los 400.000 habitantes, y se basa en dos tendencias claras:

- La congestión circulatoria. Durante las horas puntas cualquier ciudadano que viva en una gran ciudad ha observado, peor, ha sufrido, los embotellamientos que se producen en algunos tramos de la red viaria, reflejo fiel de la saturación de la misma. Este hecho demuestra la imposibilidad de aumento del transporte privado para satisfacer la movilidad dentro de la ciudad especialmente para los viajes domicilio-trabajo, y el necesario incremento de los transportes colectivos que deberían ser capaces de desplazar a más personas en el mismo tiempo y ocupando un menor espacio.
- El ahorro energético. En unas recientes jornadas sobre ahorro energético (1), y según datos del Instituto de Estudios de Transportes y Comunicaciones, el transporte urbano representaba un 15 % del consumo energético en el sector del transporte. En esas mismas jornadas (2), se ponía de manifiesto que el consumo por viajero x km. en metro era 1,5 veces mayor que en autobús, mientras que el vehículo privado superaba en 3,5 veces el

consumo de los autobuses. Estas cifras son suficientes significativas si se tiene en cuenta la dependencia exterior en el abastecimiento de combustibles y la continua subida de sus precios.

Además la potenciación del transporte colectivo beneficiaría no sólo a los "cautivos" y a los usuarios habituales, sino a todos aquéllos que por otros motivos (especialmente económicos) se inclinarán hacia él.

Ahora bien esta esperada potenciación del transporte colectivo, pasa por una mejora en la calidad del mismo gracias a una decidida tecnificación tanto material como humana. No es necesario conocer a fondo una empresa de autobuses urbanos para darse cuenta de que la técnica empleada en la explotación es la misma que se utilizaba hace treinta años, exceptuando las lógicas mejoras en el material móvil. Ni la electrónica, ni las telecomunicaciones, ni la informática han sido introducidas en este sector como lo han hecho en otros de los servicios y la industria. Asimismo las pirámides de población de estas empresas son pirámides excesivamente invertidas (figura 1) con una mano de obra abundante y, en general, poco cualificada (téngase presente que un elevado porcentaje del personal trabaja "cara al público", sin haber existido una política de formación que mejore esas relaciones). En este sentido puede decirse que únicamente los altos cargos poseen una adecuada cualificación, ya que la mayoría de los mandos intermedios han ascendido desde las categorías más bajas de la empresa gracias a sus méritos y su

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1981.

pasa por su punto de observación, la hora de paso y su ocupación.

Los tiempos de recorrido entre terminales se calculan fácilmente como diferencia —para cada autobús— entre el tiempo de llegada a una terminal y el tiempo de salida de la opuesta, o sea, $T_3 - T_1$ en el sentido A - B y $T_6 - T_4$ en el sentido B A de la línea representada en la figura 2.

Ahora bien, los tiempos de recorrido así obtenidos muestran una variación importante respecto a sus valores medios, los cuales a su vez varían a lo largo de las diferentes horas del día, como puede observarse en la figura 4. A este tipo de variables, aleatorias y con valores medios oscilantes es lo que se denomina un proceso estocástico no estacionario.

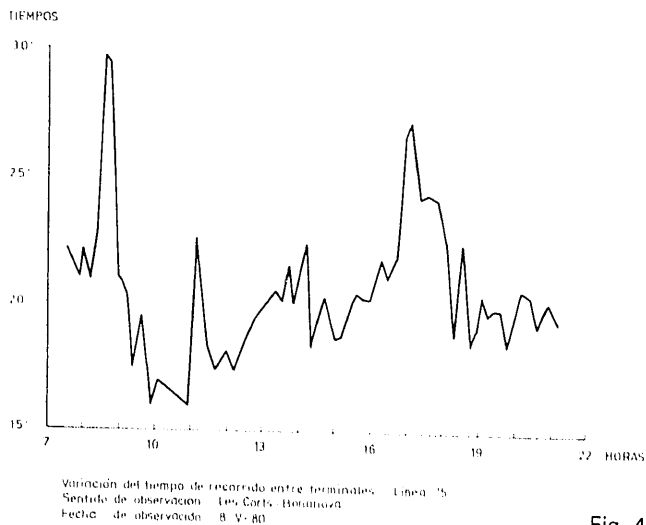


Fig. 4.

Conocida la dificultad intrínseca de este tipo de procesos se ha seguido el procedimiento de dividir el período completo de observación (normalmente desde las 6 a las 22 horas) en períodos relativamente cortos en los que pueda tratarse el proceso como una variable aleatoria. Teniendo bien presente la realidad del problema, tiempos de recorrido de una línea de autobuses, y la finalidad de los resultados, dimensionamiento de la línea y elaboración del horario de personal, parece operativo elegir períodos de una hora que se inicien y finalicen con las horas en punto.

Además se ha supuesto que los tiempos de recorrido medidos en cada uno de los períodos horarios considerados, son valores muestrales de una variable normal $T \equiv N(m_T, \sigma^2 T)$.

La hipótesis de normalidad es justificable según el teorema del límite central (4), admitiendo que el

tiempo de recorrido entre terminales es suma de las variables aleatorias tiempos de recorrido entre paradas intermedias de la línea. Se presenta en el Apéndice 1, la comparación entre una variable aleatoria normal y otra lognormal, como otro modelo posible elegido por algunos autores (5).

Establecidas las anteriores hipótesis se estiman los parámetros de la distribución normal por el método de la máxima probabilidad, o sea:

$$\hat{m}_T = \bar{X}_T = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$\hat{\sigma}_T^2 = S_T = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X}_T)^2}{n}$$

siendo: x_i ($1 \leq i \leq n$) los tiempos de recorrido observados

n el número total de observaciones.

Definida completamente la distribución, se ha elegido el "tiempo de asignación a horario" basándose en un criterio de riesgo, o sea, adoptando que sólo cierto porcentaje de autobuses llegan antes de la hora de salida al terminal opuesto. En Transportes de Barcelona, S.A., se ha tomado una seguridad del 90 %, se admite que un 10 % de los autobuses lleguen retrasados) por lo que el "tiempo de asignación a horario" resulta ser:

$$t = \bar{X}_T + 1,28 \cdot S_T$$

En el apéndice 2, se exponen los diferentes valores del "tiempo de asignación a horario" en función de diferentes niveles de seguridad.

Hasta aquí el procedimiento en el caso de que se posean datos de un solo día de observación, ahora bien debido a los pequeños tamaños muestrales así obtenidos será necesario prolongar durante varios años el trabajo de campo y agrupar los resultados. (Una línea con un intervalo de paso de 8 minutos daría un total de 37 observaciones por hora en 5 días). Desde un punto de vista teórico sería necesario comprobar la homogeneidad de los diferentes días, o sea, comprobar si los tiempos de recorrido de un lunes son estadísticamente semejantes a los de un miércoles o a los de un viernes, pero este ejercicio de análisis de la varianza no se ha efectuado por dos motivos: la referida simplicidad que se apuntaba en el apartado anterior y el hecho

METODO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMIENTO PARA LINEAS URBANAS DE AUTOBUSES

real de que en T. B. sólo se elaboran horarios de día laborable, sábado y día festivo.

Todas las manipulaciones y cálculos explicadas en este capítulo los efectúa el ordenador, produ-

ciendo unos gráficos análogos a los de la figura 5. En ellos se recogen para cada período horario y para cada sentido de la línea, los histogramas del tiempo de recorrido así como las estimaciones de la media y desviación típica del mismo.

TRANSPORTS DE BARCELINA S.A. (SPM)

LINIA : 56
 =====
 SENTIT : COLLEBLANC-BESOS
 PERIODE : 7 - 8

TEMPS DE RECORREGUT

MITJANA = 38.81 MIN.
 DESV. TIPICA = 2.99 MIN.
 VELOCITAT = 15.47 KM / H
 N. OBSERVACIONS = 34

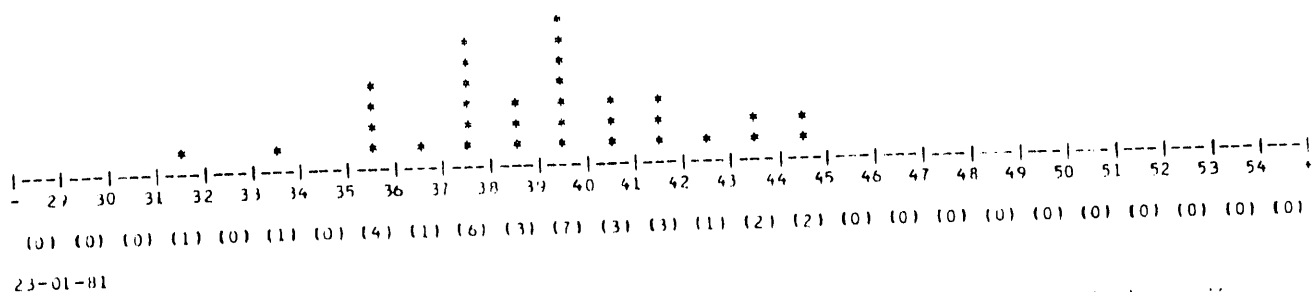


Figura 5. Histograma de los tiempos de recorrido en el sentido y periodo indicado tras cuatro días de observación.

Figura 5.

3. CALCULO DE LA OCUPACION

Para el dimensionamiento de una línea de autobuses son necesarios conocer, además de los tiempos de recorrido entre terminales, el número de viajeros transportados y la capacidad de los vehículos en servicio. Con respecto al número de viajeros transportados debe reconocerse que Transportes de Barcelona, S.A., ha ido perdiendo información al aumentar los títulos de transporte de los que no queda constancia al efectuar un viaje (Pases de jubilados, pases de empleados y familiares, y tarjetas multiviaje canceladas por aparatos sin contador). En lo referente a la capacidad de los vehículos existían a principios del año pasado tres tipos de vehículos bien diferenciados, el Pegaso 6035 tres puertas (con cobrador), el Pegaso 6035 dos puertas (cobro automático) y el Pegaso 6035-A (articulado). Ahora bien la falta de homogeneidad entre autobuses del mismo grupo en el número y distribución de asientos impide definir unas ocupaciones y una capacidad teóricas para cada tipo de vehículo.

Por estos motivos se efectuaron unas tomas fotográficas con diferente número de pasajeros a bordo en tres autobuses considerados representa-

tivos de su clase (figura 6). Estas fotografías ayudaron a establecer una clasificación en el grado de ocupación de un autobús (B = Baja, M = Media, A = Alta y C = Completo) y definir su capacidad máxima a un nivel mínimo de comodidad.



Fig. 6. Autobus Pegaso 6035 tres puertas con un nivel de ocupación completo.

METODO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMIENTO PARA LINEAS URBANAS DE AUTOBUSES

Los anteriores niveles de ocupación se definieron de la siguiente forma:

- Ocupación baja (B). En el autobús quedan asientos libres suponiendo que todas las personas prefieran viajar sentadas.
- Ocupación media (M). Autobús con todos los asientos ocupados y personas viajando de pie que no llenan un tercio del pasillo central.
- Ocupación alta (A). Autobús con pasajeros de pie que no llenan más de las tres cuartas partes del pasillo central.
- Ocupación completa (C). Autobús con viajeros incluso en la plataforma de entrada ya sea delantera o posterior.

Apoyándose en las anteriores definiciones y con la ayuda del citado juego de fotografías, se estableció la siguiente tabla de equivalencia:

Autobús articulado:	B = 20 viajeros/autobús
	M = 47 viajeros/autobús
	A = 75 viajeros/autobús
	C = 110 viajeros/autobús
Autobús tres puertas:	B = 14 viajeros/autobús
	M = 32 viajeros/autobús
	A = 64 viajeros/autobús
	C = 90 viajeros/autobús
Autobús dos puertas:	B = 15 viajeros/autobús
	M = 37 viajeros/autobús
	A = 52 viajeros/autobús
	C = 70 viajeros/autobús

TRANSPORTS DE BARCELONA S.A. (SPM)

LINIA : 56

 LLUC D'OBSERVACIO : PUNT 189
 NUMBRE DE DIES : 4

NIVELLS D'OCCUPACIO (MITJOS)

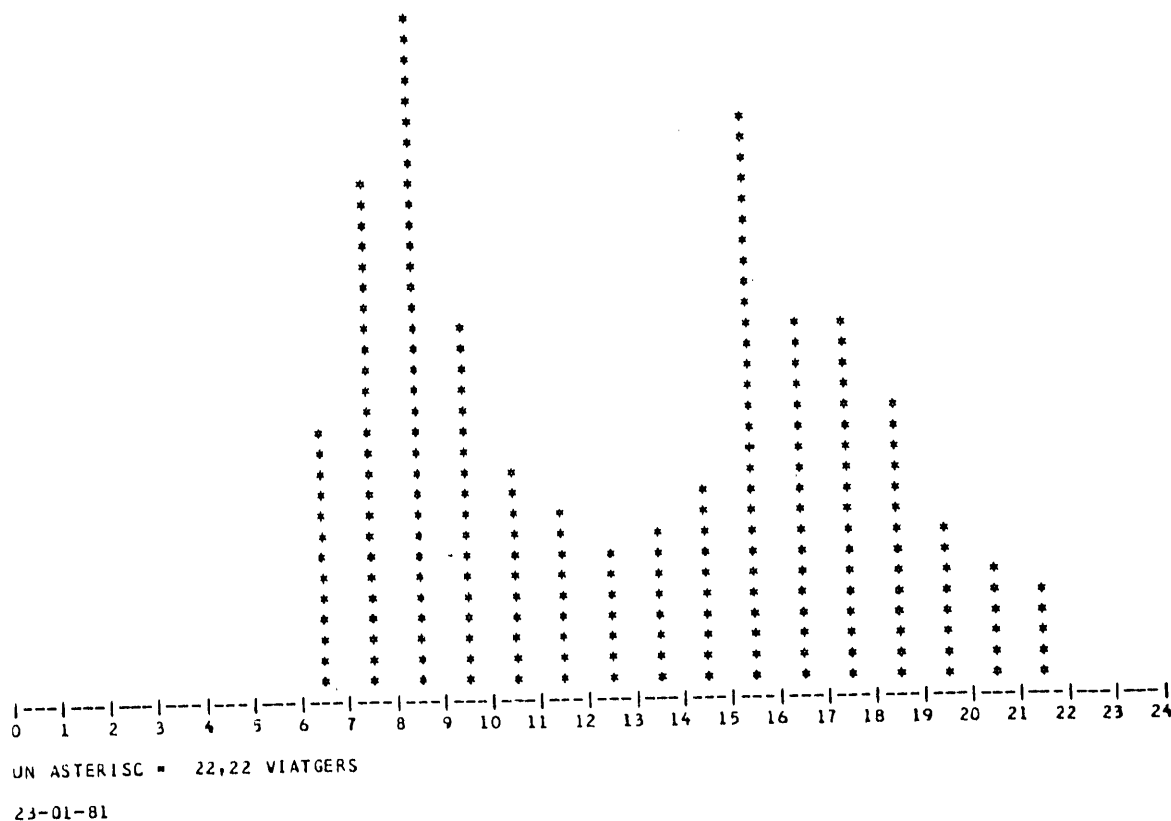
HORES	NUMBRE PASSADERS	CAPACITAT LINIA	VIATGERS TRANSPORTATS	NUMBRE MIG VIATG. BUS
5,30 - 6	0,50	45	17	34
6 - 7	5,25	473	306	58
7 - 8	5,75	518	567	98
8 - 9	9,50	852	740	78
9 - 10	8,00	713	417	52
10 - 11	8,25	739	266	32
11 - 12	8,75	780	220	25
12 - 13	8,50	758	174	20
13 - 14	8,50	758	181	21
14 - 15	8,50	762	230	27
15 - 16	8,25	732	639	77
16 - 17	8,75	780	408	47
17 - 18	8,25	743	404	49
18 - 19	7,75	690	316	41
19 - 20	8,50	758	188	22
20 - 21	6,00	540	148	25
21 - 22	5,75	510	112	19
22 - 22,30	0,25	23	12	47
NUMBRE MIG MAXIM :				
7 - 7,30	3,00	270	282	94
7,30 - 8	2,75	248	285	104

Niveles de ocupación medios en la sección más cargada de la línea 56 en el sentido Besós-Collblanch.

Figura 7.

NIVELLS D'OCUPACIO (MITJOS)

LINIA : 56
 LLOC D'OBSERVACIO : PUNT 189
 NOMBRE DE DIES : 4



Representación gráfica de los niveles de ocupación de los autobuses en la sección de la figura 7.

Figura 8.

Asimismo se ha considerado que las capacidades máximas —a un nivel mínimo de comodidad— de los tres tipos de autobús son 90, 75 y 60 viajeros respectivamente.

No es necesario insistir que este sistema totalmente empírico puede ser aplicado a cualquier tipo de autobús existente en una empresa de transporte público.

Estos criterios fueron debidamente explicados a los observadores para que rellenaran la columna 28 del impreso representado en la figura 3. En este sentido juega un papel fundamental la información suministrada por las personas situadas en las secciones más cargadas de la línea, ya que esos valores permitirán cuantificar el flujo horario máximo de pasajeros. (El conocimiento "a priori" del tramo más cargado se consigue entrevistando a los conductores fijos de la línea en estudio).

Con todos estos supuestos pueden elaborarse

unos cuadros para cada punto de observación en los que se indican el número de pasos de autobús, la capacidad de la línea, los viajeros transportados y el número medio de viajeros por autobús. (Un ejemplo de estos cuadros producidos por ordenador, se recoge en la figura 7).

El número de pasos de autobús se refiere a la frecuencia media, que se define como el número total de pasos de autobús por el punto de observación considerado y en el período de tiempo considerado, dividido por el número de días de observación.

La capacidad de la línea es el número total de pasos de autobús multiplicado por la capacidad máxima considerada de los vehículos, y todo ello dividido por el número de días de observación.

Los viajeros transportados se obtienen como la suma de todos los viajeros que pasan por el punto de observación considerado y en el período de

METODO SIMPLIFICADO DE DIMENSIONAMIENTO PARA LINEAS URBANAS DE AUTOBUSES

tiempo considerado, dividida por el número de días de observación.

El número medio de viajeros por autobús es igual al cociente entre el total de viajeros transportados y el número de autobuses que pasan por la sección considerada.

Por último, debe indicarse que el ordenador es capaz de producir unos gráficos en los que se refleja el número de viajeros que pasan a través del punto de observación elegido a lo largo del período de observación (figura 8).

4. NUMERO DE AUTOBUSES NECESARIOS

Los dos apartados anteriores permiten calcular los parámetros necesarios para un correcto dimensionado de una línea de autobuses, o sea, tiempos de asignación a horario para cada sentido, cargas máximas horarias unidireccionales y capacidad de los vehículos. A partir de este momento puede obtenerse el número de autobuses necesarios para la prestación de un servicio adecuado, como el mayor de los que resulten tras dimensionar la línea por "capacidad" y por "intervalo" (6).

El dimensionado por capacidad calcula el número de autobuses necesarios para transportar el flujo de viajeros que se produce en la sección más cargada de la línea, suponiendo que cada vehículo puede transportar hasta la capacidad máxima admisible señalada anteriormente.

La fórmula operativa es:

$$N = \frac{Q \cdot T}{M \cdot C}$$

N = Número de autobuses necesarios en el período de tiempo considerado

Q = Flujo máximo de viajeros en el período de tiempo considerado

T = Tiempo en minutos para dar un autobús una vuelta completa, en el período de tiempo considerado.

C = Capacidad máxima admisible por autobús.

M = Período de tiempo considerado en minutos.

El dimensionado por intervalo, calcula el número de autobuses necesarios de forma que el tiempo entre autobuses nunca sea inferior a un valor predefinido.

La fórmula operativa es:

$$N = \frac{T}{I}$$

N = Número de autobuses necesarios en el período de tiempo considerado.

T = Tiempo en minutos para dar un autobús una vuelta completa, en el período de tiempo considerado.

I = Intervalo mínimo admisible en minutos.

Con todo este paquete de resultados y los particulares acuerdos laborales de cada compañía, debe trabajar la Oficina de Horarios para establecer el cuadro de salidas y los servicios de personal más idóneos para la línea en cuestión.

5. CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología expuesta en este artículo para el dimensionamiento de las líneas de autobuses de Transportes de Barcelona, S.A. comenzó a mediados del pasado año 1980. Hasta la fecha los resultados obtenidos reflejan una disminución de kilometraje perdido por dificultades circulatorias y un relativo aumento de los viajeros transportados. Este aumento debe entenderse más como un trasvase de viajeros de una línea a otra al mejorar la explotación en una de ellas (la red de Barcelona presenta abundantes superposiciones entre líneas) que como una captación de nueva demanda, puesto que las comparaciones se efectuaron inmediatamente antes y después de la implantación del nuevo horario. Ahora bien estos esperanzadores resultados únicamente garantizan el cumplimiento del cuadro de salidas por los autobuses de una línea y el transporte de los pasajeros en unas condiciones mínimas de comodidad, pero no solucionan el problema de la regularidad de marcha de los vehículos una vez abandonan los terminales. Este es un campo en el que los nuevos avances en telecomunicación e informática tienen mucho que aportar y se están empezando a estudiar aplicaciones concretas en Transportes de Barcelona, S.A.

Por último es preciso señalar los puntos que requieren un estudio más profundo después de casi un año de recogida y tratamiento ininterrumpido de información.

En primer lugar deben analizarse las fluctuaciones de las intensidades de tráfico a lo largo del año (especialmente de octubre a junio) que se producen

en la ciudad y las repercusiones que tienen en las condiciones de circulación de los autobuses. Otro aspecto que se está estudiando en la Oficina Técnica de Tráfico es la modificación del programa de ordenador, para el cálculo -- a partir de los datos de campo -- de los períodos de tiempo en que puede suponerse estable el tiempo de recorrido de los autobuses entre terminales.

APENDICE 1

Sea X una variable aleatoria normal de media m y desviación típica σ , y sea Y una variable aleatoria lognormal de igual media e igual desviación típica.

Es fácil demostrar que el valor k tal que la función de distribución acumulada para ambas variables es igual a 0,9 ($F_X(k_X) = F_Y(k_Y) = 0,9$), es:

$k_X = m + 1,28 \cdot \sigma$ para la variable aleatoria normal
 $k_Y = m + e^a$ para la variable aleatoria lognormal

siendo $a = 1,28 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right)}$

$- 0,5 \cdot \ln\left(\frac{\sigma^2}{m^2} + 1\right)$

En el cuadro A.1 se comprueban la insignificante diferencia entre los valores de k_X y k_Y para diferentes valores de m y σ habituales en líneas de autobuses urbanos.

	LINEA A m = 15, σ = 1	LINEA B m = 30, σ = 2	LINEA C m = 45, σ = 3
k_X	16,28	32,56	48,84
k_Y	16,30	32,59	48,86
$\frac{k_Y - k_X}{k_X} \cdot 100$	0,12	0,09	0,04

Cuadro A.1. Comparación de las distribuciones normal y lognormal, para diferentes líneas tipo.

APENDICE 2

Siendo X una variable aleatoria normal de media m y desviación típica σ , los valores del "tiempo de asignación a horario" t en función del nivel de

seguridad j, resultan ser:

- j = 80 % t = m + 0,84 . σ
- j = 85 % t = m + 10,4 . σ
- j = 90 % t = m + 1,28 . σ
- j = 95 % t = m + 1,64 . σ
- j = 99 % t = m + 2,33 . σ

Las expresiones anteriores aplicadas al caso de una línea de autobuses urbanos concreta (m = 30, σ = 2), producen los resultados recogidos en el cuadro A.2.

j (%)	t (*)	t ₉₀ = 100
80	31,68	97,3
85	32,08	98,5
90	32,56	100,0
95	33,28	102,2
99	34,66	106,4

(*) Línea con m = 30, σ = 2.

Cuadro A.2. Valores comparativos del "tiempo de asignación a horario" en función del nivel de seguridad.

REFERENCIAS

1. Jornadas Municipales sobre Ahorro de Energía en la Ciudad. Madrid, marzo 1980.
2. Valero, J.: "Transporte colectivo, su influencia en el ahorro energético", Jornadas Municipales sobre Ahorro de Energía en la Ciudad. Madrid, marzo 1980.
3. White, P.: "Alternative Future Levels of Public Transport Demand", Transport Studies Group, P.C.L. London, November 1976.
4. Benjamín, J.R. and Cornell, C.A.: "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers", Mc Graw-Hill, New York, 1970.
5. Turnquist, M.A.: "A Model for Investigating the Effects of Service Frequency and Reliability on Bus Passenger Waiting Times", Northwestern University, 1977.
6. Albers, E.: "Metodología Aplicada en los Estudios Sectoriales", Oficina Técnica de Tráfico, Transportes de Barcelona. Barcelona, 1980.
(Informe interior no publicado).