



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**SEGURIDAD DE PASAJEROS EN SITUACIONES  
DINÁMICAS Y ESTÁTICAS DE LOS TRANSPORTES  
PÚBLICOS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**FÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**OSCAR CÓRDOBA RODRÍGUEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. MARCELO DEL CASTILLO MUSSOT  
(2010)**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno  
Apellido paterno  
Apellido materno  
Nombre(s)  
Teléfono  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Carrera  
Número de cuenta

1. Datos del alumno  
Córdoba  
Rodríguez  
Oscar  
26258999  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Física  
097272467

2. Datos del tutor  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

2. Datos del tutor  
Dr  
Marcelo  
del Castillo  
Mussot

3. Datos del sinodal 1  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

3. Datos del sinodal 1  
Fís  
Claude  
Thions  
Chaudy

4. Datos del sinodal 2  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

4. Datos del sinodal 2  
Dr  
Jorge Antonio  
Montemayor  
Aldrete

5. Datos del sinodal 3  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

5. Datos del sinodal 3  
M en C  
Mirna  
Villavicencio  
Torres

6. Datos del sinodal 4  
Grado  
Nombre(s)  
Apellido paterno  
Apellido materno

6. Datos del sinodal 4  
Dr  
José Luis  
Álvares  
García

7. Datos del trabajo escrito.  
Título

7. Datos del trabajo escrito  
Seguridad de pasajeros en situaciones  
dinámicas y estáticas de los transportes  
públicos

Número de páginas  
Año

37 p  
2010

# INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 Problemas de transporte en las diferentes ciudades	1
1.2 La Ciudad de México	2
1.3 La seguridad en los transportes públicos.	10
<b>2. SITUACIONES ESTÁTICAS</b>	13
2.1 Acomodo de niños entre adultos que se encuentran en un transporte público saturado	13
2.1.1 Aproximación de las personas en secciones transversales mediante círculos.	13
2.1.2 Aproximación de las personas en secciones transversales mediante elipses.	15
2.2 Medición de pechos, hombros y cintura en adultos y bebés.	17
2.3 Espacio seguro para bebés en un transporte que se encuentra a su máxima capacidad.	19
2.3.1 Resguardando al bebé entre el espacio intersticial de 3 personas.	19
2.3.2 La protección de bebés colocándolos entre el costado de dos adultos.	20
2.4. Fuerzas soportadas en el tórax de adultos y su capacidad respiratoria.	22
2.4.1 Los experimentos.	23
2.5 Montaje: Donde caben cinco caben seis.	26
<b>3. SITUACIONES DINÁMICAS</b>	28
3.1 Fuerza necesaria para sufrir una fractura en el tórax.	28
3.2 Fuerza soportada por la persona que se encuentra en la parte frontal del transporte público	29
3.3 Propiedades de los transportes	30
3.4 Desaceleraciones lineales	31
3.5 Resultados	34

<b>4. OBSERVACIONES FINALES</b>	36
<b>5. BIBLIOGRAFÍA</b>	38

# 1. Introducción

## 1.1 Problemas de transporte en las diferentes ciudades

Muchas ciudades grandes del mundo, como Tokio, México y Nueva Delhi, se encuentran sobrepobladas, ello genera diferentes tipos de problemas, todos relacionados con la saturación de los servicios; principalmente de los servicios públicos. Entre estos servicios se encuentran los servicios de salud, de seguridad, servicios administrativos, de vías públicas y de transporte público.

En algunos casos como en los servicios de salud, la opción para mejorar este servicio es la creación de más clínicas y hospitales, y promoviendo un servicio al mismo tiempo más eficiente [1]; en el caso de la seguridad se implementan nuevos programas de seguridad [2]; para los servicios administrativos, se deben buscar medidas que procuren agilizar las operaciones en los servicios [3]. Sin embargo, en el caso de las vías públicas destinadas al transporte de autos, la construcción de más avenidas resulta imposible por la falta de espacio pues la misma saturación que hay en las ciudades grandes lo imposibilita.

En México existen varios tipos de transporte público de gran eficiencia además del Metro: el Tren Ligero, el Tren Suburbano, el Metrobús, el tren Férreo y el Tren ligero. Aunque son demasiados tipos de transportes, sólo el Metro y el Metrobús cuentan con una red de transporte y todos estos sistemas de transporte público resultan insuficientes para el transporte de los millones de usuarios. Cuando el transporte público se encuentra a su capacidad máxima, los usuarios sufren daños debido a la saturación. En primera instancia, pueden sufrir asfixia, ya que al presionar el pecho de una persona éste no puede realizar los movimientos naturales de respiración. Por otra parte, en caso de

## Introducción

que la presión sea muy grande el tórax puede sufrir una fractura. También puede ocurrir una fractura si el transporte se detiene bruscamente cuando se viaja a altas velocidades.

En este trabajo se estudia la forma de hacer más eficientes y seguros los sistemas de transporte público, en particular, en la ciudad de México. Cabe mencionar que muchos de los resultados encontrados se pueden aplicar a otras ciudades.

### 1.2 La Ciudad de México

El gobierno actual de la Ciudad de México (GDF) ha hecho un diagnóstico de los problemas de transporte que sufre esta ciudad. En su página del Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal (FMVC) [4], se encuentra un documento donde se aborda el problema de movilidad que se sufre en la Ciudad de México, dividido en 4 secciones. En la *primera parte* se hace un diagnóstico de la movilidad en esta ciudad, haciendo referencia a sus limitaciones geográficas: *... En una cuenca casi cerrada ubicada a 2, 240 metros sobre el nivel del mar, hace más de cinco décadas inició la ocupación masiva de su territorio por una población en crecimiento constante y con actividades muy diversas que excedió los límites administrativos y políticos de la ciudad, para mezclarse con los municipios del vecino Estado de México y que hoy integra a las 16 delegaciones del DF., 58 municipios del Estado de México y 1 del Estado de Hidalgo, para configurar la zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).*

Otro de los datos importantes presentados en este documento es el aumento demográfico:

## Introducción

*La población pasó de 2 millones 953 mil habitantes en 1950 a 18 millones 210 mil en el año 2000 (para el año 2010 la población se calcula en 20 137 152 habitantes<sup>1</sup>). La ocupación física del territorio pasó de 22 mil 960 hectáreas a más de 741,000 ha., que representa el 0.37% de la superficie total del país.*

Además, nos habla del consumo energético que esto implica.

*En ese fragmento del territorio nacional ocurrió la concentración humana, industrial, comercial y financiera más importante del país, donde se asientan 35 mil industrias y 3.5 millones de vehículos con altos consumos de energía fósil (gasolinas, diesel y gas) y todo ello en una cuenca que favorece la retención de emisiones contaminantes. La ZMVM en 1998 consumió 301 mil barriles diarios de gasolina equivalente.*

Lo anterior que implica la tendencia al aumento de los viajes largos respecto a los viajes cortos.

Tomando en cuenta que los viajes que se realizan en el Distrito Federal son, del tipo: interdelegacionales, al interior de cada delegación y metropolitanos; se comenta sobre los cambios abruptos en los patrones de viaje, *En 1983 los viajes con origen - destino en las delegaciones<sup>2</sup> del Distrito Federal representaban casi el 62 por ciento del total de viajes que se realizan en la Ciudad , en 1994 su participación se redujo a menos del 57 por ciento y siguiendo con este patrón, los viajes interdelegacionales eran más importantes (32%) que los viajes al interior de cada delegación (24%).*

Además del gran aumento que se ha generado en el número de viajes

---

<sup>1</sup> Esto según los resultados preliminares del Censo de Población y Vivienda, del INEGI ([http://www.censo2010.org.mx/doc/cpv10p\\_pres.pdf](http://www.censo2010.org.mx/doc/cpv10p_pres.pdf))

<sup>2</sup> Los viajes con origen destino, incluye los viajes interdelegacionales y los viajes al interior de cada delegación.

## Introducción

metropolitanos. *Por su parte, los viajes metropolitanos (los que cruzan el límite del Distrito Federal y el Estado de México), pasaron del 17 a casi el 22 por ciento; esto significa poco más de 4.2 millones de viajes por día. Es decir, tienden a predominar más los viajes largos que los viajes cortos. Inclusive, se estima que para el 2020 esta cifra será cercana a los 5.6 millones de viajes y representará cerca del 20% del total de viajes en la ZMVM (28.3 millones de viajes en total). Además los viajes que se realizan en la ZMVM coinciden en espacio y tiempo. Del total de 20.57 millones de viajes registrados, el 33% se llevan a cabo de 6 a 9 de la mañana.*

Otro dato importante dentro de este documento, son los problemas que generan esta distribución de viajes dentro de la ZMVM.

*La movilidad en el Valle de México se enfrenta a varias distorsiones e insuficiencias tanto en los varios modos de transporte como en la red vial disponible. Es una contradicción entre una masa de cerca de 3.5 millones de vehículos (autos, autobuses, camiones, camionetas, motocicletas) y una red de vialidades saturadas con desarticulaciones e ineficiencias en la coordinación de los diversos modos de transporte, que afectan la velocidad, los tiempos empleados, las emisiones de contaminantes y la salud de los habitantes.*

*En esa transformación destacan varios rasgos importantes. 1) La participación del vehículo en el transporte total de pasajeros privado se redujo de 25 a 16 por ciento entre 1986 y el 2000, a pesar de que el número total de vehículos aumentó en cerca de medio millón. 2) La participación del Metro decreció de 19 a 14 por ciento a pesar del aumento en el número de kilómetros de líneas. 3) La base sustancial del transporte público en la Ciudad de México es el*

## Introducción

*transporte de superficie*<sup>3</sup> (56 por ciento en 1986 y 70 por ciento en 2000). Sin embargo, mientras en 1986 predominaban los autobuses de mediana capacidad, éstos fueron sustituidos por microbuses y combis de mediana y baja capacidad. Asimismo, resalta la reducción acentuada de la capacidad del transporte administrado por el gobierno, producto en parte por la desaparición de Ruta 100, mientras que los modos con mayor atracción son de baja capacidad, provocando saturación de vialidades, inseguridad para el usuario y alto impacto ambiental.

Este último párrafo deja en claro los diferentes percances que sufren la mayoría de los usuarios del transporte público, además son tramos largos los que más predominan, en los viajes de estos usuarios:

Para el 2000 de cerca de 21 millones de pasajeros transportados diariamente casi 60%, lo hacían mediante microbuses, combis y taxis. Desde el punto de vista de la eficiencia del sistema de transporte, preocupa el hecho de que un volumen tan alto de viajes se realicen en medios colectivos de baja capacidad tanto en el Distrito Federal, donde se realizan cerca de ocho millones de tramos de viajes en estos medios, como en los viajes entre el Distrito Federal y el Estado de México, que suman cuatro millones de tramos de viajes adicionales. Además, de acuerdo con los datos del Programa de Verificación Vehicular 2001, el número de vehículos en circulación es de 1.7 millones de automóviles particulares con placas del Distrito Federal, y 0.6 millones con placas del Estado de México, en conjunto, más del 95% del total de vehículos automotores que operan en la ZMVM captaron menos del 20% del total de la demanda del tramo de viajes.

---

<sup>3</sup> Entre estos viajes superficiales, se encuentra parte del recorrido que realiza El Metro, ya que el 40% del servicio proporcionado lo hace en la superficie (<http://www.metro.df.gob.mx/operacion/longlineas.html>).

De acuerdo con el Programa de Calidad del Aire 2002-2010 (Proaire 2002-2010), los vehículos automotores de la ZMVM son la principal fuente de contaminación atmosférica. Para que ese alto impacto ambiental se produzca concurren varios factores: la cantidad de automotores, superior a los tres millones de unidades, la expansión de la mancha urbana, la cual impacta en el incremento del kilometraje recorrido por viaje, y la saturación creciente de la red vial que obliga a incrementar el tiempo de operación de los motores en condiciones ineficientes a bajas velocidades de circulación. Por todo ello para satisfacer la demanda de energía de esta flota inmensa, con viajes largos y velocidades lentas, se requieren 4.5 millones de litros de diesel, 18 millones de litros de gasolina y 700 mil litros de gas licuado de petróleo diariamente.

A partir del análisis de la problemática de la transportación de personas en la ZMVM, el Fideicomiso para el mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal (FMVC) genera diversas propuestas, entre ellas:

1. **Se propone crear una verdadera red vial**, con una vialidad primaria ampliada que esté integrada con la red secundaria y con áreas de transferencia multimodal que atiendan la generación de viajes del oriente, centro y norte de la ciudad. Es desde esta perspectiva que se contempla la ampliación de la capacidad de la red vial del DF y la atención prioritaria de zonas conflictivas, la modernización de los Centros de Transferencia Modal<sup>4</sup> (CETRAM), así como la construcción del Segundo Nivel donde “además de mejorar las condiciones operacionales y ambientales del Anillo Periférico y

---

<sup>4</sup> También conocidos como paraderos.

## Introducción

del Viaducto, con esta obra se pretende potenciar la vocación de estas vías, como vías rápidas de acceso controlado, de comunicación zonal y regional en el sentido Norte –Sur, Oriente – Poniente, y su integración con la red vial primaria y secundaria.”

El propósito es lograr un desarrollo integral de los servicios de transporte mediante la integración de la red operada por los organismos de transporte del GDF y el mejoramiento de los servicios de transporte concesionado (taxis implantados en sitios, y colectivos de ruta fija en corredores integrales de transporte). Aún y con su deficiente captación de pasajes la red operada por el gobierno es la estructura vertebral que permite rediseñar corredores estratégicos de transporte automotor.

**2. Optimizar el uso de la red vial**, a través del ordenamiento de flujos de tránsito así como del diseño y la habilitación de corredores viales. El proyecto de corredores de transporte público, busca lograr un mejor equilibrio entre la oferta y la demanda en los corredores seleccionados, así como reducir los tiempos de recorrido de los usuarios; adicionalmente se reducirá la sobreposición de rutas en las principales vialidades, los congestionamientos viales y la contaminación asociada a la sobreoferta de vehículos. A través de estos corredores, se busca dar prioridad al transporte público de superficie de mediana capacidad en las principales vialidades, garantizando una velocidad crucero estable, independientemente del transporte privado.

## Introducción

Los corredores de transporte consisten en la construcción de carriles confinados exclusivos para autobuses, que operan con reglas específicas para su uso, con una programación y control de los servicios adecuados al comportamiento y horario de la demanda y con el equipamiento necesario (coordinación de semáforos y señalización)) para asegurar su operación eficiente. Para su operación se requiere además de la construcción de estaciones de transferencia en los extremos del corredor y de paradas en puntos seleccionados de la vialidad.

En el periodo 2002 – 2006 se implementarán al menos 5 corredores de transporte con infraestructura y equipamiento preferencial para las unidades en servicio. Considerando estos corredores, se diseñará e implementará una estrategia de reestructuración del transporte público concesionado, y se definirá los esquemas operativos adecuados en cada uno de ellos, tendientes a una verdadera integración modal.

**3. Construcción de puentes vehiculares y distribuidores viales** Estos tienen el objetivo de optimizar la circulación del transporte de superficie, evitando los cruces conflictivos. Destacan los cruces de San Antonio y circuito interior, Francisco del Paso y Troncoso- Oceanía; Oriente 253 – Calzada I. Zaragoza; Eje 1 Norte (Talleres Gráficos) y A. Periférico; Puente Vehicular Anillo Periférico – Av. Centenario; Anillo Periférico – Palmas 2ª Etapa; Laterales A. Periférico – Paseo de la Reforma; Eje 5 Sur (San Antonio) – Puente Eje 5 Poniente (Alta Tensión); Anillo Periférico – Eje 7 Sur B. Cellini; Circuito Interior – Molinos; Av. Revolución – Barranca del Muerto; 2ª Etapa del Distribuidor Av. Tláhuac – Anillo Periférico; Anillo Periférico – Ejes 5 Sur (Leyes

## Introducción

de Reforma); Anillo Periférico – Ejes 3 y 4 Sur (Canal de Tezontle) y la Prolongación del Eje 3 y 4 Sur hasta República Federal.

**4. Segundos niveles en Viaducto y Periférico.** Una de las acciones más importantes en este sentido es la construcción de los segundos niveles en Periférico y Viaducto, cuyo objetivo principal es lograr una mejor fluidez en la vialidad y una reducción en los índices de contaminación.

**5. Ciclopistas.** Se promoverá la construcción de ciclopistas como un medio alternativo de transporte y de infraestructura. El proyecto principal de ciclista es utilizar el derecho de vía del ferrocarril México-Cuernavaca de Ejercito Nacional a Tlalpan, así como circuitos secundarios en Polanco, Chapultepec, Colonia Roma y San Jerónimo-Ciudad Universitaria.

**6. Sistemas de Transporte.** Una de las principales causas de los conflictos que se tienen en materia de transporte en la Ciudad es la falta de planeación, por lo cual las principales acciones en este sentido son:

Modernización y mayor captación del transporte público operado por el GDF. Además, se adquirirán<sup>5</sup> 45 trenes nuevos del Metro que junto con la modernización de los sistemas de control permitirán ampliar la capacidad de este modo de transporte de alta capacidad en las rutas de los principales orígenes destino de la ciudad. Asimismo, se evaluará la incorporación de 40 trolebuses nuevos para incrementar la oferta de servicio en las líneas actuales de STE.

---

<sup>5</sup> En el documento no se especifica el año en que los adquirirán.

### **1.3 La seguridad en los transportes públicos.**

Dentro de las propuestas que se encuentran en el documento [4] del FMVC, el punto 6 se refiere a las adecuaciones necesarias al transporte público que permitan ampliar la capacidad. Dentro de estas adecuaciones, es necesario implementar medidas de seguridad ante un aumento de pasajeros, el riesgo de un accidente en conglomeraciones humanas es mayor.

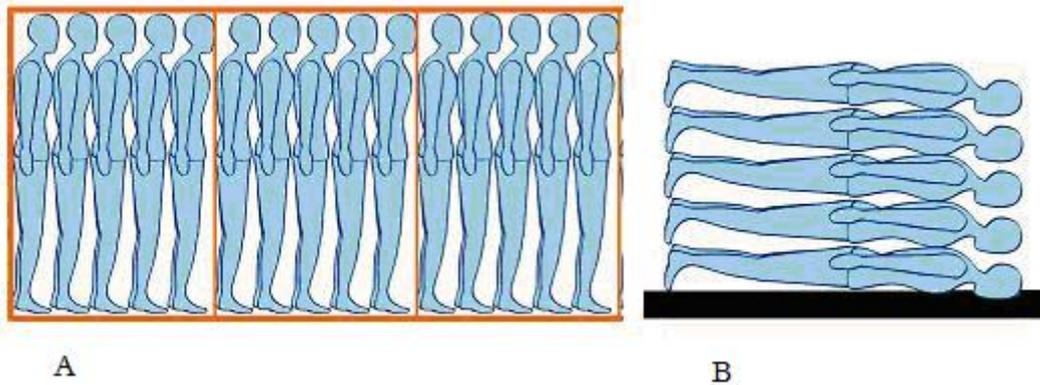
Existen estudios sobre los flujos en muchedumbres humanas en diversas condiciones, siendo éste un problema interdisciplinario.

Existen flujos peatonales que cambian suavemente como en el caso de movimiento peatonal normal, pero cuando existen problemas de pánico local o global en condiciones críticas, pueden ocurrir accidentes muy graves. Por ejemplo, hay reportes y estudios de aglomeraciones con accidentes como en algunas peregrinaciones musulmanas a La Meca [5], o en eventos deportivos [6] [7]. También, existen situaciones relacionadas con el transporte colectivo que pueden implicar grave peligro de daño por accidentes a los agentes vivos debido a las fuerzas inerciales provocadas por movimientos relativos diferenciales entre los distintos componentes del sistema.

Este trabajo presenta un problema muy poco estudiado: el caso en el que la densidad de personas es muy alta y está confinado por muros en espacios relativamente reducidos. Investigaremos el transporte seguro de pasajeros en contenedores. Existen situaciones relacionadas con el transporte que pueden provocar graves daños a los usuarios debido a las fuerzas de inercia a las que son sometidos los distintos componentes del sistema (figura 1). Éste trabajo se

## Introducción

centra en las aceleraciones y las presiones sobre los usuarios, a diferencia de otros trabajos que estudian las colisiones entre vehículos particulares, dando resultados que no necesariamente se pueden aplicar a transportes públicos.



**Figura 1.** Nuestro trabajo se centra en las aceleraciones y las presiones sobre los pasajeros en los transportes públicos. (A), podemos comparar estos con la fuerza que ejerce en personas amontonadas (B).

En esta tesis se estudian dos casos; el estático y el dinámico. En el primero las densidades de personas o seres vivos son muy altas y están confinados por paredes en espacios relativamente reducidos sin incluir aceleraciones. En el segundo, este trabajo se enfoca en las aceleraciones de frenado que provocan fuerzas y presiones muy peligrosas sobre las personas que viajan en transportes colectivos. Las aceleraciones que estamos considerando son pequeñas comparadas con la de colisiones muy violentas en vehículos de transporte estudiadas en muchos otros trabajos [8-13].

Tanto en la primer parte del trabajo como la segunda, presentan subdivisiones de estudio:

En el caso estático:

- 1) Acomodo de niños entre adultos
- 2) Máxima presión para respirar

## Introducción

En el caso dinámico:

3) Medición de velocidades y aceleraciones realistas en transportes colectivos bajo frenado

4) Máxima presión antes de ocurra una fractura

5) Bajo frenados bruscos se propone incluir divisiones en vagones para disminuir la acumulación de fuerzas inerciales debidas a la aproximación entre los usuarios.

La tesis está dividida en 3 secciones. La primera sección contiene los casos estáticos, en donde se estudiaran, el acomodo de niños entre adultos y la máxima presión para poder respirar. La segunda sección contiene los casos dinámicos, en donde se encontrará la máxima presión antes de que ocurra una fractura y el diseño de vagones más seguros. En la última sección se muestran los resultados encontrados.

## **2. SITUACIONES ESTÁTICAS**

### **2.1 Acomodo de niños entre adultos que se encuentran en un transporte público saturado**

Es sabido que en conglomeraciones muy grandes, los bebés y los niños son los que presentan mayor propensión a sufrir algún tipo de lesión, por lo que es a ellos a quienes más se debe proteger en estas situaciones. Una forma de protegerlos es colocándolos entre los adultos (padres, tutores, etc). En esta sección veremos la mejor forma de cuidar a bebés que se encuentran en aglomeraciones, colocándolos entre adultos.

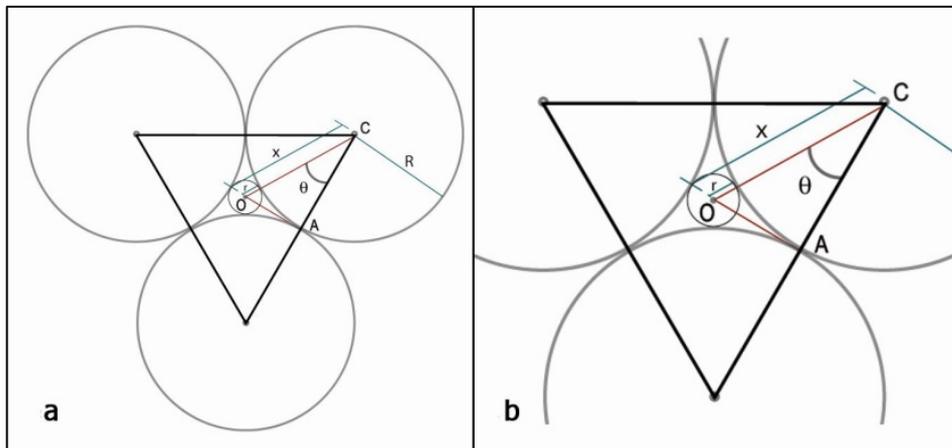
#### **2.1.1 Aproximación de las personas en secciones transversales mediante círculos.**

Una forma de acomodar a bebés es entre tres personas, quedando el bebé en el centro de las tres, en el espacio intersticial. Veamos de qué tamaño es el bebé que puede caber en este hueco.

Como una primera aproximación se modela a las personas que se encuentran de pie como círculos cuando se observan desde arriba. Así, en dos dimensiones, el problema de encontrar las condiciones óptimas de “empaque” para los dos tipos de personas (adultos y bebés), se reduce a encontrar el círculo de radio  $r$  (el bebé) desconocido insertado en el espacio intersticial de los círculos de radio  $R$  (los adultos). Donde los círculos de radio  $R$  representan a los adultos y el círculo de radio  $r$  representa al niño. Este problema simple es el primer paso para resolver un sistema de empaque granular aplicado a

personas.

En la Figura 2, el triángulo formado por los tres centros de tres círculos del mismo tamaño es un triángulo equilátero con lados iguales a  $2R$ , donde  $R$  es el radio de los círculos que representan a los adultos. Como sabemos, el circuncentro (punto de intersección de las líneas medias de los lados del triángulo) y el ortocentro (punto de intersección de las alturas de un triángulo) de un triángulo equilátero son el mismo punto (el punto O en la Figura 2). Este punto es el centro del círculo intersticial de radio  $r$ .



**Figura 2.** a) El pequeño círculo de radio  $r$ , entre los tres círculos principales representantes de los pasajeros adultos. b) Una sección ampliada de a).

El radio  $r$  del círculo intersticial es la diferencia entre la distancia  $OC$  (llamado  $x$  en nuestro análisis) y el radio  $R$   $r = x - R$ . Por tanto,  $x - R$  puede calcularse a partir del triángulo  $OCA$  y  $\theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo formado por la bisectriz del vértice  $C$  y el lado  $A$ , donde  $\theta = 30^\circ$ . Así del triángulo  $OCA$  se tiene:

$$\cos \theta = \frac{R}{x} \dots\dots\dots (1)$$

$$x = \frac{R}{\cos \theta} = \frac{R}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{2R}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (2)$$

$$r = x - R = \frac{2R}{\sqrt{3}} - R = R\left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) \approx 0.15R \dots\dots\dots (3)$$

La última ecuación da un valor de r de aproximadamente el 15% del valor de R. Esta primera aproximación es insuficiente para simular el acomodo de las personas, ya que una persona vista desde arriba no es nada parecida a un círculo; por eso haremos una segunda aproximación; el cuerpo de una persona vista desde arriba tiene forma mas parecida a una elipse, así que la segunda aproximación será utilizando elipses; la aproximación mediante círculos será de gran ayuda para encontrar el tamaño de la elipse que cabe entre la intersección de 3 elipses.

**2.1.2 Aproximación de las personas en secciones transversales mediante elipses.**

Un modelo más realista del cuerpo humano con las condiciones de empaquetamiento seguro es considerar las secciones transversales de las personas como elipses vistas desde arriba, esto dará una mejor aproximación de la diferencia de longitud entre el ancho del pecho y el largo de los hombros. Es posible utilizar una transformación lineal que transforma el círculo en una elipse al extender o acortar el eje horizontal o vertical del círculo. Si C(x,y) es la ecuación de un círculo, entonces la transformación lineal que se necesita es de la forma:

$$T(C(x, y)) = \left(\frac{\beta}{R}x, y\right) \dots\dots\dots (4)$$

donde  $\beta$  es el tamaño del eje horizontal de la elipse que se quiere obtener y su eje vertical es R ( el radio del círculo). Por lo tanto, para tener una elipse con eje horizontal  $\beta$  y eje vertical R, sólo es necesario aplicar la

transformación (4) a un círculo de radio R. Si aplicamos la transformación a los círculos de la figura 2a obtenemos las elipses de la figura 3.

Sean las ecuaciones de los tres círculos de la figura 2a)

$$C_1 = (2\cos(t) - 2, 2\sin(t) + 2) \dots\dots\dots (5)$$

$$C_2 = (2\cos(t) + 2, 2\sin(t) + 2) \dots\dots\dots (6)$$

$$C_3 = (2\cos(t), 2\sin(t) - 1.47) \dots\dots\dots (7)$$

$$c = (2 * 0.15\cos(t), 2 * 0.15\sin(t) + .83) = (0.3\cos(t), 0.3\sin(t) + .83) \dots\dots\dots (8)$$

$C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  son los círculos mayores que se intersectan entre sí, todos ellos tienen un radio  $R=2$ , y  $c$  es el círculo circunscrito con radio  $r=0.3$ , este radio es el resultado de aplicar la ecuación (3).

Veamos que pasa si le aplicamos la transformación (4) a las ecuaciones (5), (6), (7) y (8) tomando a  $\beta=5$ .

$$T(C_1) = (5\cos(t) - 5, 2\sin(t) + 2) \dots\dots\dots (9)$$

$$T(C_2) = (5\cos(t) + 5, 2\sin(t) + 2) \dots\dots\dots (10)$$

$$T(C_3) = (5\cos(t), 2\sin(t) - 1.47) \dots\dots\dots (11)$$

$$T(c) = (5 * 0.15\cos(t), 0.3\sin(t) + .83) = (0.75\cos(t), 0.3\sin(t) + .83) \dots\dots\dots (12)$$

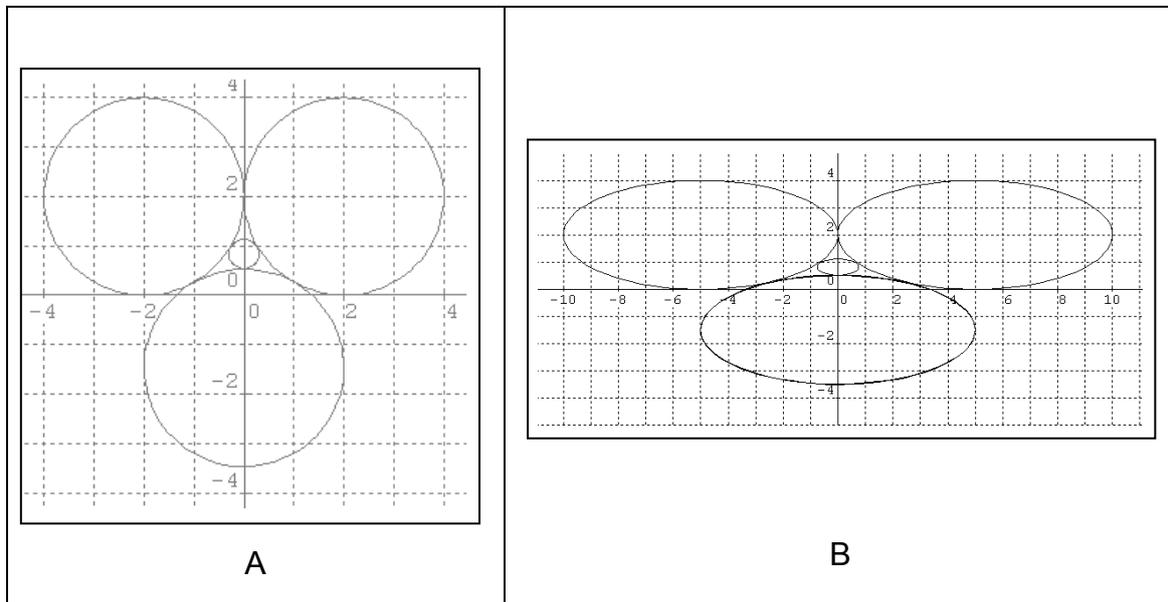
Así, vemos que la relación (4) se cumple también para las elipses, es decir, la relación que guarda el eje mayor de las tres elipses mayores, con el eje mayor de la elipse circunscrita, es igual que la relación que se guarda entre círculos:

$$a \approx 0.15A \dots\dots\dots (13)$$

Con  $a$  el eje mayor de la elipse inscrita entre las elipses, que tienen eje mayor igual a  $A$ . Esta misma relación se cumple entre los ejes menores de las elipses

$$b \approx 0.15B \dots\dots\dots (14)$$

Esto se ejemplifica la figura 3, donde se grafican los círculos con radio  $R = 2$  y  $R = 0.3$ , además de las elipses con ejes mayores  $A = 5$  y ejes menores  $B = 2$ ; también aparece la elipse intersticial con eje mayor  $a = 0.75$  y eje menor  $b = 0.3$



**Figura 3.** A) Círculos de radio  $R=2$ , y un círculo intersticial de radio  $r=0.13$ . B) A estos círculos se les aplica la transformación (4) resultando tres elipses con eje mayor  $A=5$  y eje menor  $B=2$ , además de la elipse intersticial con eje mayor  $a=0.75$  y eje menor  $b=0.13$

## 2.2 Medición de pechos, hombros y cintura en adultos y bebés.

Con el fin de aplicar este modelo geométrico al acomodo de niños entre adultos, es necesario conocer diferentes medidas: el ancho del tórax (longitud del pecho a la espalda) y el largo de los hombros (la longitud que hay de hombro a hombro). Se hicieron mediciones en algunos adultos jóvenes mexicanos (sólo hombres), y también se obtuvieron mediciones similares de la literatura para los bebés [14]. En las tablas I, II y III se presentan los resultados de las mediciones, junto con el promedio de los adultos de 20, 25 y 30 años, respectivamente. Cabe señalar que solo se hicieron las mediciones en 5 personas para cada edad, esto podría parecer insuficiente estadísticamente hablando; sin embargo queda fuera del alcance de esta tesis el realizar un

## Situaciones Estáticas

estudio estadístico entre la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.; por otro lado, estas mediciones nos ayudan a darnos una idea de las tallas en las diferentes personas.

Persona	Ancho de tórax ( $\pm$ )	Longitud de hombros ( $\pm$ 0.5cm)	Ancho de cintura ( $\pm$ 0.5cm)
1	24.1	35.5	30.7
2	24.7	38.4	33.4
3	22.4	36.9	27.6
4	23.1	34.8	32.3
5	23.6	35.1	28.1
Promedio	23.6	36.1	30.4

**Tabla I.** Mediciones de tórax en personas de 20 años de edad.

Persona	Ancho de tórax ( $\pm$ )	Longitud de hombros ( $\pm$ 0.5cm)	Ancho de cintura ( $\pm$ 0.5cm)
1	28.4	39.7	34.3
2	28.6	38.6	32.5
3	27.8	38.4	32.2
4	29.7	41.9	35.7
5	28.9	40.4	34.2
Promedio	28.6	39.8	33.7

**Tabla II.** Mediciones de tórax en personas de 25 años de edad.

Persona	Ancho de tórax ( $\pm$ )	Longitud de hombros ( $\pm$ 0.5cm)	Ancho de cintura ( $\pm$ 0.5cm)
1	32.7	42.8	37.6
2	31.4	43.7	37.1
3	31.9	42.9	36.9
4	30.8	43.8	36.7
5	31.2	44.3	37.8
Promedio	31.6	43.5	37.2

**Tabla III.** Mediciones de tórax en personas de 30 años de edad.

Edad del bebé (meses)	Perímetro Cefálico (cm)	Diámetro Cefálico (cm)
Recien Nacido	36.2	11.5
1	38.4	12.2
2	40.1	12.7
3	41.6	13.3
4	42.8	13.6
5	43.6	13.8

**Tabla IV.** Mediciones Cefálicas en bebés de diferentes meses de edad.

En la Tabla IV, se muestran las mediciones del radio cefálico de los bebés de diferentes edades (y su promedio) a partir de la Encuesta de Salud de EE.UU. del Centro Nacional de Estadísticas de la Salud [14].

Para los bebés menores de un año de edad, el perímetro cefálico es el mayor perímetro de sus cuerpos [15]. Se ha establecido en la referencia [16] que las mediciones hechas en [14] son aplicables a bebés mexicanos; esto es muy útil porque las mediciones hechas son para ver si bebés mexicanos se ajustan entre adultos mexicanos.

## **2.3 Espacio seguro para bebés en un transporte que se encuentra a su máxima capacidad.**

### **2.3.1 Resguardando al bebé entre el espacio intersticial de 3 personas.**

Para el caso de los bebés, aproximaremos sus cabezas como círculos vistos desde arriba, ya que como se dijo líneas arriba, para los bebés menores de un año de edad, el perímetro cefálico es el mayor perímetro de sus cuerpos. Así, ocupando los resultados de la Sección 2, tomaremos a las personas como elipses. Para las personas adultas, tomaremos como eje mayor (A) la distancia de hombro a hombro (longitud de hombros) y como eje menor el ancho del pecho (B). Para luego calcular los ejes de la elipse intersticial, que correspondería al ancho (a) y largo (b) del perímetro cefálico un bebé, para fines prácticos tomaremos estos dos ejes de igual tamaño ( $a = b$ ), ya que contamos con la medición del perímetro cefálico en bebés. Los resultados de esta comparación se muestran en la Tabla V.

Edad de los Adultos (años)	Ancho del tórax (2A) ( $\pm 0.5\text{cm}$ )	Longitud de hombros (2B) ( $\pm 0.5\text{cm}$ )	Máximo espacio entre tres adultos contiguos ( $\pm 0.5\text{cm}$ )			El tamaño del diámetro cefálico (cm) de un recién nacido es de 11.5 cm , entonces:
			2a	2b	Prom.	
20	23.6	36.1	7.0	10.8	9.0	El espacio es muy pequeño
25	28.6	39.8	8.6	12.0	10.2	El espacio es muy pequeño
30	31.6	43.5	9.4	13.0	11.2	El espacio es muy pequeño

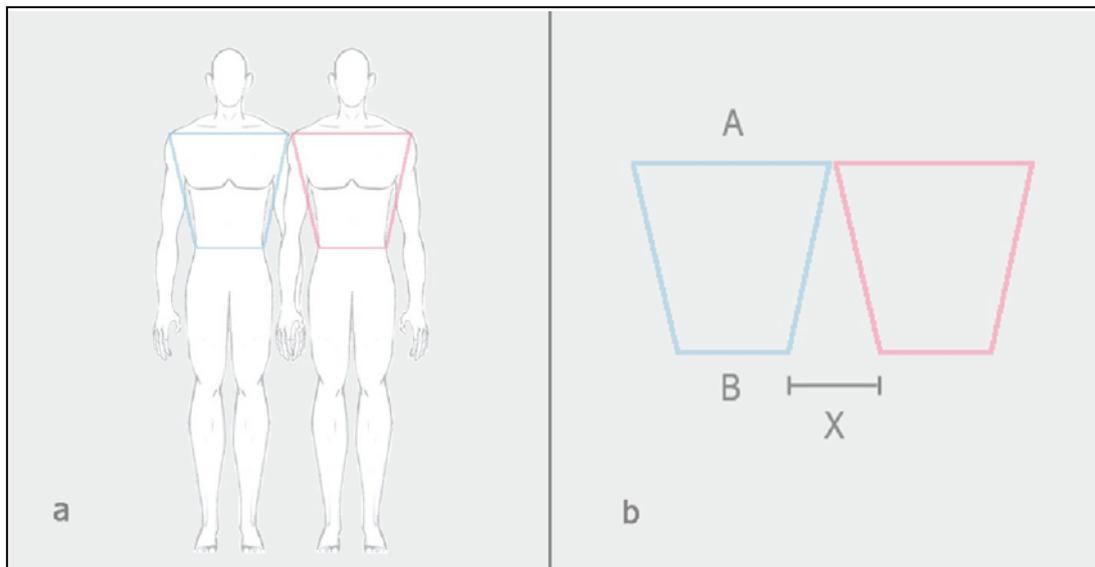
**Tabla V.** Tamaños de las elipses grandes (adultos) y los espacios creados por tres adultos contiguos comparado con la media del diámetro cefálico promedio de un recién nacido

Por lo tanto, nuestros resultados muestran, por razones puramente geométricas, que el espacio intersticial dejado entre adultos “compactados” es demasiado pequeño para acomodar a un bebé, ni siquiera en el caso de los adultos de 30 años de edad, que representan las elipses de mayor tamaño.

### **2.3.2 La protección de bebés colocándolos entre el costado de dos adultos.**

Dado que el espacio intersticial al nivel del tórax es demasiado pequeño, buscaremos otra forma de acomodarlos. En esta sección vamos a demostrar que una forma alternativa de proteger a un bebé es en el costado de los adultos en torno al nivel de los riñones.

En una primera aproximación el torso de una persona podría ser considerada como un trapecio con la base mayor al nivel de los hombros y la base más pequeña en la cintura (Fig. 4), dejando entre ellas un espacio libre de tamaño X para el bebé, que es la resta de A y B. En la Tabla 6 se muestran los resultados correspondientes que se obtuvieron utilizando los datos promedio de las tablas I, II, III y IV.



**Figura 4.** (a) Se muestran dos personas juntas con torsos como trapecios, (b) Distancia X debido a la diferencia entre los hombros y las cinturas;  $X = A - B$ .

Persona (Edad en años)	Longitud de hombros (A) ( $\pm 0.5$ cm)	Longitud de cintura (B) ( $\pm 0.5$ cm)	Valor de X A-B ( $\pm 0.5$ cm)	El tamaño del diámetro cefálico (cm) de un recién nacido es de 11.5 cm, entonces:
20	36.1	36.1	5.7	El espacio en muy pequeño
25	39.8	39.8	6.1	El espacio en muy pequeño
30	43.5	43.5	6.3	El espacio en muy pequeño

**Tabla VI.** Comparación entre los espacios libres del costado de los adultos y el diámetro cefálico en bebés.

Por lo tanto, para el conjunto de personas mencionadas en la Tabla VI, los bebés no pueden ser protegidos por los adultos en esta posición, que es a nivel de los riñones. Sin embargo para los hombres con mayores valores de X (a saber, "la gente atlética"), es posible proteger a los bebés al nivel de los riñones, como se muestra en la Tabla VII.

Persona (edad)	Hombros (A) (±0,5(cm))	Cintura (B)	Valor X (A-B) cm	El tamaño del diámetro cefálico (cm) de un recién nacido es de
20	39.5	28.2	11.3	11.3 (bebés recién nacidos)
25	43.2	31.4	11.8	11.8 (bebés recién nacidos)
30	45.6	33.2	12.4	12.4 (bebés recién nacidos)

**Tabla VII.** Comparación entre los espacios libres del costado de los adultos atléticos el perímetro cefálico en bebés.

En resumen, de acuerdo con los resultados de la Tabla VII, que se han obtenido solo con argumentos geométricos, es posible acomodar bebés de un mes de nacido y más pequeños en el espacio libre de los costados de adultos vistos de forma lateral, sólo en el caso de adultos atlético, la distancia hombro con hombro de forma lateral es más grande que el largo de su cintura. Por supuesto, se pueden ganar unos pocos centímetros extra haciendo una compresión elástica del vientre de los adultos.

Con estos resultados podemos ver que es imposible acomodar bebés de mayor edad a un mes de nacidos, es recomendable no llevar a bebés a lugares muy concurridos como El Metro.

#### **2.4. Fuerzas soportadas en el tórax de adultos y su capacidad respiratoria.**

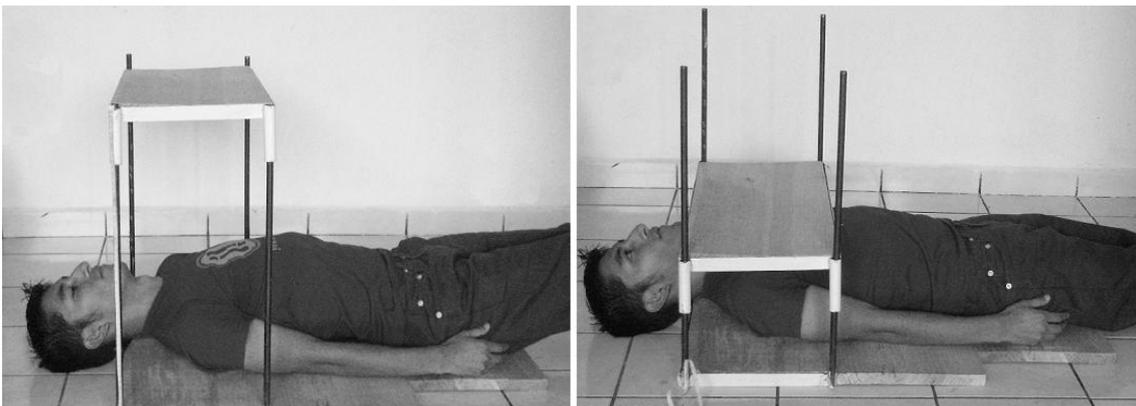
La gente que se encuentra entre las multitudes o que viaja en medios de transporte colectivo, se enfrentan al peligro potencial de sufrir asfixia durante su estancia en estos transportes. Es posible que algunos pasajeros (especialmente niños) no puedan tener espacio suficiente para realizar sus movimientos naturales de respiración. Además, si las aceleraciones de los transportes son grandes, los pasajeros podrían sufrir fracturas. En esta sección mostramos un estudio experimental con cambios muy lentos de presión

aplicada en el tórax humano. Es decir, no estudiamos los efectos de los cambios repentinos y fuertes de la fuerza aplicada que se producen en las colisiones, por ejemplo.

### 2.4.1 Los experimentos

Con el fin de encontrar la máxima fuerza que soporta el tórax de un ser humano antes de que pierda la capacidad de respiración, se realizaron experimentos que consistían en la adición de masas de diferentes pesos en el tórax en adultos jóvenes. Esto se hizo mediante un dispositivo que consistía en una tabla deslizante (Figura 5), en donde se colocaban pesos de 2.5 Kg cada uno hasta llegar a los 20 Kg, este peso límite se fijó para evitar lesiones en las personas que participaron en el experimento.

Las personas que han colaborado en estos experimentos fueron los mismos que los que fueron medidos para obtener los datos en los cuadros I, II y III.



**Figura 5.** El dispositivo de carga utilizado para aplicar presión sobre el tórax consiste en una plataforma deslizante de madera que soporta diferentes pesos.

Los datos experimentales, se reportan en la Gráfica 1, que muestran un comportamiento elástico lineal, es decir, la disminución de la altura del pecho (o

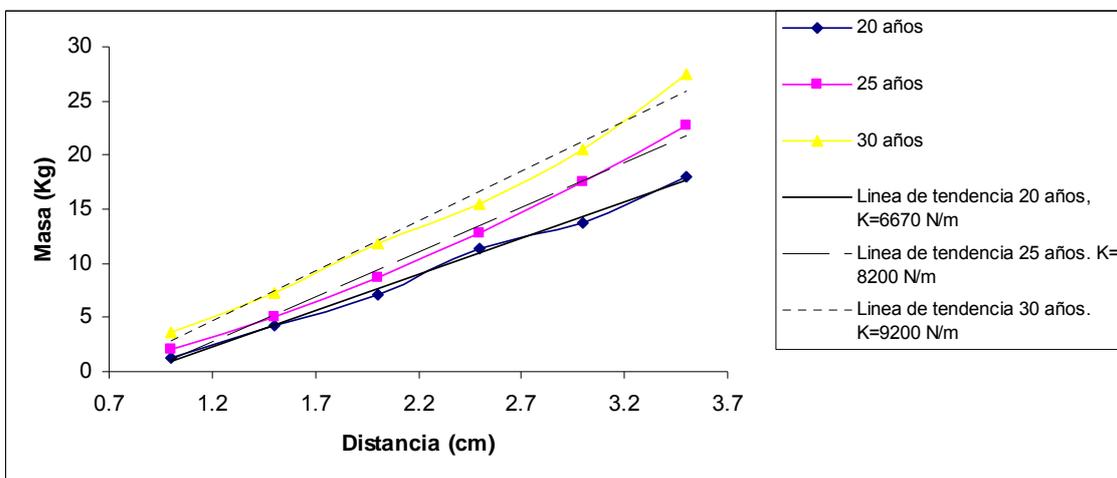
Situaciones Estáticas

compresión del pecho) es directamente proporcional a la fuerza aplicada siguiendo la ley de Hooke:

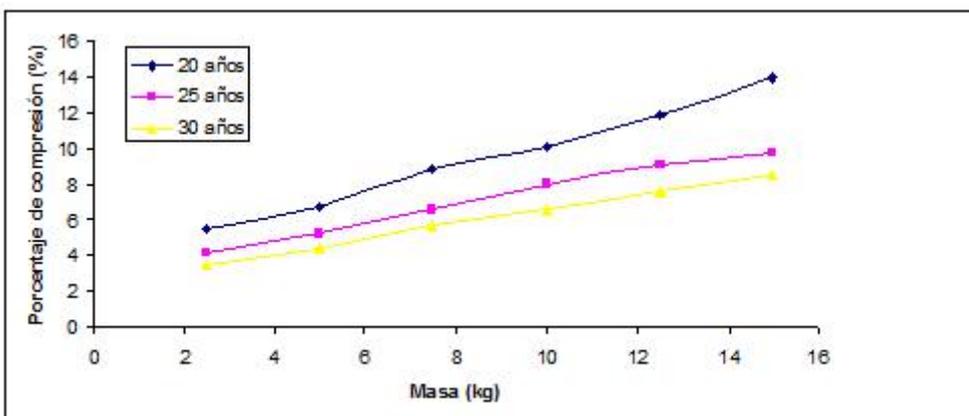
$$F = kx \dots\dots\dots (15)$$

La Gráfica 2 muestra el porcentaje de compresión, la medición de la “contracción” del pecho debido a la acción de los pesos aplicados.

Este es un resultado importante, ya que permite extrapolar los valores que no hemos podido comprobar experimentalmente, debido a posibles riesgos de salud (asfixia o fractura).



**Gráfica 1.** La fuerza aplicada en el pecho muestra una compresión lineal para personas de diferentes edades. También se muestran los valores de las constantes elásticas correspondientes a la ley de Hooke.



**Gráfica 2.** Porcentaje de deformación de la Gráfica 1.

## Situaciones Estáticas

Las ecuaciones de las gráficas promedio para los diferentes años de edad de la Gráfica 1, se muestran a continuación:

Para la gráfica de 20 años la ecuación es  
 $F = 6670(N / m)d \dots\dots\dots (16)$

Para la gráfica de 25 años la ecuación es  
 $F = 8200(N / m)d \dots\dots\dots (17)$

Para la gráfica de 30 años la ecuación es  
 $F = 9200(N / m)d \dots\dots\dots (18)$

También se obtuvo el peso máximo que puede soportar una persona antes de perder la respiración debido a la imposibilidad de ejecutar los movimientos musculares necesarios para expandir el pecho, estos datos se encuentran en la Tabla VIII. Este experimento se realizó de forma independiente al que se muestra en la Figura 5, debido al riesgo que implica. Para esta parte del experimento, se ponían pesos mayores a los 25 Kg, y la persona indicaba si soportaba más peso o este era suficiente para impedirle respirar, si no era suficiente se quitaba este peso, se dejaba reposar a la persona unos minutos y se le ponía una masa de mayor peso, y así sucesivamente hasta que la persona no podía realizar los mecanismos de respiración.

En esta parte no se midió la distancia de contracción de las personas, sin embargo a partir de las ecuaciones (16), (17) y (18), podemos calcular esta distancia, estos resultados se encuentran en la Tabla IX.

Persona	20 años	25 años	30 años
1	36	40	39
2	34	41	38
3	35	41	41
4	36	43	39
5	37	42	41
Prom.	35.6	41.6	39.6

**Tabla VIII.** Masa (Kg) para los que ya no era posible respirar.

Edad	Peso ( $\pm 0.5\text{Kg}$ )	Distancia de Deformación ( $\pm 0.5\text{cm}$ )	Ancho inicial del tórax (cm)	Deformación (%)
20	35	5.1	23.6	21%
25	41	5.6	28.4	20%
30	39	5.7	31.7	18%

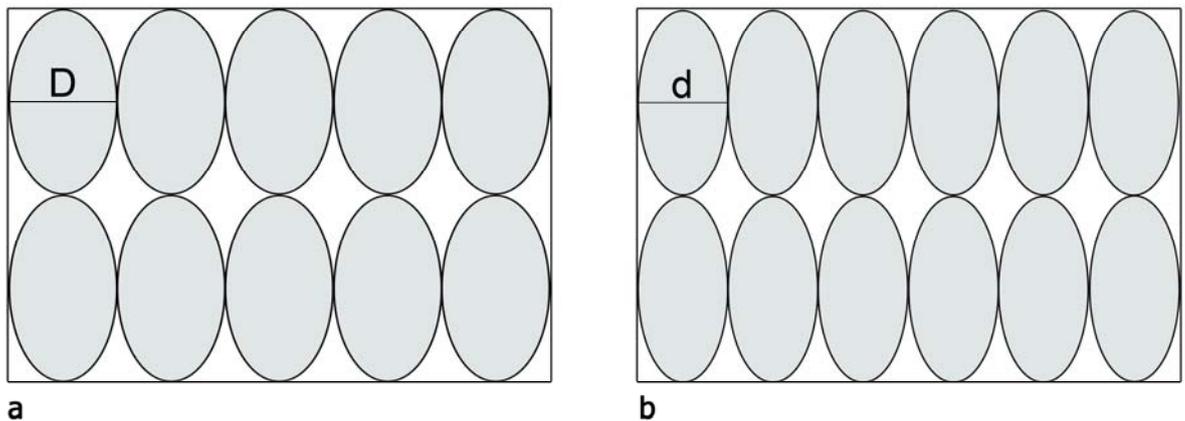
**Tabla IX.** Porcentaje de deformación antes de perder la respiración.

## 2.5 Montaje: Donde caben cinco caben seis.

Encontramos que la compresión máxima del pecho antes de tener dificultades poder respirar, es de aproximadamente el 20% del grosor del pecho. Es decir, a lo más, en los adultos jóvenes, el pecho puede ser contraído cuidadosamente en un 20%, siendo éste el límite de seguridad. Por lo tanto, en un transporte que contenga a cinco personas de forma alineada, se puede acomodar a otra persona entre estas cinco sin sufrir una compresión de riesgo. En otras palabras, se pueden acomodar a 6 personas en un transporte diseñado para 5 (Figura 6). En un contenedor en movimiento, esto es válido para aceleraciones y/o desaceleraciones muy bajas en comparación con la aceleración de la gravedad.

## Situaciones Estáticas

Es importante mencionar un método casi desconocido para proteger a las personas bajo presión, que es una especie de cinturón resistente a la presión debida a las aglomeraciones, esta invención está patentada [22], la patente esta conformada simplemente por un anillo colocado alrededor del pecho, que puede ser modificado para usarse de una manera mas cómoda.



**Figura 6.** Encontramos que por cada 5 personas en un recipiente apropiado, que puede acomodar una persona más, debido a la contracción uniforme de X.

### 3. SITUACIONES DINÁMICAS

Cuando un transporte público viaja con el número máximo de pasajeros permitidos (máxima capacidad), los pasajeros pueden sufrir daños por aplastamiento. En primera instancia, pueden sufrir asfixia, ya que las personas se encuentran muy apretadas y el pecho no puede realizar sus movimientos naturales de respiración. Por otra parte, en caso de que la presión sea demasiado grande, pueden sufrir una fractura en el tórax. También pueden aparecer fracturas si el transporte se detiene bruscamente cuando el transporte viaja a altas velocidades.

#### 3.1 Fuerza necesaria para sufrir una fractura en el tórax

Existe en la literatura estudios sobre la contracción que soporta el tórax antes de sufrir una fractura. En un artículo se encontró que esta compresión es del 38% [17], porque al llegar a una compresión del 40% ocurre una fractura. Teniendo en cuenta [17], y las ecuaciones (16), (17) y (18) encontramos la fuerza que se necesita aplicar en el pecho para ser contraído a un 38%.

Edad	Ancho inicial del tórax (cm)	Distancia de deformación al 38 % ( $\pm 0.5$ cm)	Fuerza necesaria (N)
20	23.6	8.9	598
25	28.4	10.7	884
30	31.7	12.0	1104

**Tabla X.** Fuerza necesaria para fracturarse el tórax

Podemos observar que la fuerza necesaria para obtener una fractura, depende de la edad de la persona, sin embargo en [17] no se toma en cuenta la edad de las personas. Así, sabiendo que el pecho de una persona de 20 años tiene un comportamiento más elástico que el de una persona de 30 años, tomaremos como referencia la fuerza soportada por la persona de 30 años. Así podemos decir que la fuerza que soporta una persona antes de sufrir una fractura en su pecho es de **1100 N** (que equivale a 112 kilogramos fuerza aproximadamente).

### **3.2 Fuerza soportada por la persona que se encuentra en la parte frontal del transporte público**

Haciendo los cálculos de las ecuaciones de las rectas de la Gráfica 1, podemos decir que la fuerza que soporta el pecho antes de fractura es de **1 100 N**, por lo tanto, una persona que pesa 70 kg soporta un impacto a una desaceleración de  $15\text{m/s}^2$ . De estos resultados se puede encontrar el número de personas que pueden viajar en un transporte sin presentar alguna lesión. La persona más susceptible a una lesión es la que está en la parte delantera del contenedor, ya que esta persona no sólo recibe la fuerza del impacto debido a su peso, si no también recibe una fuerza de impacto de las personas que están detrás de él. Entonces, si suponemos que las personas que están en el transporte tienen un peso de 70 kilogramos, podemos decir que la fuerza que siente la persona que va en la parte frontal es la siguiente:

$$F = Nma \dots\dots\dots (19)$$

Donde  $N$  es el número de pasajeros (contando a la persona que va en la parte frontal),  $m$  es la masa de los pasajeros (que en nuestro caso todas pesan  $70Kg$  y  $a$  es la desaceleración del transporte público.

### 3.3 Propiedades de los transportes

El caso que analizaremos en esta sección, es cuando el transporte público frena repentinamente o sufre un choque en movimiento cuando viaja a una velocidad considerable, lo que representa un gran riesgo para los usuarios (el Metrobús viaja a una velocidad de  $60 \frac{Km}{h}$  [18], el Metro a una velocidad de  $80 \frac{Km}{h}$  [19], el Tren Ligero a una velocidad de  $60 \frac{Km}{h}$  [20], y el Tren Suburbano a una velocidad de  $130 \frac{Km}{h}$  [21], velocidades para tenerse a consideración).

En la Tabla XI enumeraremos algunas propiedades relevantes asociadas a los transportes antes mencionados. Como se aclarará más adelante, la longitud de los vagones es importante en cada caso a fin de encontrar la distribución óptima de los vagones para evitar posibles lesiones en caso de un frenado brusco.

Transporte	Longitud de Vagón (m)	Velocidad Máxima (Km/h)	Desaceleración Máxima Alcanzada ( $m/s^2$ )	Velocidad de Frenado Aproximada en la Estación (m)
Metro	17.1	80	1.0	100
Metro bus	9	60	1.0	40
Tren Ligero	10.3	60	1.8	60
Tren Suburbano	25.6	130	0.8	200

**Tabla XI.** Parámetros relevantes de diversos transportes de la Ciudad de México

### 3.4 Desaceleraciones constantes

Cuando las desaceleraciones son constantes, entonces, las desaceleraciones de frenado pueden ser deducidas del teorema de trabajo-energía  $W = \Delta K$  que relaciona el trabajo mecánico realizada por una fuerza externa sobre un cuerpo rígido, con el cambio de energía cinética  $m\frac{V^2}{2}$  en una distancia  $d$ , quedando de la forma

$$a = V^2/(2d) \dots\dots\dots (20)$$

donde  $a$  es la desaceleración y  $v$  es la velocidad al momento del frenado.

En la ecuación (20), para poder tener desaceleraciones constantes, supondremos que hay una conservación de la energía. Esta suposición está muy lejos de la realidad, ya que en el momento del frenado hay pérdida de energía, principalmente por fricción. Para tomar en cuenta esta pérdida de la energía es necesario hacer mediciones de las desaceleraciones en los diferentes transportes; lo cual es difícil de obtener.

Como se mencionó en la Sección. 4, la persona más vulnerable es la que viaja en la parte frontal del vagón o contenedor cuando hay desaceleración. Para encontrar la fuerza total experimentada por cada pasajero tenemos que calcular la masa total detrás de él, más su propia masa. Si consideramos, por simplicidad, que todas sus masas son iguales, entonces la fuerza total es dada por la ecuación (19). La Gráfica 3 muestra la desaceleración que ocurre en los transportes a distintas velocidades iniciales y a diferentes distancias de frenado. Las líneas horizontales corresponden a la desaceleración máxima que pueden soportar  $N$  personas (todas ellas con un peso de  $70Kg$ ) antes de

## Situaciones Dinámicas

sufrir una fractura. Por ejemplo, teniendo en cuenta de la fuerza soportada por una persona antes de sufrir una fractura en el pecho es de 1100 N, la desaceleración máxima que se soportaría en este caso es:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{1100N}{70Kg} = 15.7 \frac{m}{s^2}$$

Así la línea horizontal para  $N = 1$  cruza en  $a = 15.7 \frac{m}{s^2}$ , lo que implica que si la

distancia de frenado es de 5 metros, la velocidad de frenado no debe ser mayor

a  $12.5 \frac{m}{s}$ , o si la distancia de frenado es de 50 metros, la velocidad de frenado

no debe ser mayor a  $39.6 \frac{m}{s}$ , de lo contrario una persona que viaje en la parte

frontal del vagón podría sufrir una fractura. Como segundo ejemplo podemos

pensar en 3 personas alineadas en la parte frontal del vagón; la desaceleración

que puede soportar la persona que se encuentra hasta adelante es:

$$a = \frac{F}{3(m)} = \frac{1100N}{210Kg} = 5.2 \frac{m}{s^2}$$

Así, la velocidad máxima que debe llevar el transporte si frena en 5 metros, es

de  $7.2 \frac{m}{s}$ ; y si frena a en 50 metros, la velocidad máxima es de  $22.8 \frac{m}{s}$

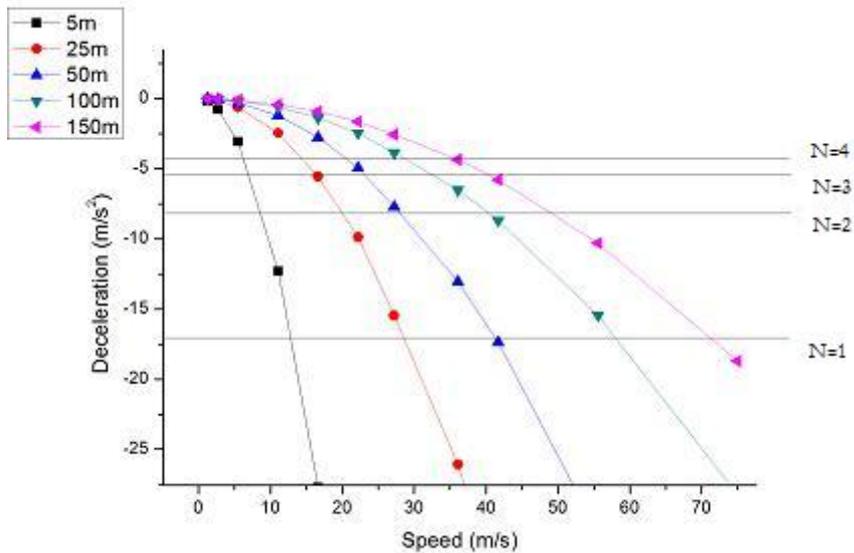
Obviamente, a mayores velocidades de frenado en distancias más cortas,

implican mayores desaceleraciones. Así vemos que mientras menor sea la

velocidad de frenado menor deberá ser la distancia de frenado, además a

mayor número de pasajeros, esas velocidades se reducen aun más.

## Situaciones Dinámicas



**Gráfica 3.** Desaceleración para diferentes velocidades de frenado y diferentes distancias de frenado.

La gráfica de la Gráfica 3 nos ayudará a encontrar las desaceleraciones de los transportes estudiadas debido a su velocidad máxima indicada en la Tabla X; en esta tabla mostramos las diferentes propiedades de los medios de transporte público utilizados.

Con los resultados de la Tabla X podemos dar las pautas para diseñar mejores sistemas de transportes.

### 3.5 Resultados

De la Gráfica 3 se puede obtener la fuerza que siente una persona cuando el transporte es desacelerado. Recordando que hemos considerado que la gente tiene un peso promedio de 70 kg, una anchura de 40 cm en el pecho y considerando que la fuerza máxima que soporta el pecho es de 1200 N, podemos encontrar una relación para conocer al número de personas que se puede alinear sin que experimenten una fractura. En La tabla XI mostramos los resultados de estos cálculos, podemos ver que, en una situación en la que la distancia de frenado es menor a 5 metros toda la gente sufrirá una fractura, también el frenar a 25 metros de distancia resulta peligroso.

Velocidad Máxima (Km/h)	No. Personas que pueden viajar si se frena en 5m	No. Personas que pueden viajar si se frena en 25m	No. Personas que pueden viajar si se frena en 50m	No. Personas que pueden viajar si se frena en 100m	No. Personas que pueden viajar si se frena en 150m
60	0	3	6	12	18
80	0	1	3	6	10
130	0	0	1	2	3

**Cuadro XII.** Esta tabla muestra el número de personas en la fila que pueden viajar sin sufrir una lesión a diferentes velocidades y a diferentes distancias de frenado.

Afortunadamente este tipo de situaciones no es común en estos transportes. El rango general de longitud de frenado se da entre 50 a 100 metros, por lo que podemos acomodar a los usuarios en filas de 2 a 12 pasajeros. En la tabla XIII se muestran las divisiones para los diferentes transportes públicos estudiados, tomando en cuanto la longitud del vagón (Tabla XI) y los resultados de la Tabla XII.

## Situaciones Dinámicas

Tranaspote	Rango de pasajeros	Rango de longitud de la división	Rango de número de divisiones
Metro	3 - 6	1.2 – 2.4	14 – 7
Metrobus	6 - 12	2.4 – 4.8	3 - 1
Tren Ligero	6 - 12	2.4 – 4.8	4 - 2
Tren Suburbano	1 - 2	0.4 – 0.8	64 - 32

**Tabla XIII.** Propuesta de divisiones para los transportes públicos de los grupos estudiados.

#### **4. OBSERVACIONES FINALES**

En resumen, los combustibles fósiles cada vez son más caros debido a las crecientes dificultades para su obtención futura y la tendencia al agotamiento de sus fuentes; el número de pobladores en las grandes ciudades sigue en aumento llevando a que, todos los transportes públicos estén sobresaturados. Así que en un futuro próximo la tendencia será dar cabida a la mayor densidad posible de personas (niños y adultos) dentro de los transportes públicos. Hemos centrado nuestros esfuerzos en aspectos simples pero muy útiles para encontrar las condiciones óptimas de acomodo entre multitudes o en transportes públicos, teniendo en cuenta que los niños son las personas más susceptibles a sufrir lesiones.

Por supuesto, la mejor manera de proteger a los bebés o los niños de accidentes en las aglomeraciones o en multitud de medios de transporte colectivo es evitar exponer a los bebés a este tipo de situaciones. Pero si tienen que ser expuestos, una alternativa para evitarles lesiones, es preferible llevarlo entre el costado de dos adultos, con el fin de disminuir la probabilidad de fractura o de asfixia. Otra posibilidad de protección es el de promover el uso de una modificación del cinturón resistente a presiones dentro de aglomeraciones [22]. Esperamos que este trabajo puede estimular y promover nuevas medidas de seguridad para multitudes o conglomeración de personas, incluyendo entre ellos; los niños, los minusválidos y ancianos.

## Observaciones Finales

Hemos dado un paso para la construcción y el diseño de vagones más eficientes y seguros dentro de la Ciudad de México. En la Tabla XIII, vemos que en el Metro caben 7 divisiones, con 6 personas en cada fila. En el Metrobús podemos tener las mejores condiciones de división, no es necesario hacer divisiones (no es necesario disponer de divisiones por el resultado de una sola división). En el Tren Ligero también hay condiciones óptimas para las divisiones, solo son necesarias 2 de estas. En el Tren Suburbano no es recomendable poner las divisiones ya que son demasiados, tal vez sería posible pensar en reducir su velocidad máxima. Los resultados se pueden aplicar a las diferentes ciudades del mundo, teniendo en cuenta las velocidades y las dimensiones de los transportes públicos de cada ciudad.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Vease <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/index.php?page=salud>
2. Vease [http://codex.colmex.mx:8991/exlibris/aleph/a18\\_1/apache\\_media/MH\\_KCF43SXFS9H2VCJ53DQY3JYUGISH.pdf](http://codex.colmex.mx:8991/exlibris/aleph/a18_1/apache_media/MH_KCF43SXFS9H2VCJ53DQY3JYUGISH.pdf)
3. O. Córdoba-Rodríguez, M. A. de la Lama Zubirán, M. del Castillo-Mussot, A. de la Lama García, *Optimizando tiempos de espera en filas o colas*, Revista Ciencias No. 99, julio-septiembre 2010
4. Vease <http://www.segundonivel.df.gob.mx/index.htm>
5. D. Helbing, A. Johansson and H. Z. Al-Abideen, Phys. Rev. E **75** 046109 (2007).
6. D. Deangeles, M. Schurr, M. Birnbaum and B. Harms, Wisconsin Medical Journal, Vol. **97**, no9, pp. 42-45 (1998).
7. R. James and K. Landi, American Journal of Forensic Medicine and Pathology, **25** :358-361 (2004).
8. K. O'Riordain, P. M. Thomas, J. P. Phillips and M. D. Gilchrist, Clinical Biomechanics, Volume **18** , Issue 7 , pp. 590 (2003)..
9. A. Tencera, R. Kaufman, C. Mack and C. Mock, Accident Analysis and Prevention, Volume **37** Issue 2, pp. 287-293 (2005),.
10. A. Morris, R. Welsh, P. Thomas and A. Kirk, Proceedings IRCOBI Conference, Prague, Czech Republic (2005).
11. R. Byard, R. Wick, E. Simpson and J. Gilbert, Forensic Science International, Volume 159, Issue 2 - 3, Pages 200- 205.
12. A. Ibitoye, A. Amolda, S. Wong and R. Radin, Advances in Engineering Software, Volume 37, Issue 1, pp. 56 -61.

## Bibliografía

13. C. Duncan, B. Corben, N. Truedsson and C. Tingvall, Australian Transport Safety Bureau - Contract Report No. 201.
14. Clinical Growth Charts, Health Survey of National Center of Health Statistics (See [www.cdc.gov/nchs/nhanes.htm](http://www.cdc.gov/nchs/nhanes.htm)).
15. W. Nelson, *Tratado de Pediatría* (Mc-Graw Hill, México, 1980) p.11.
16. L. Kieffer. M. And Sanchez, *Anuales Medicos*, Volume 47, number 4. Octubre-Diciembre 2002.
17. K. Albert, *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 02:55-81 (2000).
18. <http://www.metrobus.df.gon.mx>
19. <http://.metro.df.gob.mx>
20. <http://www.ste.df.gob.mx/servicios/trenligero.html>
21. <http://www.fsuburbanos.com/>
22. J. Magnar, United States Patent Application Publication, Pub. No. US2007/0235041 A1, Pub. Date: Oct. 11, 2007 .