



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA.
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.**

**“ANÁLISIS DE RIESGOS DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE
TRANSPORTE COLECTIVO METRO”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERIA DE SISTEMAS**

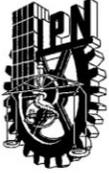
**PRESENTA:
ING.MARLEN GÁMEZ ROJAS**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JAIME REYNALDO SANTOS REYES.**



MÉXICO D.F.2010

Acta de revisión de tesis.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:00 horas del día 16 del mes de Noviembre del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“ANÁLISIS DE RIESGOS DE INCENDIO EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE COLECTIVO METRO”

Presentada por el alumno:

GÁMEZ

Apellido paterno

ROJAS

Apellido materno

MARLEN

Nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. JAIME REYNALDO SANTOS REYES

Presidente

DRA. ELVIRA ÁVALOS VILLARREAL

Segundo Vocal

M. EN C. JORGE ARTURO REYES BONILLA

Tercer Vocal

M. EN C. ARMANDO BURCIAGA ORTEGA

Secretario

DRA. CLAUDIA HERNÁNDEZ AGUILAR

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



Carta de cesión de derechos.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Carta de cesión de derechos.

En la Ciudad de México D.F., el día 16 de Noviembre del mes del año 2010, la que suscribe **Marlen Gámez Rojas** alumna del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas con número de registro **A090456**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Jaime Reynaldo Santos Reyes** y cede los derechos del trabajo intitulado “**Análisis de Riesgos de Incendio en el Sistema de Transporte Colectivo Metro**”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben de reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección ingmgr@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marlen', is written over a horizontal line.

Ing. Marlen Gámez Rojas

Nombre y Firma

Resumen.

Resumen.

Este trabajo de tesis presenta un Análisis de Riesgos de Incendio en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, debido a que este sistema de transporte es uno de los más rápidos y con mayor capacidad para transportar grandes cantidades de personas, y aunque se dice que el sistema de transporte presenta una menor siniestrabilidad debido a las características físicas propias del sistema, esto no garantiza que se encuentren exentos de dicho suceso.

En este trabajo de tesis se utilizará la Metodología de C.W. Churchman y R. I. Ackoff, para el estudio del sistema y el análisis de riesgos.

De acuerdo con lo anterior, dicho análisis de riesgo de incendio es llevado a cabo mediante, la denominación del nivel de peligro potencial de dicho suceso, tanto para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales.

En nuestro análisis se estudia, evalúa, mide y previene fallos y averías de los sistemas técnicos, los procedimientos operativos y de las imprudencias que pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados, de acuerdo al escenario de un incendio potencial dentro de una interestación (túnel), del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Como se menciona nuestro análisis se realiza en un escenario en donde se está desarrollando un incendio, por lo cual realizamos diferentes cálculos relacionados con la velocidad crítica de ventilación para evitar el efecto Backlayering, dichos cálculos son trabajados en las diferentes formulas proporcionadas por distintos autores, los cuales consideran valores diferentes en ellas, porque toman otras características físicas propias del túnel.

El cálculo de la velocidad crítica de ventilación, está dada por varios autores por lo cual apoyados por el software "Visual Basic" realizamos un programa en el cual podamos obtener los diferentes resultados.

De los resultados obtenidos de cada una de las ecuaciones propuestas, se realizaron comparaciones y se llevara a cabo el análisis de los mismos, con lo cual llegaremos a una conclusión y decisión final, para establecer cual es lo más viable y confiable para considerar a nuestro sistema de transporte como sistema confiable en caso de ocurrir un incendio en sus túneles.

Abstract.

Abstract.

Fire Risk Analysis in the Metro Public Transport System.

This thesis presents a Fire Risk Analysis in the Metro Public Transport System, because this transport system is one of the fastest and most capable of transporting large numbers of people, and although it says the system Transport has a lower accident rate due to the specific physical characteristics of the system is no guarantee that they are exempt from that event.

In this paper we use the methodology of CW Churchman, R. I. Ackoff, to study the system and risk analysis.

According to the above, the analysis of risk of fire is taken over by the name of the level of potential danger of such an event, both for people, environment and property.

In our analysis we study, evaluate, measure and prevent faults and failures of technical systems, operational procedures and the follies that can initiate and trigger unwanted events, according to the scenario of a potential fire in a interestación (tunnel), the Metro Public Transport System.

As mentioned our analysis is performed on a stage where it is developing a fire, which perform various calculations related to venting the critical speed to avoid the effect Backlayering, such calculations are worked in different formulas provided by various authors which consider different values in them, because they take other specific physical characteristics of the tunnel.

Calculation of the critical ventilation velocity is given by several authors thus supported by the software "Visual Basic" did a program in which we can obtain different results.

From the results obtained from each of the equations, comparisons were made and carried out their analysis, which come to a conclusion and final decision to establish which is the most viable and reliable to consider our transport system as a reliable system in the event of a fire in their tunnels.

Agradecimientos.

Agradecimientos.

A los profesores: **Dra. Elvira Ávalos Villareal, Dra. Claudia Hernández Aguilar, M en C. Jorge Arturo Reyes Bonilla, M en C. Armando Burciaga Ortega**, por su tiempo, sus enseñanzas, sus atinados comentarios y por ser parte de este logro.

Gracias **Dr. Jaime Reynaldo Santos Reyes** por haber dirigido este trabajo de tesis y haber depositado su confianza en mí y mi trabajo.

A todos mis amigos: **Gladis, Rodolfo, Manuel, Lulú, Eli Laura, Ricardo, Alejandra, Iván, Ismael, Juan Carlos, Delfino, Manuel, Jesús, Janeth, René, Sergio, Pedro, Dina, Javier, Humberto, Rigoberto**, por todo el apoyo que siempre me han brindado y por la colaboración prestada en este trabajo de tesis.

A mis hermanas **Carmen e Itzel**, por su compañía, risas, lagrimas desvelos y apoyo de siempre. Las quiero mucho, son mi mejor compañía.

A mi **papá** por el apoyo que siempre eh tenido de tu parte en todos los sentidos. Gracias.

A mi **mamá** por estar siempre a mi lado, por tus desvelos, enojos, lágrimas y de más que me han ayudado a tomar el camino correcto y concluir otra de mis metas.

A ti **Juan Manuel**, que me has enseñado a ver y vivir la vida de otra manera, gracias por compartir estos años conmigo, te amo.

Dedicatorias.

Dedicatorias.

La mamá más mala del mundo.

Yo tuve la mamá más mala de todo el mundo. Mientras que los niños no tenían que desayunar, yo tenía que comer cereal, huevos y pan tostado.

Cuando los demás tomaban refrescos gaseosos y dulces para el almuerzo, yo tenía que comer emparedado.

Mi madre siempre insistía en saber donde estábamos. Parecía que estábamos encarcelados. Tenía que saber quiénes eran nuestros amigos.

Insistía en que si decíamos que íbamos a tardar una hora, solamente nos tardaríamos una hora.

Me da vergüenza admitirlo, pero hasta tuvo el descaro de romper la ley contra el trabajo de los niños menores. Hizo que laváramos trastes, tendiéramos camas, y aprendiéramos a cocinar y muchas cosas igualmente crueles.

Creo que se quedaba despierta en la noche pensando en las cosas que podría obligarnos a hacer. Siempre insistía en que dijéramos la verdad y solo la verdad.

Para cuando llegamos a la adolescencia ya fue más sabia, y nuestras vidas se hicieron aun más miserables, se volvió posesiva.

Nadie podía tocar el claxon para que saliéramos corriendo. Nos avergonzaba hasta el extremo, obligando a nuestros amigos a llegar a la puerta para preguntar por nosotros.

Mi madre fue un completo fracaso. Ninguno de nosotros ha sido arrestado. Cada uno de mis hermanos ha servido a su patria, y " A QUIEN DEBEMOS CULPAR DE NUESTRO TERRIBLE FUTURO? Tienen razón, a nuestra madre.

Vean de todo lo que nos hemos perdido. Nunca hemos podido participar en una demostración y actos violentos y miles de cosas más que hicieron nuestros amigos.

Ello nos hizo convertirnos en adultos educados y honestos. Usando esto como ejemplo, estoy tratando de educar a mis hijos de la misma manera.

Verán doy gracias a Dios por haberme dado "LA MAMA MAS MALA DEL MUNDO".

***POR TI, AHORA ESTAMOS CELEBRANDO ESTE TRIUNFO.
Gracias MAMÀ.***

Índice.

Índice.

	Pág.
Acta de revisión de tesis.....	I
Carta de cesión de derechos.....	III
Resumen.....	V
Abstract.....	VII
Agradecimientos.....	IX
Dedicatorias.....	XI
Introducción.....	XVII
Objetivo General y Objetivos Particulares.....	XX
Índice de figuras, graficas, tablas y ecuaciones.....	XXII
Glosario.....	XXVII
Nomenclatura.....	XXXI
Capítulo I. Antecedentes y Justificación.....	1
1.1. Sistemas de Transporte Metro.....	2
1.2. Cronología de los Sistemas de Transporte Metro en el mundo.....	2
1.3. Incendios mundiales ocurridos en el Sistema de Transporte Metro.....	4
1.4. Justificación del proyecto de tesis.....	6
Capítulo II. Marco Teórico y Metodológico.....	10
2.1. Marco Teórico.....	11
2.1.1. Teoría General de Sistemas.....	11
2.1.2. El Sistema de Transporte Colectivo Metro visto como un sistema.....	12
2.1.3. Análisis de riesgos.....	14
2.1.3.1. Métodos de identificación de riesgos.....	16
2.1.4 Túneles.....	17
2.1.5. Sistema de ventilación en túnel.....	18
2.1.5.1. Ventilación natural.....	18
2.1.5.2. Ventilación artificial o forzada.....	19
2.1.6. Triangulo de fuego.....	23
2.1.7. Física de los incendios.....	24

	Pág.
2.1.7.1. Causa de incendios.....	24
2.1.7.2. Etapas de un incendio en espacios abiertos.....	24
2.1.7.3. Etapas de un incendio en espacios cerrados o confinados.....	25
2.1.8. Definición de incendios en túneles.....	27
2.1.9. Transferencia de calor.....	28
2.1.10. Movimiento del humo en túneles.....	30
2.1.11. Visibilidad y humo.....	31
2.1.12. Velocidad crítica.....	31
2.1.12.1. Modelos basados en la conservación del número de Froude.....	31
2.1.12.2. Modelos basados en el análisis adimensional.....	33
2.2. Marco Metodológico.....	37
2.2.1. Fase 1. Formulación del problema.....	39
2.2.2. Fase 2. Construcción del modelo.....	39
2.2.3. Fase 3. Obtención de una solución y prueba del modelo.....	40
2.2.4. Fase 4. Implantación y control de la solución.....	40
Capítulo III. Descripción del caso de estudio.....	41
3.1. Contexto Temporal del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	42
3.1.1. Etapas de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	43
3.2. Contexto Espacial del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	45
3.2.1. Línea 1 “Observatorio – Pantitlán”.....	46
3.2.2. Línea 2 “Cuatro Caminos – Taxqueña”.....	46
3.2.3. Línea 3 “Indios Verdes – Universidad”.....	46
3.2.4. Línea 4 “Santa Anita – Martín Carrera”.....	46
3.2.5. Línea 5 “Politécnico – Pantitlán”.....	47
3.2.6. Línea 6 “El rosario – Martín Carrera”.....	47
3.2.7. Línea 7 “El rosario – Barranca del Muerto”.....	47
3.2.8. Línea 8 “Garibaldi – Constitución de 1917”.....	47
3.2.9. Línea 9 “Pantitlán – Tacubaya”.....	48
3.2.10. Línea 10 “Pantitlán – La paz”.....	48
3.2.11. Línea 11 “Ciudad Azteca – Buenavista”.....	48
3.2.12. Línea 12, Línea Dorada “Mixcoac – Tláhuac”.....	48
3.3. Parque vehicular del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	49
3.3.1. Conformación de un tren del metro.....	50
3.3.2. Cuerpo del carro del metro.....	51
3.3.3. Distribución de trenes en el metro.....	52
3.3.4. Capacidad de pasajeros por tren.....	52
3.4. Características físicas de los túneles del metro.....	53
3.4.1. Características físicas de las interestaciones subterráneas (Túneles).....	55
3.5. Sistema de control de incendios en túnel del metro.....	61
Capítulo IV. Aplicación de la Metodología, Análisis y Resultados.....	62
4.1. Desarrollo de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff.....	63
4.1.1. Fase 1. Formulación del problema.....	63
4.1.2. Fase 2. Construcción del modelo.....	63
4.1.2.1. Gases tóxicos.....	64
4.1.2.2. Backlayering.....	65
4.1.2.3. Visibilidad.....	66

	Pág.
4.1.2.4. Calculo de la velocidad crítica de ventilación (Vc).....	70
4.1.3. Fase 3. Obtención de la solución y prueba del modelo.....	76
4.1.4. Fase 4. Implantación y control de la solución.....	77
Capitulo V. Discusión, Conclusiones y Futuro Trabajo.....	81
5.1. Discusión.....	82
5.1.1. Gases tóxicos, visibilidad, backlayerin, velocidad crítica.....	82
5.1.2. Sistema de control del incendio.....	84
5.2. Conclusiones.....	85
5.2.1. Limitación.....	85
5.3. Futuro Trabajo.....	85
Referencias bibliográficas y webgrafia.....	88
Anexos	
Anexo A. Afluencia anual de pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	XXXIV
A.1. Afluencia de pasajeros.....	XXXV
Anexo B. Información adicional de las líneas del Metro.....	XXXVII
B.1. Líneas del metro.....	XXXVIII
B1.1. Línea 1 “Observatorio – Pantitlán”.....	XXXVIII
B.1.2. Línea 2 “Cuatro Caminos – Tasqueña”.....	XXXVIII
B.1.3. Línea 3 “Indios Verdes – Universidad”.....	XXXIX
B.1.4. Línea 4 “Santa Anita – Martin Carrera”.....	XXXIX
B.1.5. Línea 5 “Politécnico – Pantitlan”.....	XL
B.1.6. Línea 6 “El Rosario – Martín Carrera”.....	XL
B.1.7. Línea 7 “El Rosario – Barranca del Muerto”.....	XLI
B.1.8. Línea 8 “Garibaldi – Constitución de 1917”.....	XLI
B.1.9. Línea 9 “Pantitlán – Tacubaya”.....	XLII
B.1.10. Línea A “Pantitlán – La Paz”.....	XLII
B.1.11. Línea B “Cuidad Azteca – Buenavista”.....	XLIII
B.1.12. Línea 12, Línea Dorada “Mixcoac – Tláhuac”.....	XLIII
B.2. Parque vehicular del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	XLIV
Anexo C. Programación del software para el cálculo de la velocidad crítica de ventilación...	
C.1. Programación del software.....	XLVII

Introducción.

Cada fracaso supone un capítulo más en la historia de nuestra vida y una lección que nos ayuda a crecer. No te dejes desanimar por los fracasos. Aprende de ellos, y sigue adelante.

(Anónimo).

Introducción.

El transporte es y ha sido uno de los medios más importantes que los humanos han utilizado para integrarse con el resto del mundo y al mismo tiempo ha sido un factor muy importante para el desarrollo económico de los pueblos.

Actualmente contamos con diversos medios de transporte como son: el terrestre, aéreo, ferroviario, marítimo y pluvial. Sin embargo estos medios de transporte tal como los conocemos actualmente son el resultado de la constante búsqueda de la humanidad para tener un transporte más rápido y seguro pues en su inicio la humanidad por el desconocimiento de la rueda tuvo que recurrir a la fuerza de los animales que existían en sus territorios.

Es necesario mencionar que el siguiente trabajo de tesis enfoca su estudio en un sistema de transporte terrestre conocido por nosotros como *METRO*.

Dicho sistema tiene las características de ser un sistema más rápido y con mayor capacidad comparado con el tranvía o el tren ligero, pero no es tan rápido ni cubre distancias de largo alcance como el tren suburbano o de cercanías.

Es indiscutible su capacidad para transportar grandes cantidades de personas en distancias cortas con rapidez, con un uso mínimo del suelo.

En los últimos años el Sistema de Transporte Metro ha sufrido accidentes e incidentes en todo el mundo. El número de accidentes en túneles es relativamente pequeño, pero cuando se produce un accidente en un túnel las consecuencias son siempre graves, produciendo no solo pérdidas materiales, sino también pérdida de vidas.

Si hablamos de un incendio en un túnel del Sistema de Transporte Metro, este constituye uno de los riesgos más importantes debido, a su acelerado desarrollo y por el rápido aumento de las temperaturas hasta valores superiores a los 1000°C, y por emisión de gran cantidad de humo.

Adicionalmente, en caso de incendio en túnel la evacuación de los pasajeros es difícil dadas las condiciones extremadamente severas que se crean.

Este problema es muy complejo por el hecho de que los elementos de seguridad no afectan solo a una parte del sistema, si no que atañen a la mayoría de los subsistemas que intervienen en el, como puede ser el eléctrico, mecánico, físico y ventilación por mencionar algunos.

Diseñar un sistema estable y resistente al fuego constituye un trabajo importante, ya que la normativa de prevención contra incendios no ha alcanzado todavía los niveles deseados. Si bien existe un reglamento al respecto, éste fija los objetivos mínimos a tener en cuenta.

La salvación de vidas humanas suele ser el único fin de la normativa de los diversos estados y los otros dos los imponen las compañías de seguros rebajando las pólizas cuanto más apropiados sean los medios.

El estudio de los siniestros demuestra que las medidas preventivas, sean cuales fueren, no van encaminadas a eliminar las causas de declaración de los fuegos: esto es sorprendente pero es un hecho comprobado en la práctica.

Debido a que el fuego puede declararse en cualquier lugar y en cualquier momento, debido a un sinfín de factores, la finalidad de este trabajo de tesis es realizar un completo **“Análisis de Riesgos de Incendio en el Sistema de Transporte Colectivo Metro”**. De tal manera que el transporte se desarrolle en las condiciones más seguras, permitiendo una rápida y segura evacuación.

Objetivo General y Objetivos Particulares.

Objetivo General.

Llevar a cabo un Análisis de Riesgos asociados con Incendios en el Sistema de Transporte Colectivo Metro analizando las variables críticas que se presentan en un incendio para el caso de un túnel en dicho sistema.

Objetivos Particulares.

- ♦ Analizar diferentes escenarios de incendio en túnel.
- ♦ Estimar la velocidad crítica, visibilidad, longitud del fenómeno de backlayering, así como las concentraciones de gases tóxicos en diferentes escenarios de incendio en túnel.
- ♦ Desarrollar un software para calcular la velocidad crítica de ventilación en túnel.
- ♦ Documentar los resultados obtenidos de la investigación.

Índice de figuras, graficas, tablas y ecuaciones.

Índice de figuras, graficas, tablas y ecuaciones.

Figuras

	Pág.
Figura 1.1. Mapa actual del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	7
Figura 2.1. Representación del Marco Teórico.....	11
Figura 2.2. Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	13
Figura 2.3. Sistema de Infraestructura del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	13
Figura 2.4. Sistema de túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	14
Figura 2.5. Objetivos del análisis de riesgos.....	15
Figura 2.6. Ventilación longitudinal simple.....	19
Figura 2.7. Ventilación longitudinal con toberas Saccardo.....	20
Figura 2.8. Ventilación longitudinal con pozo central de extracción.....	21
Figura 2.9. Ventilación semitransversal.....	21
Figura 2.10. Ventilación transversal.....	22
Figura 2.11. Ventilación transversal-semitransversal.....	23
Figura 2.12. Tetraedro de fuego.....	23
Figura 2.13. Etapas del fuego.....	24
Figura 2.14. Grafica tiempo contra la temperatura del fuego.....	26
Figura 2.15. Desarrollo de los flashover.....	27
Figura 2.16. Ejemplo de transferencia de calor por conducción.....	29
Figura 2.17. Ejemplo de transferencia de calor por convección.....	29
Figura 2.18. Ejemplo de transferencia de calor por radiación.....	30
Figura 2.19. Backlayering de un incendio en un túnel.....	30
Figura 2.20. Vistas (lateral y superior) de un incendio en túnel.....	34
Figura 2.21. Región frontal de la capa de fuego.....	34
Figura 2.22. Representación gráfica de la Metodología de Churchman y Acroff.....	38
Figura 2.23. Formulación del problema.....	39
Figura 2.24. Contrucción de un modelo.....	39
Figura 2.25. Obtención de la solución.....	40
Figura 2.26. Implantación y control de la solución.....	40
Figura 3.1. Red de la línea 1 (“Pantitlán – Observatorio”).....	46
Figura 3.2. Red de la línea 2 (“Cuatro caminos - Taxqueña”).....	46
Figura 3.3. Red de la línea 3 (“Indios Verdes - Universidad”).....	46
Figura 3.4. Red de la línea 4 (“Santa Anita – Martín Carrera”).....	46
Figura 3.5. Red de la línea 5 (“Politécnico - Pantitlán”).....	47
Figura 3.6. Red de la línea 6 (“El rosario – Martín Carrera”).....	47
Figura 3.7. Red de la línea 7 (“El rosario – Barranca del Muerto”).....	47

	Pág.
Figura 3.8. Red de la línea 8 (“Garibaldi – Constitución de 1917”).....	47
Figura 3.9. Red de la línea 9 (“Pantitlán - Tacubaya”).....	48
Figura 3.10. Red de la línea A (“Pantitlán – La paz”).....	48
Figura 3.11. Red de la línea B (“Ciudad Azteca - Buenavista”).....	48
Figura 3.12. Red de la línea 12 “Línea Dorada” (“Mixcoac - Tlahuac”).....	48
Figura 3.13. Conformación de un tren de 9 carros.....	50
Figura 3.14. Conformación de un tren de 6 carros.....	50
Figura 3.15. Cuerpo del carro.....	51
Figura 3.16. Vista superior del túnel del metro.....	53
Figura 3.17. Vista frontal del túnel del metro.....	54
Figura 3.18. Medidas del túnel del metro.....	54
Figura 4.1. Dirección y velocidad del aire en túnel.....	64
Figura 4.2. Fenómeno de backlayering para el caso de un túnel.....	65
Figura 4.3. Escenario, incendio en túnel entre las estaciones “Escuadrón 201” y “Atlalilco”.....	67
Figura 4.4. Escenario, incendio en túnel entre las estaciones “Hidalgo” y “Juarez”.....	69
Figura 4.5. Interfaz grafica del software, Velocidad Crítica de Ventilación.....	78
Figura 4.6. Descripción de las funciones del software, Velocidad Crítica de Ventilación.....	78
Figura 4.7. Software, Calculo de la Velocidad Crítica de Ventilación.....	80

Graficas.

Grafica 1.1	Total de estaciones según su tipo de construcción.....	8
Grafica 1.2.	Afluencia anual del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	8
Grafica 3.1.	Tipos de rodadura.....	49
Grafica 3.2.	Tipo de terminales son o con correspondencia con otras líneas con el Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	56
Grafica 3.3.	Tipo de estaciones de paso o de correspondencia con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	57
Grafica 4.1.	Comportamiento del CO con el tiempo.....	65
Grafica 4.2.	Longitud del backlayering en un túnel.....	66
Grafica 4.3.	Visibilidad para diferentes distancias y tiempos para el caso-1.....	68
Grafica 4.4.	Visibilidad para diferentes distancias y tiempos para el caso-2.....	69
Grafica 4.5.	Visibilidad para diferentes distancias y un tiempo de 10 min.....	70
Grafica 4.6.	Velocidad crítica-modelo Heselden.....	71
Grafica 4.7.	Velocidad crítica-modelo Danzinger & Kennedy.....	72
Grafica 4.8.	Velocidad crítica-modelo Oka & Atkinson.....	73
Grafica 4.9.	Velocidad crítica-modelo Kunsch.....	75
Grafica 4.10.	Velocidad crítica-modelo de Roh.....	75
Grafica 4.11.	Resumen de velocidades críticas de los modelos empleados.....	77

Tablas.

Tabla 2.1.	Niveles de probabilidad de vulnerabilidad potencial de un riesgo.....	17
Tabla 3.1.	Parque vehicular.....	49

	Pág.
Tabla 3.2. Características físicas del vagón.....	52
Tabla 3.3. Distribución de trenes por línea trenes.....	52
Tabla 3.4. Capacidad de usuarios por vagón.....	53
Tabla 3.5. Clasificación de terminales sin o con correspondencia a otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro	55
Tabla 3.6. Clasificación de estaciones de paso o de correspondencia a otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	56
Tabla 3.7. Clasificación de líneas según su construcción.....	57
Tabla 3.8. Longitud de Interestación de estación a estación de estaciones tipos subterránea.	58
Tabla 4.1. Tabla de resultados de la velocidad crítica.....	76

Tablas Anexos.

Anexo A. Tabla A.1. Afluencia de Pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro.....	XXXII
Anexo B. Tabla B.1. Parque Vehicular.....	XXXVI
Anexo B. Tabla B.2. Tipos de trenes.....	XXXVII

Ecuaciones.

Ecuación 2.1.....	31
Ecuación 2.2.....	31
Ecuación 2.3.....	32
Ecuación 2.4.....	32
Ecuación 2.5.....	32
Ecuación 2.6.....	32
Ecuación 2.7.....	33
Ecuación 2.8.....	33
Ecuación 2.9.....	33
Ecuación 2.10.....	33
Ecuación 2.11.....	34
Ecuación 2.12.....	34
Ecuación 2.12'.....	35
Ecuación 2.12".....	35
Ecuación 2.13.....	35
Ecuación 2.14.....	35
Ecuación 2.15.....	35
Ecuación 2.16.....	35
Ecuación 2.17.....	35
Ecuación 2.18.....	36
Ecuación 2.19.....	36
Ecuación 2.20.....	36
Ecuación 2.21.....	36
Ecuación 2.22.....	36
Ecuación 2.23.....	36

	Pág.
Ecuación 2.24.....	36
Ecuación 2.25.....	36
Ecuación 2.26.....	36
Ecuación 2.27.....	37
Ecuación 2.28.....	37
Ecuación 2.29.....	37
Ecuación 4.1.....	64
Ecuación 4.2.....	66
Ecuación 4.3.....	67
Ecuación 4.4.....	67

Glosario de términos y definiciones.

Glosario de términos y definiciones.

Aguas abajo. Con relación a una sección de un curso de aire, se dice que un punto está aguas abajo, si se sitúa después de la sección considerada, avanzando en el sentido de la corriente.

Aguas arriba. Es lo contrario a aguas abajo; es decir que el curso del aire va avanzando contra corriente.

Backlayering. Retroceso de humos oponiendo resistencia a la velocidad del aire.

Calor. Fenómeno físico que eleva la temperatura y dilata, funde, volatiliza o descompone un cuerpo. El calor de un cuerpo es la suma de la energía cinética de todas sus moléculas. El tema calor constituye la rama de la física que se ocupa de los movimientos de las moléculas, ya sean de un gas, un líquido o un sólido. Al aplicar calor a un cuerpo, éste aumenta su energía. Pero existe una diferencia sustancial entre la energía térmica que posee un cuerpo y su temperatura.

Comburente. Producto o sustancia que proporciona el oxígeno necesario para la combustión. Es el cuerpo en cuya presencia puede arder el combustible.

Combustible. En una combustión es el agente reductor que cede o traspassa electrones al agente oxidante. Normalmente las materias combustibles contienen cantidades apreciables de carbono e hidrógeno, que son elementos oxidables.

Conducción. Intercambio de calor que se produce de un punto a otro por contacto directo a través de un medio conductor. Ejemplo: Si se calienta el extremo de una barra metálica, al cabo de un rato el otro extremo también se habrá calentado.

Convección. Es el proceso de transmisión del calor a través de movimientos del aire. Estas corrientes de aire se producen debido a que el aire caliente pesa menos, y por lo tanto se encontrará en los niveles más altos, y el aire frío pesa más, encontrándose en los niveles más bajos. La expansión de un fuego por convección tiene más influencia que los otros métodos a la hora de definir la posición de ataque a un fuego. El calor producido por un edificio o una planta ardiendo se expandirá y elevará pasando de unos niveles a otros.

Energía cinética. La Energía Cinética es la que posee un cuerpo en movimiento. Cuando un objeto en movimiento golpea a otro, produce un cambio en un segundo.

Eyectores de humo. Son extractores que ventilan espacios confinados, ya sea a través de un ducto o bien instalados en los accesos, provocando una corriente hacia el exterior.

Flashover. También llamado Combustión Súbita Generalizada, es la transición de un incendio, de su fase de desarrollo a la fase de incendio totalmente desarrollado, en la cual la liberación de energía térmica es la máxima posible, en función del combustible causante del mismo. Es una combustión que afecta a todo un recinto cerrado en el que todos los materiales que se encuentran en el mismo se ven implicados en el incendio, entrando en combustión de forma súbita y casi simultánea.

Fuego. Se llama fuego a la reacción química de oxidación violenta de una materia combustible, con desprendimiento de llamas, calor, vapor de agua y dióxido de carbono. Es un proceso exotérmico. Desde este punto de vista, el fuego es la manifestación visual de la combustión. Se señala también como una reacción química de oxidación rápida que es producida por la evolución de la energía en forma de luz y calor.

Heat Release. Cantidad de calor liberado por un horno o un mecanismo de calefacción por segundo, dividido por su volumen.

Humo. Es una suspensión en el aire de pequeñas partículas sólidas que resultan de la combustión incompleta de un combustible. Es un subproducto no deseado de la combustión, producido en fogatas, brasas, motores de gasolina y diesel. Cuando una combustión es correcta y completa, los únicos subproductos son agua, dióxido de carbono y compuestos de diversos elementos. La inhalación del humo es la causa primaria de muerte en las víctimas de los incendios. El humo mata por intoxicación debido a sus componentes tóxicos, como el monóxido de carbono y las pequeñas partículas sólidas que taponan los alveolos pulmonares y asfixian a la víctima. El humo puede contener varias partículas carcinógenas, y provocar cáncer después de largo tiempo.

ICA. Empresa de ingeniería, procuración y construcción más grande de México, con actividades en la operación de infraestructura y el desarrollo de vivienda. Las principales líneas de negocio de ICA son construcciones civiles, construcción industrial, infraestructura y vivienda, con clientes tanto en el sector público como en el sector privado.

Llama. Gas incandescente producido por una sustancia en combustión.

Macromedia Flash. Tecnología para crear animaciones gráficas vectoriales independientes del navegador y que necesitan poco ancho de banda para mostrarse en los sitios web.

Metro. Se denomina metro (de ferrocarril metropolitano) o subterráneo (de ferrocarril subterráneo) a los «sistemas ferroviarios de transporte masivo de pasajeros» que operan en las grandes ciudades para unir diversas zonas de su término municipal y sus alrededores más próximos, con alta capacidad y frecuencia, y separados de otros sistemas de transporte.

Peligro. El peligro refiere a cualquier situación, que puede ser una acción o una condición, que ostenta el potencial de producir un daño sobre una determinada persona o cosa.

Pitones: Los pitones con chorro de neblina provocan una corriente de aire que puede ser empleada como método hidráulico de ventilación. Utiliza el mismo principio de los Eyectores de humo.

Potencia. Los fuegos de proyecto se caracterizan fundamentalmente por la potencia calorífica liberada dada habitualmente en Mega Watts (MW).

Radiación. Es el proceso de transmisión de calor de un cuerpo a otro a través de un espacio.

Reacción en cadena. Si el ambiente no es apto para disipar todo el calor que se produce, lo que ocurre es que ese calor no disipado va calentando la mezcla combustible-comburente, con lo que se convierte en una nueva energía de activación que provoca el reinicio o ayuda a que la reacción continúe.

Riesgo. El riesgo es la amenaza concreta de daño que yace sobre nosotros en cada momento y segundos de nuestras vidas, pero que puede materializarse en algún momento o no.

Sistemas abstractos. Sistemas que están compuestos por conceptos, planes, hipótesis e ideas.

Sistema. Sistema es el conjunto de elementos interrelacionados y relacionados con el ambiente externo o entorno. Si se considera al inmueble como un conjunto de elementos, y estos se encuentran en relación directa o indirecta con el entorno, entonces el inmueble se puede considerar como un sistema.

STCM. Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Subsistemas. Cada sistema se puede dividir en sistemas menores a los que podemos considerar como subsistemas o sistemas de orden inferior.

Temperatura. Es aquella propiedad física o magnitud que nos permite conocer las temperaturas, es decir, nos da una acabada idea de cuánto frío o calor presenta el cuerpo de una persona, un objeto o una región determinada.

Túnel. Entendemos por túnel a aquella construcción que tiene por objetivo principal comunicar dos extremos que, de otra manera, se mantendrían separados. El túnel permite de tal modo el paso por espacios cerrados que por lo general son subterráneos. Una de las características principales de todo túnel es que cuentan con un techo y que la única ventilación es la que se mantiene en ambos puntos, no habiendo ninguna posibilidad de salida o cruce del mismo fuera de esos dos puntos de comunicación.

Velocidad crítica. La velocidad crítica es la velocidad mínima requerida en el sistema de ventilación para eliminar el retroceso del humo y forzarle a moverse aguas abajo.

Ventilación. La ventilación es la remoción sistemática de aire y gases calientes de una estructura, seguida por la sustitución de un abastecimiento de aire más fresco, que facilita otras prioridades en el combate contra incendios. Se incrementa la visibilidad por una localización más rápida del foco del incendio. Se disminuye el peligro a los inquilinos atrapados al canalizar hacia fuera los gases calientes y tóxicos y reduce la posibilidad de una explosión de humo.

Ventiladores. Pueden o no usar ductos. Insuflan aire desde el exterior hacia ambientes cerrados. Los hay eléctricos, hidráulicos y a motor a combustión. Estos últimos son los más comunes.

Visual basic. Aplicación y lenguaje de programación desarrollados por Alan Cooper para Microsoft. Se origina en el clásico lenguaje BASIC. La primera versión salió en 1991 en un entorno relativamente sencillo para facilitar la creación de programas gráficos. Visual Basic, como su nombre lo indica, utiliza una interfaz totalmente visual.

Nomenclatura.

Nomenclatura.

Variable	Descripción	Unidades
ΔT	Aumento de la temperatura sobre el ambiente	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta \rho$	Diferencia de densidades	kg/m^3
μ_t	Viscosidad efectiva de turbulencia	kg/mseg
A	Sección transversal del túnel	m^2
B	Factor de dinamismo	m/seg
C	Constante	adimensional
C_1	Constante	Adimensional
C_2	Constante	Adimensional
C_{3e}	Constante	Adimensional
C_p	Capacidad específica calorífica	kJ/kgK
C_u	Constante	Adimensional
F	Numero de Froude, basado en g	adimensional
F_e	Numero de Froude, basado en g_e'	Adimensional
F_r	Numero de Froude	Adimensional
F_{rm}	Número modificado de Froude	Adimensional
g	Fuerza de gravedad	m/seg^2
H	Altura del túnel	m
h	Espesor de la capa de humo cerca del techo	m
\hat{H}	Altura media del túnel hidráulico, se define como la proporción de 4 veces el área del túnel transversal para el perímetro del túnel	m
h_e	Espesor de la capa de fuego de gas después de la desviación hacia el techo.	m
h_o	Espesor de la capa de humo en la localización (o), donde comienza la difusión de una sola dimensión.	m
K	Constante	Adimensional
k	Energía de turbulencia	m^2/seg^2
K'	Constante	Adimensional
K_g	Factor de corrección de grado	Adimensional

Variable	Descripción	Unidades
K_v	Constante	Adimensional
p	Presión ambiental	Pa
Q	Potencia de liberación de la convección de calor del fuego	kW
Q^*	Potencia de liberación de calor con respecto a H	Adimensional
Q'	Potencia de liberación de la convección de calor del fuego por unidad del ancho del túnel	kW/m
Q''	Potencia de liberación de calor con respecto a la altura del túnel hidráulico	Adimensional
R_c	Numero de Reynolds	Adimensional
R_i	Número de Richardson	Adimensional
βA	Constante.	Adimensional
T	Temperatura de la capa caliente	°C
T_o	Temperatura ambiente	°C
U	Velocidad de ventilación	m/seg
u	Velocidad a lo largo del eje del túnel.	m
U_1	Velocidad de la capa de gas que desvía el fuego	m/seg
U_c	Velocidad crítica de ventilación	m/seg
U_e	Velocidad radial de la capa de fuego después de la desviación hacia el techo	m/seg
u_o	Velocidad a lo largo del eje del túnel en el lugar (o), donde comienza la difusión.	m/seg
V	Velocidad de ventilación	m/seg
V^*	Velocidad crítica en base a H (altura del túnel)	Adimensional
V''	Velocidad crítica en base a la altura del túnel hidráulico	Adimensional
W	Ancho del túnel	m
γ	Relación de los calores específicos de los gases de un incendio	Adimensional
δ_k	Constante	Adimensional
δ_t	Constante	Adimensional
E	Tasa de disipación viscosa de energía de turbulencia	m^2/seg^3
ρ	Densidad media del aire	kg/m^3
ρ_o	Densidad del aire ambiental	kg/m^3

Capítulo I. Antecedentes y Justificación.

Los grandes espíritus siempre han tenido que luchar
contra la oposición feroz de mentes mediocres.
(Einstein).

Capítulo I.

Antecedentes y Justificación.

1.1. Sistema de Transporte Metro.

La palabra metro (ferrocarril metropolitano) o subterráneo (ferrocarril subterráneo) se denomina a los “sistemas ferroviarios de transporte masivo de pasajeros” que operan en las grandes ciudades para unir diversas zonas de su término municipal y sus alrededores más próximos, con alta capacidad y frecuencia y separados de otros sistemas de transporte.

Las redes de metro se construyen frecuentemente bajo la tierra como es el caso de Madrid, superficiales como lo son en México, aunque a veces se construyen elevadas como en el caso de Chicago e incluso, en zonas normalmente alejadas del centro o de expansión urbana reciente, a nivel de calle pero con plataforma reservada.

Estos sistemas operan sobre distintas líneas que componen una red, deteniéndose en estaciones no muy distanciadas entre sí y ubicadas a intervalos generalmente regulares. El servicio es prestado por varias unidades de vagones eléctricos que circulan en una formación sobre rieles. Normalmente se integran con otros medios de transporte públicos y, a menudo, son operados por las mismas autoridades de transporte público.

El metro es el sistema de transporte más rápido y con mayor capacidad comparado con el tranvía o el tren ligero, pero no es tan rápido ni cubre distancias de largo alcance como el tren suburbano o de cercanías. Es indiscutible su capacidad para transportar grandes cantidades de personas en distancias cortas con rapidez, con un uso mínimo del suelo.

Pese a que la tendencia expansiva de las redes de metro de las grandes ciudades las ha llevado a conectar con otros núcleos de población periféricos del área metropolitana, el tipo de servicio que prestan sigue siendo perfectamente independiente y distinguible del que prestan otros sistemas de transporte ferroviarios. (Metro sistema de transporte, 2007).

1.2. Cronología de los Sistemas de Transporte Metro en el mundo.

El primer metro del mundo fue el *subterráneo de Londres* (denominado *Metropolitan Railway*)¹, inaugurado en 1863 con 6 kilómetros de longitud. En años sucesivos fue extendiéndose, de forma que en 1884 formaba un anillo de aproximadamente 20 kilómetros.

A continuación se le añadieron líneas radiales, en parte a cielo abierto y en parte en túnel, para constituir el *Metropolitan and District Railway*². Las locomotoras eran de vapor. Posteriormente se comenzó la excavación de túneles en forma de tubo y se electrificaron las líneas, de allí la denominación inglesa *Tube*.

¹ Ferrocarril Metropolitano.

² Ferrocarril Metropolitano Distrital.

La siguiente ciudad en tener metro fue New York, cuya línea más antigua, estaba totalmente separada del tráfico, la West End de BMT, estuvo en uso desde el mismo año que el metro de Londres 1863.

Cronológicamente el tercer metro más antiguo del mundo (y el más corto) es el de Estambul. El tramo llamado Túnel fue inaugurado en 1876 y comunica el barrio de Karaköy con la Torre Gálata. Se construyó entre 1871-1876 por una empresa inglesa con un proyecto de un ingeniero francés: Eugene Henry Gavand. Tiene 570 metros de distancia y el trayecto dura solamente dos minutos.

En 1896, Budapest (con la inauguración de la línea de Vörösmarty Tér a Széchenyi Fürdő, de 5 kilómetros) y Glasgow (con un circuito cerrado de 10 kilómetros) fueron las siguientes ciudades europeas en disponer de metro. La tecnología se extendió rápidamente a otras ciudades en Europa y luego a los Estados Unidos, donde un elevado número de sistemas se han construido.

A partir del siglo XX comenzó la expansión por Latinoamérica, Oceanía, África y Asia, donde el crecimiento ha sido más grande en los últimos años. Más de 160 ciudades tienen sistemas de tránsito rápido, con un total de más de 8000 kilómetros de vías y 7000 estaciones.

El primer país iberoamericano que construyó su propia red de metro fue Argentina en Buenos Aires en el año de 1913.

El primer ferrocarril metropolitano que se inauguró en España y segundo si consideramos a España e Iberoamérica, fue el metro de Madrid, en la actualidad uno de los más extensos del mundo, que data de 1919, seguido por el de Barcelona 1922.

El metro de Moscú mejor conocido como el Palacio Subterráneo, inicio su actividad en 1935. Es el primero en el mundo por el número de pasajeros que transporta al día "9.2 millones".

Casi cinco décadas después, la Ciudad de México construye su propia red en 1969 y se convierte hasta la fecha en el más extenso de Latinoamérica.

Le siguen en Brasil las redes de metro de São Paulo y Santiago en 1975 y en Río de Janeiro en 1979.

El metro de Hong Kong, fue inaugurado en 1979, es uno de los principales transportes masivos de la ciudad.

En los años 1980, hay un cierto auge de este sistema de transporte, en Brasil, las ciudades de Belo Horizonte, Brasilia, Recife, Porto Alegre, São Paulo, Río de Janeiro y Teresina poseen su propio metro. En México, en la ciudad de Guadalajara se termina de construir la línea 1 del metro. En la ciudad de Monterrey, Nuevo León, a partir del año 1987 se empieza a construir la línea 1.

Venezuela se vuelve el quinto país latinoamericano en construir una red de metro moderno y con buenas líneas en la ciudad de Caracas.

Se abre en la ciudad española de Valencia en el año 1988 uno de los metros que mayor longitud tienen sus líneas, funcionando en la periferia como un tren ligero.

Durante los años 1990, se construyeron los metros de Medellín en Colombia y se terminaría en 1991 el de Monterrey en México, así como la ampliación de muchas redes ya existentes.

Puerto Rico se vuelve el primer país en el Caribe en contar con su propio sistema de transporte (Tren Urbano de San Juan), construido en San Juan en el 2004.

En España, en 2007 entra en funcionamiento el metro de la ciudad de Palma de Mallorca.

República Dominicana, en la ciudad de Santo Domingo de Guzmán, la construcción de su primera línea de metro está concluida, convirtiendo la República Dominicana en el segundo país caribeño en contar con este tipo de transporte.

El 2 de abril de 2009 se pone en marcha la primera línea con 18 kilómetros del metro de Sevilla, convirtiéndose en la sexta ciudad española en contar con este sistema de transporte.

En la ciudad de Panamá, el nuevo gobierno que encabeza el empresario Ricardo Martinelli, construirá una línea de tren urbano metro de Panamá, para satisfacer a una población de 900,000 usuarios. Se estima que el proyecto inicie en 2010 y concluya en 2014. (Principales sistemas de metro en términos de pasajeros, 2008).

1.3. Incendios mundiales ocurridos en el Sistema de Transporte Metro.

En los últimos años han tenido lugar en todo el mundo, accidentes relacionados con incendios en el Sistema de Transporte Metro, a continuación se hace la descripción de algunos de ellos.

Chicago 20 de junio 2010. Diecinueve personas han sufrido quemaduras por un incendio en el metro de Chicago, EE. UU. Cinco de los afectados se encuentran en estado muy grave tras intoxicarse por el humo.

El hecho se produjo, a las 5:00 p.m., en un túnel de la línea 'roja' entre las estaciones Chicago Avenue y Clark Division. "Se incendiaron los rieles", declaró la representante del Departamento de Transporte de Chicago (Chicago Transit Authority), Catherine Hosinski.

En el momento en el que apareció el fuego tres convoyes se encontraban en las proximidades del tren averiado. Aunque los maquinistas pararon en seco, al cabo de unos instantes siguieron su ruta hacia las estaciones correspondientes. Una parte de los pasajeros del subterráneo fue evacuada por las salidas de emergencia.

Según un representante del servicio de extinción de fuegos, Richard Rozando, cinco afectados fueron trasladados a hospitales locales en estado crítico, tres pasajeros tienen heridas de gravedad media y once personas resultaron levemente heridas.

Decenas de coches de emergencia llegaron al lugar del accidente y más de cien bomberos participaron en las tareas de rescate, que finalizaron dos horas más tarde. La línea 'roja' del metro de Chicago permaneció dos horas sin electricidad. De momento no se han establecido las causas del incendio. (Un incendio en el metro de Chicago).

España 28 de diciembre de 2009. Cinco personas intoxicadas muy leves por el humo que ha ocasionado un pequeño incendio en un tren de la línea 9 en España, por un fallo eléctrico. El incidente se produjo alrededor de las 10:45 a.m., cuando al entrar en la estación de Príncipe de Vergara empezó a salir humo de las vías del tren. Al parecer, el incendio se produjo por un fallo eléctrico en el tren, por el cual se vio interrumpido el servicio en la línea 9, entre las estaciones de Artilleros y Avenida de América. (Cinco personas intoxicadas muy leves en un incendio del metro de Madrid- 20minutos.es, 2009).

España 3 de noviembre de 2009. El depósito de gasolina de una máquina Dumper³ empezó a arder pocos minutos después de la 1:00 p.m., en las obras del metro de Basauri. El incendio se originó en el interior del túnel que comunica las estaciones de Basauri y Ariz. A pesar de que el fuego quedó extinguido a las 6:20 p.m., los bomberos permanecieron en la zona hasta que cayó la noche para retirar el humo del túnel con extractores.

La Policía Municipal alertó a los vecinos de la zona para que cerraran las ventanas de casa y los peatones que transitaron en los alrededores, tuvieron que cubrirse el rostro debido a la intensa humareda que cubrió al barrio a lo largo de siete horas.

En el incendio no se registraron heridos, aunque un trabajador del metro tuvo que ser atendido por los paramédicos de una ambulancia al presentar síntomas por inhalación de humo. *"A pesar de tratarse de un fuego de pequeñas dimensiones, el humo ha generado problemas de acceso debido a la ubicación de la maquinaria siniestrada, a unos 600 metros de la boca de entrada del túnel de la estación de Basauri. A esta dificultad, hay que añadir el lodo de las propias obras de construcción del suburbano"*, explicaron fuentes de bomberos. La operación concluyó alrededor de las ocho y media de la noche. (Un incendio en el metro de Basauri provoca una gran humareda. Deia. Noticias de Bizkaia, 2009).

París 29 de julio de 2007. Incendio que afectó un vagón de la línea 13 del metro de París provocó intoxicaciones al menos 35 personas. El incendio comenzó en los frenos a las 9:00 a.m., y rápidamente se propagó a todo el vagón, 15 personas debieron ser hospitalizadas, entre ellas una mujer embarazada que se encontraba en estado grave. (Incendio en metro de París provocó alarma, 2007).

México D.F. 13 de diciembre de 2004. Incendio registrado entre la estación Santa Anita del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, que hace conexión con la línea 8 y Jamaica, que conecta con la línea 9, se generó en los cables que abastecen a las vías, a donde se temía que se extendiera. Elementos de Protección Civil y seguridad del metro acudieron al lugar de los hechos, luego de que se confirmó que cerca de las 4:08 p.m., se reportó un corto circuito que obligó a la suspensión del servicio en dichas estaciones. (Incendio en la línea 4 del metro, México, esmas, 2004).

Corea del Sur 18 de febrero de 2003. Un hombre con problemas mentales provocó un incendio en la ciudad surcoreana de Daegu que causó la muerte a 192 personas y heridas a otras 148. (Los peores accidentes de metro en el mundo, 2006).

Lisboa 18 de octubre de 1997. Un empleado perdió la vida en un incendio en una estación de metro de Lisboa. Se cree que la causa del accidente fue un cortocircuito. (Los peores accidentes de metro en el mundo, 2006).

Bakú 28 de octubre de 1995. Un presunto cortocircuito ocasionó un incendio en dos vagones del metro de Bakú, en Azerbaiyán. Fallecieron 289 personas. (Los peores accidentes de metro en el mundo, 2006)

Londres 18 de noviembre de 1987. Un incendio en la estación de King's Cross Londres, en plena hora pico dejó 32 muertos y 150 heridos. El fuego se inició pocos minutos antes de las 8:00 p.m., en la parte inferior de una escalera mecánica de madera. (Incendio en la estación de metro de King's Cross, 1991).

Estos accidentes demuestran que actualmente ni los países más desarrollados tecnológicamente están todavía bien preparados para evitar o al menos disminuir las consecuencias de los accidentes en túneles del sistema metro.

³ Dúmpers: Vehículo para el transporte de materiales de obra dotado de tracción a todas sus ruedas.

1.4. **Justificación del proyecto de tesis.**

Desde el año 1863 que se inauguró el primer Sistema de Transporte Metro en la ciudad de Londres y hasta la fecha se ha seguido con la construcción, ampliación y remodelación de éste por todo el mundo.

Con esto podemos entender, que los cambios por los que ha pasado el sistema han sido a raíz de la aceptación por los usuarios, debido a la rapidez, eficiencia y a la gran capacidad con la que cuenta para transportar grandes cantidades de personas en largas distancias.

No está por demás mencionar que el Transporte Metro, como cualquier otro sistema es vulnerable a sufrir accidentes, como ya se vio en la sección 1.3. Incendios mundiales ocurridos en el Sistema de Transporte Metro.

Enfocándonos a nuestro sistema de estudio, se sabe que el 13 de diciembre de 2004, en la ciudad de México, el Sistema de Transporte Metro, sufrió un accidente relacionado con un incendio.

Dicho incendio ocurrió en la interestación superficial (Santa Anita – Jamaica), dando como resultado solo la suspensión temporal del servicio en dichas estaciones y no reportándose deceso alguno.

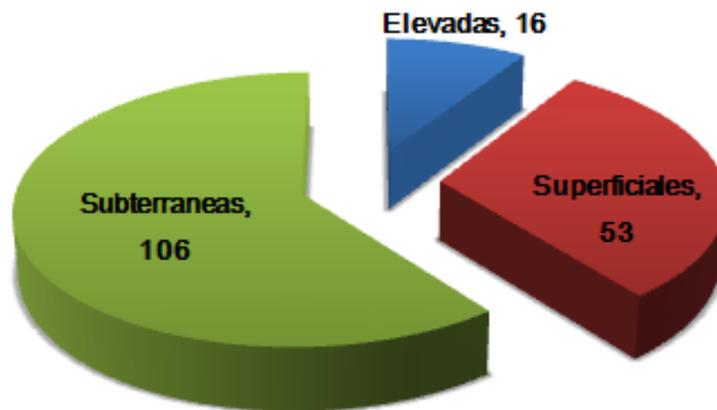
Tal vez si las condiciones del incendio hubieran sido diferentes las consecuencias habrían cambiado dramáticamente.

Actualmente la red del metro de la ciudad de México, cuenta con 11 líneas funcionales y una en construcción, las cuales están divididas por estaciones, a su vez estas se clasifican en tres: terminales, de paso y correspondencia. Dicha red la podemos ver en figura 1.1. Mapa actual del Sistema de Transporte Colectivo Metro.



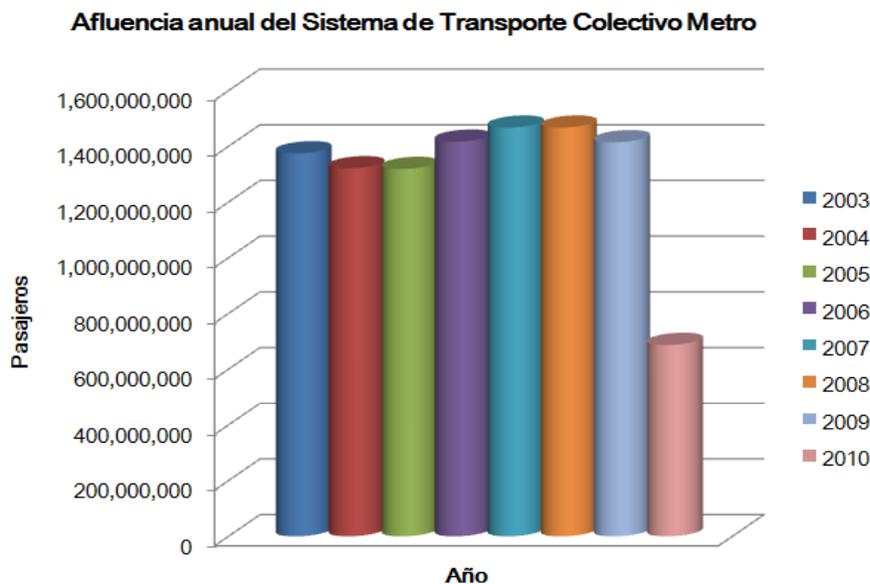
Figura 1.1. Mapa actual del Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Fuente. (Red de Metro de la Ciudad de México, 2010).

Dicho sistema cuenta hasta el momento con un total de 175 estaciones, de las cuales 16 son elevadas, 53 superficiales y 106 subterráneas como lo podemos ver en la grafica 1.1. Total de estaciones según su tipo de construcción.



Grafica.1.1. Total de estaciones según su tipo de construcción.
Fuente. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)
Elaboración propia.

En la ciudad de México el Sistema Metro es un sistema de transporte con mucha afluencia de pasajeros, como lo muestra la grafica 1.2. Afluencia anual del Sistema de Transporte Colectivo Metro, en donde podemos ver los datos obtenidos a partir del año 2003 a la fecha; es necesario aclarar que el dato correspondiente al año 2010, solo abarca el primer semestre.



Grafica 1.2. Afluencia anual del Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Fuente. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes).
Elaboración propia.

Ahora que sabemos lo demandante que es el Sistema de Transporte Metro, que el 61% de las estaciones que componen la red, son del tipo subterráneas (túnel) y que además algunas de las estaciones son de correspondencia (transbordos) hasta con tres líneas. Nos hace pensar **¿Qué pasaría si en este tipo de escenario se suscitara un incendio?**

Debemos de tener en cuenta que en caso de presentarse un incendio en una interestación subterránea (túnel), además de afectar a los usuarios que se encuentren en este, también pueden ser afectados los usuarios que se encuentren esperando en el andén⁴ (dependiendo de la localización del incendio), sin dejar a un lado los daños materiales.

Por tal motivo es necesario estar preparado para cualquier accidente, escenario o situación. Debido a esto, en el presente trabajo de tesis, se realizara un análisis de riesgo de incendios en el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México.

⁴ Plataforma elevada de embarque con la altura conveniente para que los usuarios aborden los vehículos (trenes, autobuses u otros medios de transporte).

Capítulo II. Marco Teórico y Metodológico.

Saber no es suficiente; tenemos que aplicarlo.
Tener voluntad no es suficiente; tenemos que implementarla.
(Goethe).

Capítulo II.

Marco Teórico y Metodológico.

2.1. Marco Teórico.

En este capítulo se realizara un Análisis de Riesgo de Incendios en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, con una visión sistémica e integral. Esto nos permitirá hacer un mejor análisis de nuestro sistema y tener un conocimiento pleno de los elementos que interactúan con él. En la figura 2.1. Representación del Marco Teórico, tenemos una visión abstracta de lo anterior.

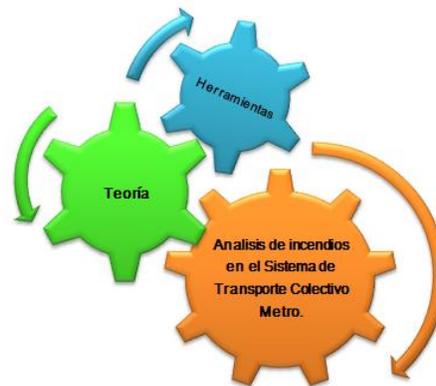


Figura. 2.1. Representación del Marco Teórico.
Elaboración propia.

2.1.1. Teoría General de Sistemas.

La Ingeniería de Sistemas es un modo de enfoque interdisciplinario que permite estudiar y comprender la realidad, con el propósito de implementar u optimizar sistemas complejos.

Puede verse como la aplicación tecnológica de la teoría de sistemas a los esfuerzos de la ingeniería, adoptando en todo este trabajo el paradigma sistémico. La ingeniería de sistemas integra otras disciplinas y grupos de especialidad en un esfuerzo de equipo, formando un proceso de desarrollo estructurado.

Una de las principales diferencias de la ingeniería de sistemas respecto a otras disciplinas de ingeniería tradicionales, consiste en que la ingeniería de sistemas *no construye productos tangibles*. Mientras que los ingenieros civiles podrían diseñar edificios o puentes, los ingenieros electrónicos podrían diseñar circuitos, los ingenieros de sistemas tratan con *sistemas abstractos* con ayuda de las metodologías de la ciencia de sistemas, y confían además en otras disciplinas para diseñar y entregar los productos tangibles que son la realización de esos sistemas. (Teoría General de Sistemas, 2007).

Para el desarrollo del trabajo de tesis es necesario el conocimiento de algunos conceptos básicos para poder tener un conocimiento mejor de sistema en estudio, que en este caso es el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México. Por lo que a continuación se mencionan algunos de ellos.

Sistema. Un sistema es un conjunto de partes o elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí para lograr un objetivo. Los sistemas reciben (*entrada*) datos, energía o materia del ambiente y proveen (*salida*) información, energía o materia. (Arnold, 1989).

Subsistema. Se entiende por subsistemas a conjuntos de elementos y relaciones que responden a estructuras y funciones especializadas dentro de un sistema mayor. En términos generales, los subsistemas tienen las mismas propiedades que los sistemas y su delimitación es relativa a la posición del observador de sistemas y al modelo que tenga de éstos. (Johannsen, 1975).

Entorno. Es aquella parte del universo que está en comunicación con el sistema, pero que no es parte de sistema.

Frontera. Límite artificiales que se fijan entre el sistema y su ambiente tomando en cuenta criterios, objetivos y recursos del usuario de la herramienta sistémica. (Johannsen, 1975)

Ambiente. Sistemas externos a la frontera seleccionada del sistema a intervenir. Sobre los sistemas externos o entorno no se puede ejercer control.

Cosmovisión. Es la forma en la cual se puede ver la totalidad del problema en estudio.

Retroalimentación (feedback). La retroalimentación se produce cuando las salidas del sistema o la influencia de las salidas del sistema en el contexto, vuelven a ingresar al sistema como recursos o información. La retroalimentación permite el control de un sistema y que el mismo tome medidas de corrección en base a la información retroalimentada.

2.1.2. El Sistema de Transporte Colectivo Metro, visto como un sistema.

El metro de la ciudad de México es un Sistema de Transporte Público, que sirve a extensas áreas del Distrito Federal y zona conurbada. Dicho sistema de transporte interactúa con otros sistemas que se encuentran dentro de su entorno. A continuación vamos a hacer una descripción de los diferentes niveles de nuestro sistema para finalmente llegar al sistema de estudio. Iniciaremos mostrando el último nivel de nuestro sistema, es necesario comentar que el sistema fue acotado de acuerdo a nuestras necesidades.

Visualizando la figura 2.2. Sistema de Transporte Colectivo Metro y tomando en cuenta que nuestro sistema de estudio es el Sistema de Transporte Colectivo Metro podemos decir que está interactuando directamente con otros sistemas, los cuales para fines de nuestro estudio pasarán a ser subsistemas. Dichos subsistemas son: subsistema económico, subsistema político, subsistema social y subsistema natural que se encuentran inmersos en el medio ambiente de nuestro sistema.

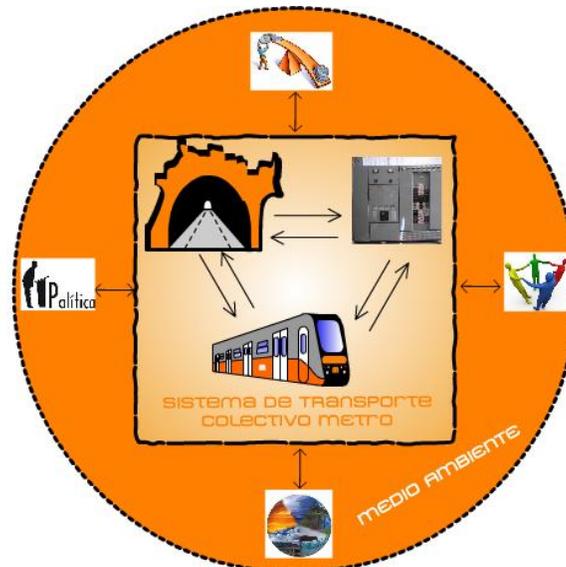


Figura 2.2. Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Elaboración propia.

Dentro del Sistema de Transporte Colectivo Metro, vemos que existen tres subsistemas más, los cuales son: infraestructura, material rodante y sistema eléctrico, adentrándonos aun más a nuestro sistema pasaremos al subsistema de Infraestructura.

Ahora analizando la figura 2.3. Sistema de infraestructura del sistema de Transporte Colectivo Metro, vemos que el Sistema de Infraestructura está compuesta por los subsistemas como son: subsistema vías, subsistema túneles, subsistema estaciones y subsistema trenes. Con esto estamos haciendo más pequeño el área de estudio. Debido a que esta tesis se enfoca al análisis de riesgos de incendio en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, y exclusivamente el análisis se realizará en los túneles del sistema, nos falta mencionar el sistema final que será el sistema túneles.



Figura 2.3. Sistema de Infraestructura del Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Elaboración propia.

Ahora en la figura 2.4. Sistema túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro, vemos que este sistema se cuenta o se toman en consideración los subsistemas de ventilación, subsistema de control de incendios y la geometría física (diámetros y longitudes) del túnel, debido a que estos datos nos van hacer útiles para nuestro análisis de riesgos.



Figura 2.4. Sistema de túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Elaboración propia.

De acuerdo con lo mencionado hasta ahora, a continuación se desarrollaran temas que se deben de considerar, para tener un mejor conocimiento de todos los aspectos que influyen directa e indirectamente en nuestro sistema de estudio. Con apoyo en estos temas, posteriormente en el capítulo IV, se realizara el análisis de riesgos.

2.1.3. Análisis de riesgos.

Análisis de riesgos se le denomina a la estimación del nivel de peligro potencial de una actividad riesgosa para las personas, el medio ambiente y los bienes materiales en términos de cuantificar la magnitud del daño y de la probabilidad de ocurrencia.

Este trata de estimar el nivel de peligro potencial en un evento, por tanto trata de estudiar, evaluar, medir y prevenir los fallos y las averías de los sistemas técnicos, de los procedimientos operativos y de las imprudencias que pueden iniciar y desencadenar sucesos no deseados (accidentes) que afecten a las personas, los bienes y el medio ambiente.

Los métodos para la identificación, análisis y evaluación de riesgos son una herramienta muy valiosa para abordar con decisión su detección, causa y consecuencias que puedan acarrear, con la finalidad de eliminar o atenuar los propios riesgos así como limitar sus consecuencias, en el caso de no poder eliminarlos.

El análisis de riesgos tiene como objetivos principales:

- Identificar y medir los riesgos.
- Deducir los posibles accidentes graves que pudieran producirse.
- Determinar las consecuencias en el espacio y el tiempo de los accidentes, aplicando determinados criterios de vulnerabilidad.
- Analizar las causas de dichos accidentes.
- Discernir sobre la aceptabilidad o no de las propias instalaciones y operaciones realizadas.
- Definir medidas y procedimientos de prevención y protección para evitar la ocurrencia y/o limitar las consecuencias de los accidentes.
- Cumplir los requisitos legales de las normativas nacionales e internacionales que persiguen los mismos objetivos: **(Directiva 96/82/CE y Real Decreto 1254/99)**.

Los aspectos de un análisis sistemático de los riesgos que implica un determinado espacio, desde el punto de vista de la prevención de accidentes, están íntimamente relacionados con los objetivos que se persiguen.

- Identificación de sucesos no deseados, que pueden conducir a la materialización de un peligro.
- Análisis de las causas por las que estos sucesos tienen lugar.
- Valoración de las consecuencias y de la frecuencia con que estos sucesos pueden producirse.

En la figura siguiente, se representan estos aspectos, lo que implica acciones diferentes en cada caso.

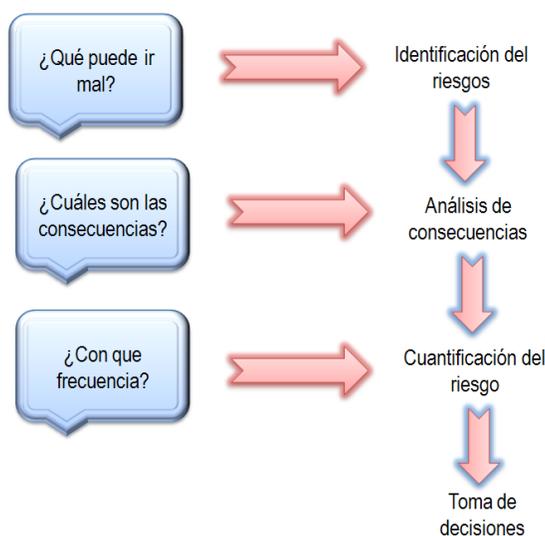


Figura 2.5. Objetivos del análisis de riesgos.
Fuente. **(Directiva 96/82/CE y Real Decreto 1254/99.)**
Elaboración propia.

Cada uno de estos aspectos fija su atención en cuestiones importantes sobre los análisis de los peligros de un determinado lugar.

El primer aspecto trata de contestar a la pregunta siguiente: ¿Qué puede ocurrir? Es propiamente la identificación de los riesgos mediante técnicas adecuadas.

La siguiente cuestión trata de contestar a la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las consecuencias? Se trata de aplicar métodos matemáticos de análisis de consecuencias.

Por último, otra de las cuestiones a resolver es: ¿Cuál es la frecuencia de que ocurra? Se trata de aplicar métodos que puedan determinar la frecuencia de ocurrencia mediante métodos semicualitativos o bien mediante análisis cuantitativos de riesgo (ACR) que implican aspectos cualitativos y cuantitativos junto con análisis de consecuencias.

2.1.3.1. Métodos de identificación de riesgos.

Básicamente, existen dos tipos de métodos para la realización de análisis de riesgos, si atendemos a los aspectos de cuantificación:

1. **Métodos cualitativos:** Se caracterizan por no recurrir a cálculos numéricos. Pueden ser métodos comparativos y métodos generalizados.
2. **Métodos semicualitativos:** Los hay que introducen una valoración cuantitativa respecto a las frecuencias de ocurrencia de un determinado suceso y se denominan métodos para la determinación de frecuencias, o bien se caracterizan por recurrir a una clasificación de las áreas de una instalación en base a una serie de índices que cuantifican daños: índices de riesgo.

a) Métodos comparativos

Se basan en la utilización de técnicas obtenidas de la experiencia adquirida en otros sucesos similares existentes, así como en el análisis de sucesos que hayan ocurrido en establecimientos parecidos al que se analiza. Principalmente son cuatro métodos los existentes:

1. Manuales técnicos o códigos y normas de diseño.
2. Listas de comprobación o "Safety check lists".
3. Análisis histórico de accidentes.
4. Análisis preliminar de riesgos o PHA.

b) Métodos generalizados

Los métodos generalizados de análisis de riesgos, se basan en estudios de las instalaciones y procesos mucho más estructurados desde el punto de vista lógico-deductivo que los métodos comparativos. Normalmente siguen un procedimiento lógico de deducción de fallos, errores, desviaciones en equipos, instalaciones, procesos, operaciones, etc. que trae como consecuencia la obtención de determinadas soluciones para este tipo de eventos. Existen varios métodos generalizados. Los más importantes son:

1. Análisis "What if ...?".
2. Análisis funcional de operabilidad, HAZOP.
3. Análisis de árbol de fallos, FTA.
4. Análisis de árbol de sucesos, ETA.
5. Análisis de modo y efecto de los fallos, FMEA.

La evaluación de riesgos identifica las amenazas, vulnerabilidades y riesgos de la información, sobre la plataforma tecnológica de una organización, con el fin de generar un plan de implementación de los controles que aseguren un ambiente seguro, bajo los criterios de disponibilidad, confidencialidad e integridad de la información.

Los dos puntos importantes a considerar son:

1. La probabilidad de una amenaza
2. La magnitud del impacto sobre el sistema, la cual se mide por el nivel de degradación de uno o combinación de alguno de los siguientes elementos: confidencialidad, disponibilidad, integridad.

Con el fin de derivar una probabilidad o una estimación de la ocurrencia de un evento, los siguientes factores deben ser tomados en cuenta:

1. Fuente de la amenaza y su capacidad.
2. Naturaleza de la vulnerabilidad.
3. La probabilidad que una vulnerabilidad potencial pueda ser explotada por una fuente de amenaza la podemos clasificar en alta, media-alta, media, media-baja y baja, como se describe a continuación:

Nivel	Definición
Alta = 5	<i>La amenaza está altamente motivada y es suficientemente capaz de llevarse a cabo.</i>
Media-Alta = 4	<i>La amenaza está fundamentada y es posible.</i>
Media = 3	<i>La amenaza es posible.</i>
Media-Baja = 2	<i>La amenaza no posee la suficiente capacidad</i>
Baja = 1	<i>La amenaza no posee la suficiente motivación y capacidad.</i>

Tabla 2.1. Niveles de probabilidad de vulnerabilidad potencial de un riesgo.
Fuente. (CISSP)
Elaboración propia.

2.1.4. Túneles.

Los túneles son aquella construcción que tiene por objetivo principal comunicar dos extremos que, de otra manera, se mantendrían separados. El túnel permite de tal modo el paso por espacios cerrados que por lo general son subterráneos. Una de las características principales de todo túnel es que cuentan con un techo y que la única ventilación es la que se mantiene en ambos puntos, no habiendo ninguna posibilidad de salida o cruce del mismo fuera de esos dos puntos de comunicación.

La inversión de tiempo, capital y fuerza humana para la construcción de túneles suele ser muy importante ya que los túneles son de las construcciones difíciles que puede realizar el ser humano (al ser completamente artificiales y requerir por tanto ciertos rasgos de seguridad). Por lo general, los túneles se realizan a través de la voladura o explosión de los espacios a vaciar, por perforación y por excavación.

De acuerdo al tipo de túnel que se quiera construir existirán diferentes métodos más útiles para la obtención de los resultados específicos.

Las medidas de seguridad en los túneles del sistema metro son completamente diferentes a las de los túneles carreteros, debido a que los usuarios del sistema de transporte metro atraviesan los túneles sin posibilidad de bajarse en ellos. En general las medidas de seguridad de los túneles del sistema metro son muy inferiores a las de los carreteros.

Para justificar estas menores medidas de seguridad en los túneles del sistema metro, se suele argumentar, que estos presentan una menor siniestralidad, debido a las características propias del tráfico ferroviario. (García Ferrer, 1990)

2.1.5. Sistema de ventilación en túnel.

En lo que se refiere a ventilación en túneles, hay dos aspectos que se deben de considerar en el diseño de estaciones y túneles de operación. En cuanto al aire, el requisito más importante es el enfriamiento de los túneles para mantener dentro de los límites aceptables, el calor que se origina de los motores y de los frenos. Por tanto se requiere un suministro adecuado de aire fresco a una temperatura aceptable y una limitación de la velocidad del aire en las estaciones, en donde el paso de los trenes puede causar movimientos del aire fuerte y desagradable.

Los sistemas de ventilación son muy importantes en el caso de un incendio a la hora de poder conseguir un control de los humos emitidos por el incendio y aminorar los efectos térmicos sobre las estructuras. Principalmente se emplean sistemas de ventilación longitudinales, sistemas transversales y sistemas semitransversales.

De acuerdo a lo anterior se describen los dos sistemas de ventilación que existen, los sistemas de ventilación natural y el sistema de ventilación artificial o forzada. (García Ferrer, 1990).

2.1.5.1. Ventilación natural.

La ventilación natural está siempre presente en todos los túneles y en ausencia de un sistema de ventilación artificial, es la que determina el sentido de circulación del aire en el interior de estos. La ventilación natural de un túnel, se debe a la interacción de los efectos que producen los tres factores siguientes:

a) Diferencias de presión entre las bocas del túnel.

Cuando el aire exterior existente en las dos bocas del túnel posee una presión diferente, el aire circulará por el interior del túnel en el sentido de mayor a menor presión, es decir, de la boca cuyo aire exterior se encuentre a mayor presión hacia la boca cuyo aire exterior se encuentre a menor presión. En este caso, el movimiento natural del aire se produce por el equilibrio de presiones.

b) Viento dominante en el exterior del túnel.

Cuando existe viento en el exterior del túnel, el aire llegará a alguna de las bocas del túnel con una cierta velocidad. Si la dirección del viento es más o menos similar a la del túnel, el aire tenderá a penetrar por la boca a la que llega. Esto, producirá una circulación del aire en el interior del túnel, en el mismo sentido y dirección que el viento del exterior. Por lo tanto, el sentido de evacuación de humos en el interior de un túnel, puede estar condicionado por el viento reinante en el exterior del mismo. En el caso de presentarse un incendio dentro de un túnel, cuando existe en el exterior un viento de cierta magnitud, este puede condicionar totalmente el movimiento del humo.

c) Pendiente del interior del túnel.

Si por cualquier circunstancia, el aire existente en el interior del túnel aumenta de temperatura, entonces el movimiento del aire seguirá un comportamiento convectivo¹¹, tendiendo por lo tanto a desplazarse pendiente arriba. Cuando la temperatura exterior es baja, el aire existente en el interior de los túneles suele estar más caliente que el del exterior (efecto abrigo), por lo que aquel, también tenderá a desplazarse pendiente arriba.

El calor de los motores de los vehículos y los gases de combustión expelidos, también contribuyen a elevar la temperatura del aire en el interior del túnel. De lo expuesto se deduce, que los movimientos convectivos pendiente arriba serán considerables en caso de presentarse un incendio. En conclusión, debido a que la ventilación natural, se debe a la combinación de los tres efectos expuestos, el resultado final no se puede prever de antemano ya que, dependerá de las condiciones atmosféricas que se den en cada momento y de si los efectos se suman o se contrarrestan. (Navarra, 2003).

2.1.5.2. Ventilación artificial o forzada.

La ventilación artificial o forzada es la que se establece por la acción mecánica de ventiladores eléctricos. Puesto que el humo que se origina a consecuencia del tránsito de vehículos, supone un volumen de humos menor y son menos nocivos que los que se originan en un incendio, la ventilación forzada, se diseña hoy en día, o al menos debería ser diseñada, pensando en la evacuación del humo producido por un incendio. Los sistemas artificiales que se utilizan para ventilar un túnel mecánicamente son los siguientes:

a) Ventilación longitudinal simple.

La ventilación longitudinal simple se aplica principalmente para túneles unidireccionales. El flujo de aire producido por los ventiladores se aplicará únicamente en sentido longitudinal consiguiendo la evacuación del humo en el sentido de la corriente de aire y de las personas en sentido opuesto a esta (ya que se evita el backlayering si está bien diseñado el sistema). Esta ventilación se consigue mediante la colocación de ventiladores axiales cada cierta distancia en la clave del túnel. Los ventiladores son reversibles, es decir que se puede cambiar el sentido del flujo del aire, con tan solo invertir el giro de los ventiladores.

Este sistema de ventilación no es adecuado para túneles largos, ya que en caso de incendio, el humo realizará todo su recorrido por el interior del túnel antes de ser expulsado, lo cual pone en peligro a los usuarios que han quedado detenidos en su interior. Igualmente, los humos de escape expelidos por los vehículos que transitan por el túnel, se acumulan progresivamente en dirección hacia la boca de extracción. (Navarra, 2003). Ver figura 2.5. Ventilación longitudinal simple.

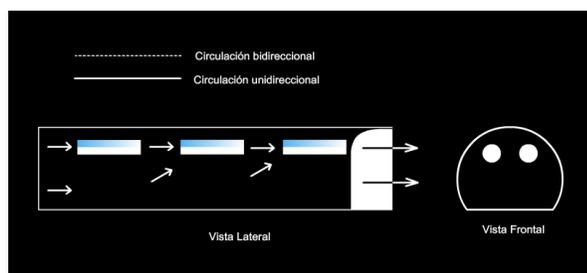


Figura 2.6. Ventilación longitudinal simple.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

¹¹ Producción de corrientes en gases y líquidos por el contacto con cuerpos u objetos de mayor temperatura.

b) Ventilación longitudinal con toberas Saccardo.

La ventilación longitudinal con toberas Saccardo es similar al longitudinal simple, con la particularidad de que solo posee dos ventiladores o toberas, denominadas Saccardo, que van colocadas de forma especial. Al igual que antes, el sistema consiste en ventilar el túnel haciendo circular el aire en un único sentido a lo largo de todo él. Pero en este caso, el aire se succiona del exterior por una tobera, situada encima de la boca del túnel, que está provista de un ventilador grande. Este aire succionado, se inyecta en el interior del túnel por la parte superior de este, a través de una rampa que forma con el túnel un ángulo de unos 15 a 20 grados. Cuando llega a la otra boca, el aire es expulsado al exterior a través de otra tobera exactamente igual. Esta forma de inyectar el aire en el interior del túnel, origina algo de succión (por efecto Venturi¹²) en la boca del túnel en la que se encuentra la tobera inyectora, con lo cual, el aire que penetra en el túnel entra en parte por la boca de este y en parte por la tobera Saccardo.

Lo mismo ocurre cuando el aire sale del túnel, es decir parte sale por la tobera y parte por la boca. Los ventiladores de las toberas son reversibles, lo que permite invertir el sentido del flujo de aire. Con este sistema de ventilación, la acumulación de humos a lo largo del trazado del túnel, se produce exactamente igual que con el sistema de ventilación simple.

El sistema de ventilación longitudinal con toberas Saccardo, se ha dejado de considerar en los túneles de nueva construcción, pues ha resultado ser muy sensible a las resistencias debidas al movimiento natural del aire en el interior de túnel (por diferencia de presión, viento exterior, etc.). (Navarra, 2003). Ver figura 2.6. Ventilación longitudinal con toberas Saccardo.

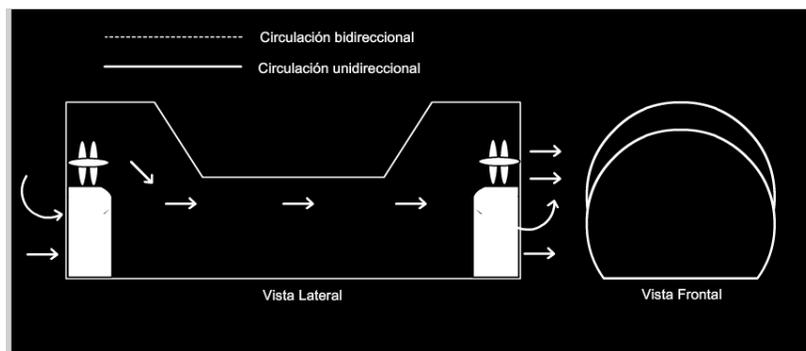


Figura 2.7 Ventilación longitudinal con toberas Saccardo.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

c) Ventilación longitudinal con pozo central de extracción.

La ventilación longitudinal con pozo central de extracción consiste, en una combinación de la ventilación longitudinal, con una extracción central a través de un pozo. El aire limpio entra por las dos bocas del túnel en sentido opuesto, convergiendo en el centro, de donde es extraído hacia arriba, a través de un pozo que existe en este punto central que comunica con la superficie, funcionando como si fuera una chimenea. Ver figura 2.7. Ventilación longitudinal con pozo central de extracción.

La ventilación longitudinal se consigue, con ventiladores axiales colocados en la clave del túnel y la extracción en el punto medio se consigue, con un gran ventilador-extractor colocado en el pozo central, que

¹² El efecto Venturi, consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor.

impulsa el aire viciado hacia la superficie. Este sistema, tiene la ventaja de que, en túneles muy largos y si la orografía lo permite, se pueden colocar varios pozos de extracción, sectorizando así el túnel en tramos de circulación longitudinal, quedando estos así independizados del resto del túnel a efectos de extracción de humos.

Con unos pozos bien dimensionados, si se produce un incendio, el humo y el calor sólo afectarán a un tramo o sector de túnel, quedando el resto sin problema alguno.

En caso de incendio, cabe la posibilidad de avería en el ventilador-extractor del pozo central, puesto que todos los gases de combustión pasan a través de aquel. Sin embargo, como los pozos suelen ser verticales, o muy verticales, aunque el ventilador-extractor se averíe, el humo siempre tenderá a salir por efecto convectivo, comportándose el pozo como si fuera una chimenea.

Por último, hay que considerar, respecto de los sistemas de ventilación longitudinal expuestos, que aunque con ellos se puede conseguir variar el sentido y la velocidad del flujo de la ventilación natural, no siempre es posible hacerlo, pues esto depende de la intensidad con que se haya establecido la circulación natural de aire. (Navarra, 2003).

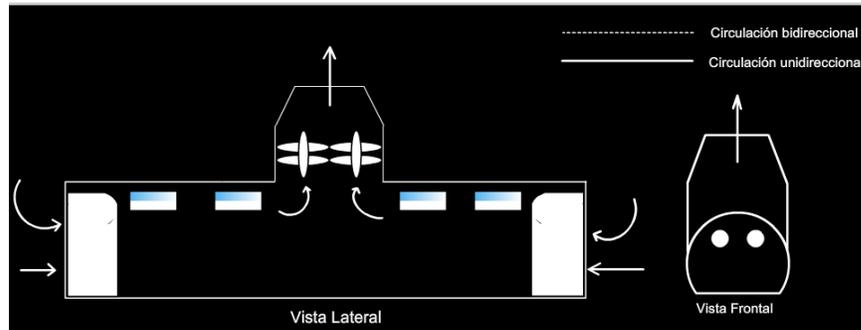


Figura 2.8. Ventilación longitudinal con pozo central de extracción.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

d) Ventilación semitransversal.

El Sistema de ventilación semitransversal, mete aire limpio en el túnel, mediante un colector separado de la cavidad del mismo, que abastece varios ramales secundarios. Estos, comunican a su vez, con unos puntos de inyección de aire situados en el interior del túnel. Los puntos de inyección, suelen ser rejillas colocadas cada cierta distancia a lo largo de todo el túnel. Ver figura 2.8. Ventilación semitransversal.

El aire viciado, sale expulsado al exterior a través de las bocas del túnel, a causa de la sobrepresión creada por la inyección del aire.

Este sistema, precisa de un potente ventilador que sea capaz de suministrar el caudal de aire limpio necesario, a través del colector que alimenta las rejillas de inyección.

Con este sistema, el humo o aire viciado transita a lo largo de todo el túnel, al igual que con los sistemas de ventilación longitudinales, pero tendrá una concentración menor que en aquellos, puesto que el humo es diluido por el aire limpio que suministran los puntos de inyección. (Navarra, 2003).

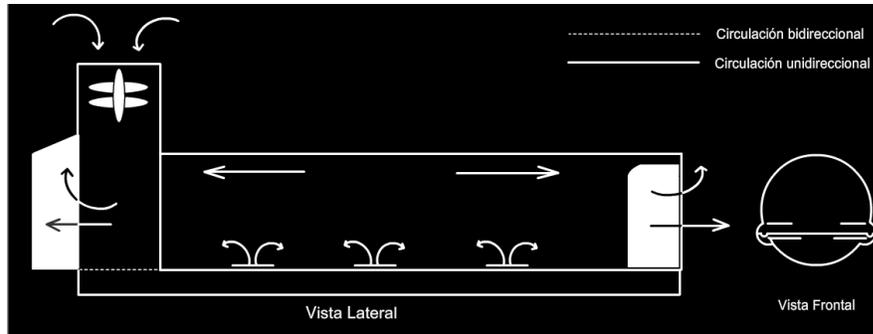


Figura 2.9. Ventilación semitransversal.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

e) Ventilación transversal.

La ventilación transversal crea un flujo transversal por la disposición uniforme de circuitos de ventilación para la inyección y/o extracción de humos. Estos sistemas son necesarios para túneles largos bidireccionales y son altamente recomendados para túneles unidireccionales que se congestionan frecuentemente.

La diferencia con el sistema de ventilación semitransversal está, en que el humo o aire viciado, es succionado a través de unos puntos o rejillas, que comunican con un colector de recogida de humos. Este colector de humos es el encargado de sacar el aire viciado al exterior. Tanto la inyección como la succión del aire, requieren de su correspondiente ventilador. Como es fácil deducir, en caso de incendio, el ventilador que succiona será el más vulnerable, puesto que todos los gases calientes generados por el incendio, pasarán a través de él, cabiendo por lo tanto la posibilidad de que se averíe. Esta posible avería, dejaría al túnel en ventilación semitransversal, ya que los humos saldrían por las bocas. (Navarra, 2003). Ver figura 2.9. Ventilación transversal.

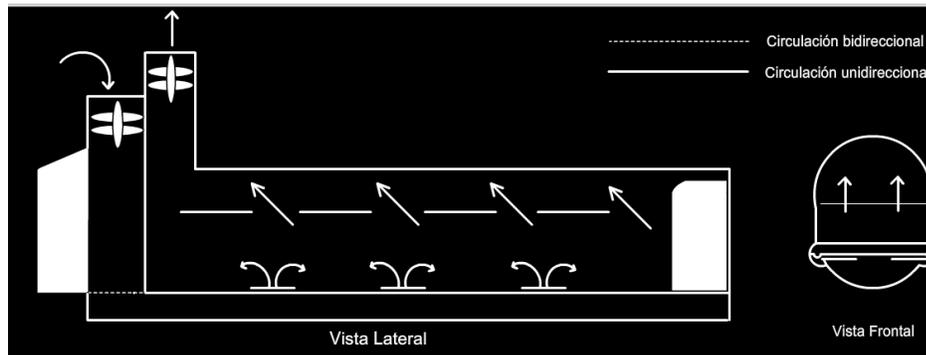


Figura 2.10. Ventilación transversal.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

f) Ventilación semitransversales-transversal.

La ventilación semitransversal-transversal es un sistema transversal en el que el caudal de succión del aire viciado es menor que el caudal del aire inyectado. Por lo tanto, funciona evacuando los humos a través de dos caminos: una parte de estos se recogen en el colector de succión y la parte restante se evacua por las bocas del túnel.

En la realidad, cuando se produce un incendio importante, los túneles equipados con un sistema de ventilación transversal, se comportan como si tuvieran un sistema semitransversal - transversal, debido a que no consiguen succionar todo el humo que se genera. Los puntos de inyección de aire limpio, de los sistemas semitransversales y transversales, suelen estar en los hastiales del túnel a nivel de la calzada, mientras que los puntos de succión del aire viciado, están en la clave del túnel. A veces, también se coloca en los colectores de ventilación, un falso tabique, dividido en dos, que se adosa en la clave, de manera que tanto la inyección como la succión se realizan por la parte superior del túnel. El mejor sistema, es el que inyecta aire desde el nivel de la calzada y succiona a nivel de la clave, porque el aire resultante en el interior del túnel es más limpio. (Navarra, 2003). Ver figura 2.10. Ventilación semitransversal – transversal.

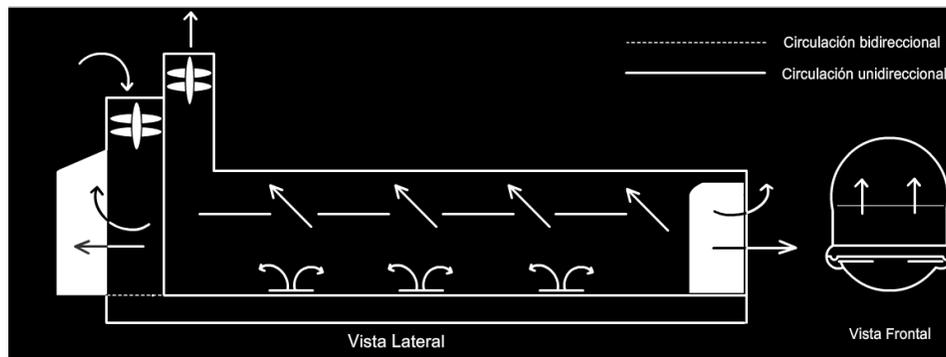


Figura 2.11. Ventilación semitransversal - transversal.
Fuente. (Navarra, 2003).
Elaboración propia.

2.1.6. Triangulo de fuego.

Cuando una sustancia arde lo que enciende no es la sustancia en sí, si no los vapores que se desprenden de dicha sustancia combinados con el comburente. Para que dicha reacción suceda, se deben cumplir dos requisitos:

1. Que combustible y comburente se combinen entre sí.
2. La presencia de energía (calor) suficiente para provocar el inicio de la reacción.

Combustible, oxígeno y calor comprenden lo que se denomina *teoría del triangulo del fuego*. El fuego puede ser representado entonces por un triangulo equilátero llamado **Triangulo del fuego**, y para que el incendio progrese, la energía desprendida en el proceso tiene que ser suficiente para que se produzca la reacción en cadena. Estos 4 factores forman los que denominan **Tetraedro del fuego**. (Triangulo y tetraedro de fuego). Ver figura 2.12. Tetraedro de fuego.

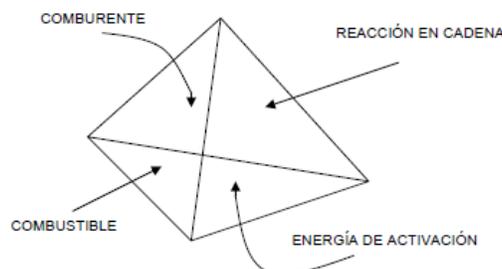


Figura 2.12. Tetraedro de fuego.
Fuente. (Triangulo y tetraedro de fuego).

2.1.7. Física de los incendios.

Los elementos necesarios para que exista “fuego” deben ser siempre tres: **combustible**, **comburente** y **calor**. Si uno de estos tres elementos no se encuentra presente no habrá fuego. Es uno de los criterios básicos utilizados para combatirlo, es eliminar uno de estos tres elementos. Para que esta reacción pueda producirse, es preciso que el combustible alcance una cierta temperatura por lo que es necesaria una cierta cantidad de calor exterior y oxígeno. (Luis, 1978).

En la práctica es suficiente con la actuación sobre estos tres elementos, pero debemos saber que en la combustión interviene un cuarto factor al que denominaremos **REACCIÓN EN CADENA** y que depende exclusivamente de las características del combustible. De acuerdo con lo anterior tenemos que la suma de *combustible*, *comburente*, *energía* y *reacción*, nos dará como resultado *fuego*. (Química del Fuego).

$$\text{COMBUSTIBLE} + \text{COMBURENTE} + \text{ENERGÍA} + \text{REACCIÓN} = \text{FUEGO}$$

2.1.7.1. Causas de incendio.

De forma general encontraremos siempre la energía calorífica de una u otra forma. Por lo cual, consideramos que los incendios son causados por la acción de una fuente de calor lo suficientemente poderosa como para iniciar una combustión. A continuación se mencionan algunas de las causas de incendio más comunes.

- Causas naturales. Efectos de lupa.
- Causas humanas. Imprudencias, ignorancia de los peligros, mala vigilancia.
- Corriente eléctrica. Instalaciones sobrecargadas, provisionales y viejas.
- Aparatos de calefacción. Llamas vivas.
- Gases de combustión inflamable. Gases mezclados con el aire, explotan cuando entran en contacto con un punto de ignición.
- Causas diversas. Sobrecalentamiento mecánicos (rodamientos mal lubricados), inflamaciones espontaneas (descargas, polvo de carbón) reacciones químicas mal controladas, etc.
- Fricción. Recalentamiento por roce.
- Electricidad estática. Generada por sistemas que impliquen frotamiento.
- Personas con problemas económicos o enajenados de la mente. Piromaniacos.

2.1.7.2. Etapas de un incendio en espacios abiertos.

A continuación en la figura 2.13. Etapas del fuego se pueden observar las 4 etapas de las cuales se compone un incendio: Etapa inicial, etapa humo, etapa llamas y etapa calor.

ETAPAS DEL FUEGO

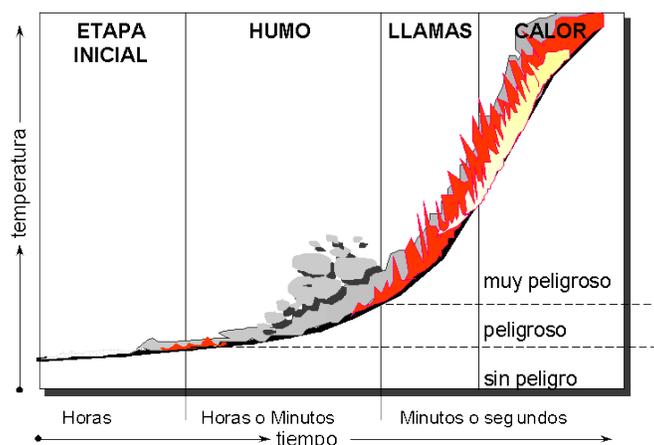


Figura 2.13. Etapas del fuego.

Fuente. (El incendio es una de las amenazas más peligrosas para los ocupantes)

Ahora se describen las 4 etapas de un incendio:

- **Etapa Inicial:** El principio del incendio no es visible por el ojo humano. Se produce el ascenso de partículas invisibles ionizadas y aerosoles. Esta fase de principio del incendio puede tener una duración de minutos o de horas dependiendo del combustible y el comburente. Esta fase no tiene peligro si se detecta y al estar en fase inicial se puede apagar fácilmente.
- **Humo visible:** La combustión produce partículas que ascienden con una gran rapidez. Esta fase del incendio puede durar horas o minutos sin que se produzcan llamas o calor apreciable. El incendio empieza a ser peligroso al no ser fácilmente detectable, es una fase en la que se debería atajar el incendio rápidamente.
- **Llamas:** El incendio ya es perfectamente visible y se convierte en peligroso para las personas este espacio de tiempo puede durar minutos o segundos dependiendo de la magnitud del mismo.
- **Calor:** El incendio ya se ha convertido en algo sumamente peligroso y el tiempo en pasar a esta fase es de escasos segundos al estar el incendio en su fase de máximo apogeo. (El incendio es una de las amenazas más peligrosas para los ocupantes)

2.1.7.3. Etapas de un incendio en espacios cerrados o confinados.

Un pequeño incendio puede convertirse en un gran desastre si coinciden circunstancias que favorecen su propagación. El desarrollo del fuego en lugares cerrados, se divide en diferentes etapas de acuerdo con la evolución de la temperatura del lugar, la figura 2.14. Grafica tiempo contra la temperatura del fuego, muestra la variación de la temperatura contra el tiempo, junto con las etapas de crecimiento.

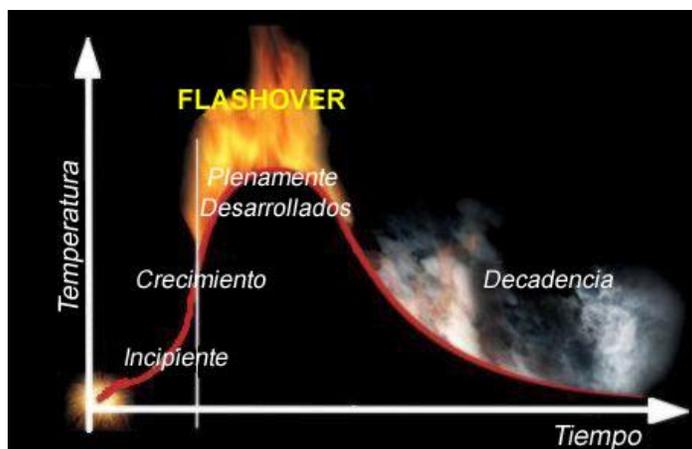


Figura 2.14. Gráfica tiempo contra la temperatura del fuego.
Fuente. (Isover, 2010)

Las fases del fuego pueden ser clasificadas de la siguiente manera:

- **Incipiente o Ignición:** La ignición se define como un proceso rápido que inicia una reacción exotérmica, la cual se desarrolla y hace que el material empiece a sufrir modificaciones, y con esto se produzca temperaturas muy superiores a las ambientales. Es conveniente distinguir entre los dos tipos de ignición, la ignición pilotada (partiendo de un flameo, chispa o fuente de otro piloto) o por combustión espontánea (debido a la acumulación de calor en el combustible). Una vez que la inflamación se produce, el combustible empieza a liberar gases volátiles que arden conforme se van mezclando con el aire.
- **Crecimiento:** El incendio alcanza grandes dimensiones y en esta fase el calor se transmite por todos los medios. Por convección se generan corrientes de humo, gases calientes, etc. Que van a buscar cualquier resquicio para continuar su camino. La radiación actúa con mucha importancia en esta fase, ya que cuando más calientes están los cuerpos más radiación se transmite.
- **Flashover:** Cuando se inicia un incendio, la temperatura se va incrementando paulatinamente, aumentando la cantidad de gases generados los cuales por efecto de la flotabilidad se elevan a la parte superior de la sección del túnel. Si el incendio se produjese al aire libre, el calor generado por el incendio se disiparía. Sin embargo, cuando el incendio se produce en recintos cerrados (como es el caso de un túnel), los gases acumulados en las proximidades del combustible, con una temperatura elevada, emiten energía por radiación la cual contribuye a gasificar el combustible existente incrementando la temperatura del foco. Este proceso de re-alimentación del incendio por radiación lleva a un incremento muy importante de la temperatura en las proximidades del foco denominado flashover. (Dirección General de Protección y Emergencias)

Tipos de flashover: El desarrollo de un flashover es controlado por las cantidades relativas de combustible y aire disponible. En la figura 2.15. Desarrollo de los flashover, se muestra un resumen de los diferentes tipos de flashover.

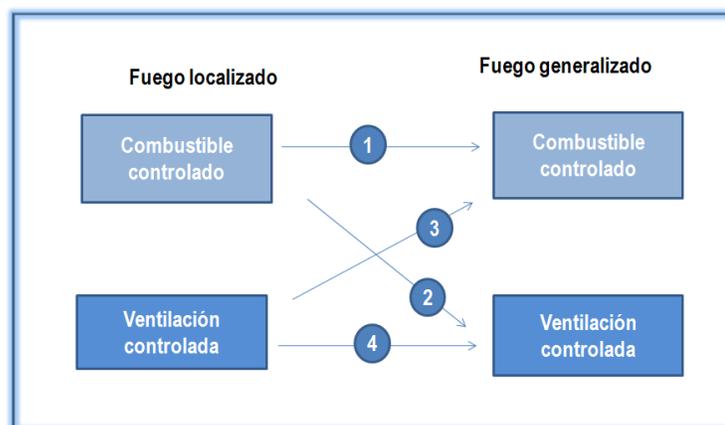


Figura 2.15. Desarrollo de los Flashover.
 Fuente. (Dirección General de Protección y Emergencias)
 Elaboración propia.

1. Combustible controlado a combustible controlado: Si la abertura de ventilación es grande en relación a la cantidad de combustible disponible.
 2. Combustible controlado a ventilación controlada: El flameo clásico donde hay combustible suficiente para conseguir una ventilación de fuego controlado con aberturas típicas.
 3. Ventilación controlada a combustible controlado: Retorno grande al final de la abertura de ventilación en relación a la cantidad de combustible disponible.
 4. Ventilación controlada a ventilación controlada: Retorno clásico en el que el estado final es la ventilación controlada no es lo suficientemente grande como para permitir el control de combustible.
- **Fuego plenamente desarrollado:** Después de que ocurre el flashover, las superficies expuestas estarán quemadas y el calor habrá llegado a su máximo produciendo altas temperaturas. El desarrollo del fuego está a menudo limitado por la disponibilidad de oxígeno (ventilación-controlada). En esta etapa las temperaturas son muy altas en un rango de 700-1200°C.
 - **Decadencia o Disminución:** La extinción de un incendio puede producirse de forma natural. Si todo el combustible se agota porque ya se ha quemado, el incendio se apaga solo porque ya no hay nada que pueda arder. Aunque cuando hablamos de extinción nos referimos a la extinción provocada por la acción del hombre. La convección tiene muchísima importancia en el desarrollo en vertical de los incendios, y suele ser la causante de la propagación del incendio en la mayoría de los casos. (Luis, 1978)

2.1.8. Definición de incendios en túneles.

Las características del incendio producido dentro de un túnel dependen en gran medida de los vehículos implicados en el mismo. Los materiales con los que han sido fabricados o que son transportados influyen de forma decisiva.

Sin embargo, para poder definir las características del incendio (especialmente importante en la fase de proyecto) es posible emplear diversas magnitudes que lo cuantifiquen de forma global (energía total disipada) o temporal (potencia calorífica, temperatura).

Aunque todas las magnitudes están relacionadas, la evolución de la temperatura frente al tiempo se emplea para evaluar la resistencia de la estructura ante el incendio y la evolución de la potencia o las concentraciones de contaminantes influyen en las pautas de evacuación o actuación para salvaguardar a los usuarios del túnel.

- **Potencia:** Los fuegos de proyecto se caracterizan fundamentalmente por la potencia calorífica liberada (dada habitualmente en MW). Hasta hace poco, en la mayoría de los países se tomaba como referencia las recomendaciones dadas por PIARC en 1987 basadas en los estudios de Heselden que se apoyaban en los ensayos realizados en Ofeneg (Suiza, 1965) y Zwenberg (Austria, 1974). Sin embargo, a principios de la década de los noventa se relanzaron nuevos proyectos cuyo fin era precisamente la determinación de curvas de incendio para el proyecto de túneles de carretera y ferroviarios. Así, en Europa se realizaron una serie de ensayos agrupados en el proyecto EUREKA 499, con gran repercusión internacional. Los valores máximos de la potencia calorífica disipada por el foco de incendio dependen de las condiciones de ventilación existentes.
- **Emisión de humo:** Otro parámetro empleado para el dimensionamiento de la ventilación es el caudal de humos (m^3/s) producido durante el mismo.
- **Temperatura:** Al igual que ocurría con la potencia calorífica máxima producida en el foco del incendio, la temperatura máxima que se puede obtener depende en gran medida de las condiciones de ventilación y la geometría del túnel.
- **Evolución temporal del incendio:** La evolución del incendio a lo largo del tiempo es más importante que los niveles máximos que pueden darse en el foco ya que, como ya se comentó, los tiempos transcurridos desde el inicio del mismo determinan la posibilidad de salvamento de los usuarios involucrados en el incidente.
- **El flashover:** Cuando se inicia un incendio, la temperatura se va incrementando paulatinamente, aumentando la cantidad de gases generados los cuales por efecto de la flotabilidad se elevan a la parte superior de la sección del túnel. Si el incendio se produjese al aire libre, el calor generado por el incendio se disiparía. Sin embargo, cuando el incendio se produce en recintos cerrados (como es el caso de un túnel), los gases acumulados en las proximidades del combustible, con una temperatura elevada, emiten energía por radiación la cual contribuye a gasificar el combustible existente incrementando la temperatura del foco. Este proceso de re-alimentación del incendio por radiación lleva a un incremento muy importante de la temperatura en las proximidades del foco denominado flash-over. (Dirección General de Protección y Emergencias)

2.1.9. Transferencia de calor.

Existen tres formas de transferencia de calor, llamadas: **conducción, convección y radiación**. Cada una de estas formas puede estudiarse separadamente, aunque la mayoría de las aplicaciones en ingeniería son combinaciones de las tres formas. No obstante, un estudio profundo de los mecanismos asociados a cada una de las formas mencionadas anteriormente permite extender fácilmente el análisis al problema combinado. A continuación se describen las tres formas de transferencia de calor.

1. **Conducción:** Es la transferencia de calor a través de un material estacionario, tal como un sólido o un fluido en reposo o régimen laminar. Este tipo de transmisión no involucra un movimiento relativo de las partículas del cuerpo y por tanto se le define como difusión de energía debido a un movimiento molecular aleatorio. Hay sólidos que son buenos conductores del calor, como los metales, y otros que conducen con dificultad el calor, como la madera o el corcho. El calor también

puede ser conducido a través de líquidos y gases. La conducción se verifica mediante la transferencia de energía de movimiento entre moléculas adyacentes.

En un gas, donde las moléculas “más calientes” tienen más energía y movimientos, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están en niveles energéticos más bajos. Este tipo de transferencia siempre está presente, en mayor o menor grado, en sólidos líquidos y gases en los que exista un gradiente de temperaturas. En la conducción, la energía también puede transferirse por medio de electrones “libres” que es un proceso muy importante en los sólidos metálicos, un ejemplo es como cuando se deja algún alimento caliente sobre una tabla para que se enfríe, ver figura 2.16. Ejemplo de transferencia de calor por conducción.

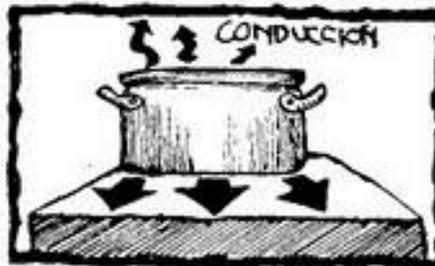


Figura 2.16. Ejemplo de transferencia de calor por conducción.
Fuente. (Grupo Juvenil Jóvenes por Quilpué , 2009).

2. **Convección:** Es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de la mezcla. Físicamente puede entenderse como una difusión de energía debida a un movimiento molecular aleatorio más una transferencia de energía debida a un movimiento en todo el volumen, un ejemplo de esto es como cuando se sopla una cuchara de sopa, ver figura 2.17. Ejemplo de transferencia de calor por convección. La convección se clasifica a su vez es forzada o natural, según que la mezcla se realice o no por medios mecánicos (bombas, ventiladores, etc.).



Figura 2.17. Ejemplo de transferencia de calor por convección.
Fuente. (Grupo Juvenil Jóvenes por Quilpué , 2009).

3. **Radiación:** Es la transferencia de calor debida a la energía emitida por todos los cuerpos en forma de onda electromagnética, viajando a la velocidad de la luz y propagándose en el vacío. Los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que está siendo transferida a través de ellos, por lo que radiación adquiere su principal importancia en la transferencia a través del espacio o de gases. El calor del sol llega a la tierra después de un largo viaje a través del espacio vacío. El calor del sol no se propaga ni por conducción, ni por convección. Esta forma de propagación de la energía calorífica

que no precisa soporte material se denomina radiación. Este tipo de propagación del calor también se da en lámparas eléctricas, un ejemplo es lo que hacen las estufas al calentar un cuerpo lejano, ver figura 2.18. Ejemplo de transferencia de calor por radiación. (Frank P, 1985).



Figura 2.18. Ejemplo de transferencia de calor por radiación.
Fuente. (Grupo Juvenil Jóvenes por Quilpué, 2009).

2.1.10. Movimiento del humo en túneles.

El comportamiento de los humos en un túnel es muy importante a la hora de la evacuación y de las actuaciones de extinción del incendio. Normalmente, en ausencia de un sistema de ventilación en el túnel, la capa de humo se estratifica de forma simétrica a ambos lados del foco del incendio y cuando no existía inclinación en el túnel, en cuyo caso, los humos tenderán a subir por la pendiente. Este fenómeno puede ser perjudicial a la hora de intentar acceder al foco del incendio para poder extinguirle. Cuando tenemos una corriente de aire que va en una dirección, los humos tenderán en primera aproximación a seguir esta corriente de aire, este seguimiento se realizara en mayor o menor medida según la magnitud de la velocidad de esta corriente de aire. En el caso de que humos de la capa caliente retrocedan oponiéndose a esta velocidad del aire diremos que se está produciendo el *backlayering*.

En los incendios producidos en los túneles, la velocidad crítica, V_c , se define como la velocidad longitudinal mínima necesaria para prevenir el *backlayering*. En la figura 2.19. Backlayering en un incendio en un túnel, se observan los principales fenómenos de la dinámica del incendio en túneles.

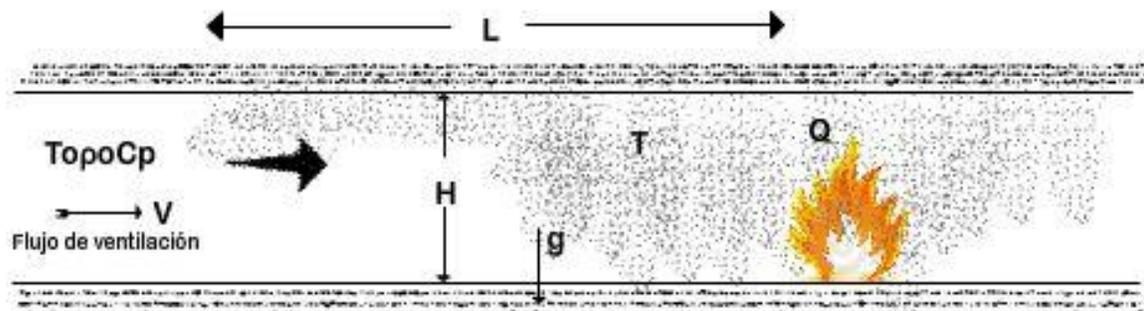


Figura 2.19. Backlayering de un incendio en un túnel.
Fuente. (Adaptado de Beard, et al. 2003)

2.1.11. Visibilidad y humo

El humo generado en un incendio se compone normalmente de productos gaseosos y sólidos que son el resultado del proceso de combustión. El principal gas tóxico que se produce en los incendios es el CO. Normalmente, una persona cuando se expone a dichos gases, puede sufrir pérdida del conocimiento, de visibilidad, discapacidad, irritación ocular y del tracto respiratorio superior. Mientras más tiempo se exponga al humo puede perder la vida, de hecho una persona expuesta a una concentración de 3000ppm es probable que resulte en la muerte dentro de una media hora.

La *visibilidad* es un factor muy importante cuando se consideran el análisis de riesgos en túneles, ya que conociendo la visibilidad en un escenario particular puede permitir una mejor planeación, por ejemplo, de una evacuación en caso de un incendio en un túnel. En el Capítulo 4 se dan más detalles al respecto.

2.1.12. Velocidad crítica.

Ante un incendio dentro de un túnel de dirección única, frecuentemente existe un sistema de ventilación longitudinal. Este sistema entra en acción para crear una zona segura sin humos aguas arriba del fuego para posibilitar la evacuación y la lucha contra las llamas. Si la velocidad de ventilación es baja, el humo producido desde el fuego puede extenderse en la dirección aguas arriba contra el sentido de la ventilación. La velocidad crítica es la velocidad mínima requerida en el sistema de ventilación para eliminar el retroceso del humo y forzarle a moverse aguas abajo. Este valor se ha convertido en uno de los primeros criterios en los diseños de los sistemas de ventilación de túneles. Los métodos actuales para su determinación se centran principalmente en dos aspectos del problema: influencia de la potencia del incendio y efecto de la geometría del túnel.

Las técnicas actuales para predecir la velocidad crítica están basadas en situaciones con semejanza parcial y datos experimentales, complementados con cálculos numéricos. A continuación se presentan los modelos que han sido usados en este proyecto de tesis.

2.1.12.1. Modelos basados en la conservación del número de Froude.

El número de Froude es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido, en este caso (viento). El número de Froude se define COMO (Karlsson & Quintiere, 2000):

$$Fr = \frac{V^2}{gD} = \frac{\text{Fuerzas de Inercia}}{\text{Fuerzas gravitatorias}} \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde g es la gravedad y V y D son valores característicos de velocidad y longitud respectivamente del incendio. Este modelo se usa frecuentemente en situaciones donde el número de Reynolds es suficientemente grande para que prevalezcan condiciones turbulentas y las fuerzas de flotabilidad sean dominantes. A menudo se combina con el cociente de densidades del humo y ambiente ($\Delta\rho/\rho$) para incluir los efectos de estratificación. Entonces el número de Froude se transforma en el de Richardson o de Froude modificado:

$$Ri = \frac{gD}{V^2} * \frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{Fr} * \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad \text{Ecuación 2.2.}$$

De la ecuación de conservación global de la energía, usando la ecuación de estado, despreciando la variación de presiones frente a la presión misma, y considerando la conservación del número de Richardson, la velocidad quedaría de la forma siguiente:

$$Constante = \frac{|\Delta\rho|}{\rho} \approx \frac{|\Delta T|}{T} \approx \frac{Q}{\rho C_p D^2 V T} \rightarrow V = Constante \left(\frac{gD}{\rho C_p D T} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 2.3.}$$

Los modelos más comúnmente empleados con esta teoría son los propuestos por Heselden, 1976, y Danzinger, 1982. El primero de ellos predice una velocidad crítica, U_c :

$$U_c = 0.8 \left(\frac{gQT}{C_p \rho_o T_o^2 W} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 2.4.}$$

Donde Q es la potencia del incendio, ρ_o y T_o la densidad y temperatura del ambiente, T la temperatura de la capa de humos, C_p es el calor específico a presión constante y W la anchura del túnel. El 0.8 es una constante obtenida de un conjunto limitado de experimentos llevados a cabo en un túnel de ferrocarril en desuso.

El modelo de Danzinger, incorporado en el Environment Simulation Program del US Department of Transport Subway, predice una velocidad crítica de:

$$U_c = K g k \left(\frac{gQ}{C_p \rho_o T A F_{rc}} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

Donde:

$$T = \left(\frac{Q}{C_p \rho_o A U_c} \right) + T_o \quad \text{Ecuación 2.6.}$$

Siendo A el área de la sección transversal del túnel, H la altura del mismo y K_g un factor corrector dependiente de la pendiente del túnel. El valor de k lo fija en 0.61, calculo basado en un número de Froude igual a 4.5.

Se comprueba cómo estos modelos sugieren que la velocidad crítica para túneles horizontales varía con el tercio de la potencia liberada por el incendio. Recientes estudios, como los de Bettis, 1993 y 1994, sugieren que existen dos regímenes de variación de la velocidad crítica en relación con el calor liberado por el incendio. A bajas potencias la velocidad crítica efectivamente varía con el ritmo de liberación de calor elevado a un tercio como predicen los modelos basados en el número de Froude. Sin embargo al aumentar la potencia, la velocidad crítica se hace independiente de ella. La más completa serie de experimentos a gran escala llevada a cabo hasta el momento, el *Memorial Tunnel Ventilation Test Programme*, muestran que la teoría basada en conservar el número de Froude da lugar a un sobrevaloramiento de la velocidad de ventilación crítica en el rango de los 50-100 MW aproximadamente en un 5-15%. También se desprende de esos ensayos que existe una velocidad supercrítica para grandes tamaños de incendios. Por tanto los modelos basados en la conservación del número de Froude no son válidos para elevados ritmos de liberación de calor.

Otra limitación de esta teoría es que se basa esencialmente en conceptos unidimensionales en los que las fuerzas de flotabilidad son función principalmente de la altura del túnel y por tanto es esta longitud la que se usa como parámetro característico. Aunque algunos de los modelos han tenido en cuenta la anchura del túnel, los efectos de la geometría de la sección transversal no han sido incorporados plenamente a estos modelos.

El efecto de la pendiente del túnel sobre el movimiento de los humos ha sido estudiado por Atkinson, 1996, recomendando unos factores de correlación de la velocidad crítica con dicha pendiente y la potencia liberada. Sin embargo este modelo se basa únicamente en una geometría de túnel y la altura del mismo es la empleada en las correlaciones como longitud característica en el análisis dimensional. Por tanto el efecto de la geometría del túnel permanece incierto y el modelo debe ser reexaminado antes de poder emplearlo en otras geometrías.

2.1.12.2. Modelos basados en el análisis adimensional.

Modelos más recientes para calcular la velocidad crítica se basan en resultados experimentales a pequeña escala. Oka, 1995 (Karlsson & Quintiere, 2000), predice su valor mediante:

$$V^* = \begin{cases} K_v \left(\frac{Q^*}{0.12} \right)^{1/3} & \text{para } Q^* \leq 0.12 \\ K_v & \text{para } Q^* > 0.12 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.7.}$$

Donde Q^* y V^* son respectivamente la potencia y velocidad crítica adimensionales definidas mediante:

$$Q^* = \left(\frac{Q}{\rho \sigma T_o C_p \sqrt{gH^5}} \right) \quad \text{Ecuación 2.8.}$$

$$V^* = \left(\frac{U_c}{\sqrt{gH}} \right) \quad \text{Ecuación 2.9.}$$

El valor de K_v varía entre 0.22 y 0.38 dependiendo del quemador usado en los modelos. Aquí se aprecia la independencia de la velocidad crítica a partir de un cierto valor de potencia de incendio.

A continuación se presenta un modelo propuesto por Kunsch (Kunsch, 2002; Beard et al. 2003). Las figuras 2.20 y 2.21 ilustran a detalle las consideraciones físicas de la obtención del modelo.

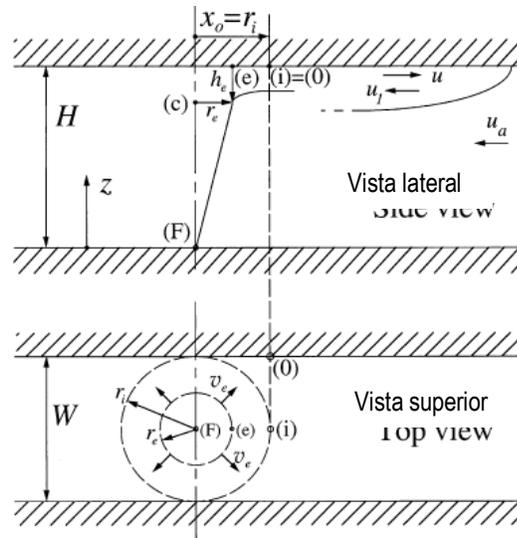


Figura 2.20. Vista (lateral y superior) de un incendio en túnel.
Fuente: (Kunsch, 2002).

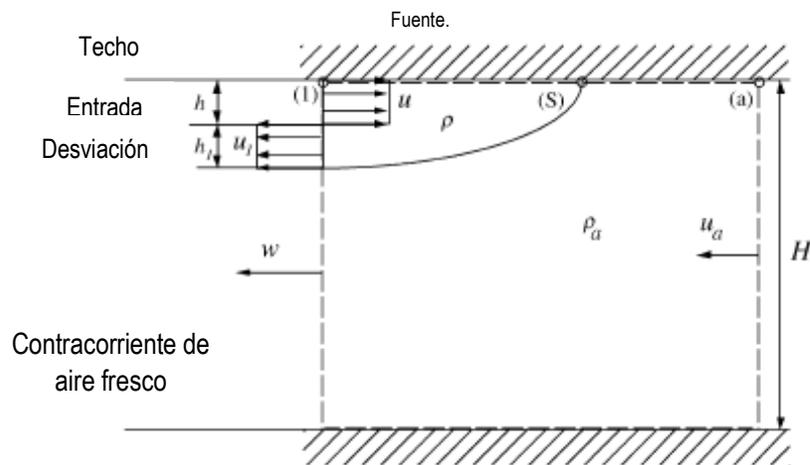


Figura 2.21. Región frontal de la capa de fuego.
Fuente: (Kunsch, 2002).

Las ecuaciones correspondientes para el control de volumen en la figura 2.20 están relacionados con la conservación de:

$$\text{masa (gas del fuego): } u_1 h_1 = u h \quad \text{Ecuación 2.10.}$$

$$\text{masa (aire fresco): } u_a H = w(H - h - h_1) \quad \text{Ecuación 2.11.}$$

$$\text{impulso global: } -p u^2 h - p u_1^2 h_1 - p_a w^2 (H - h - h_1) + p_a u_a^2 H = k_1 - k_a \quad \text{Ecuación 2.12.}$$

En este caso de $(k_1 - k_a)$ es la diferencia de las fuerzas de presión que actúa sobre la izquierda y en el lado derecho del volumen de control. Cuando la ecuación de Bernoulli se aplica a la corriente a ambos lados del punto S (ver figura 2.20), obtenemos:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho u^2 = p_a + \frac{1}{2} \rho_a u_a^2 = p_3 \quad \text{Ecuación 2.12'}$$

$$k_1 - k_2 = \left(\frac{1}{2} \rho_a u_a^2 - \frac{1}{2} \rho u^2 \right) H - \frac{1}{2} (\rho_a - \rho) g (h + h_1) (2H - h - h_1) \quad \text{Ecuación 2.12''}$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.10 y 2.11 en la ecuación 2.12. obtenemos:

$$u_a^2 = \frac{1 - 2\vartheta\varphi_1}{1 + 2\vartheta\varphi_1} \left[\left(1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) g h 4\varphi_1 (1 - \vartheta\varphi_1) + \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right) u^2 (1 - \vartheta\varphi_2) \right] \quad \text{Ecuación 2.13.}$$

Con:

$$\varphi_1 = \frac{1 + h_1/h}{2} \quad \varphi_2 = \frac{\varphi_1}{h_1/h} \quad \text{Ecuación 2.14.}$$

$$\varphi = h/H$$

A fin de mantener el modelo tan simple como sea posible, se supone que no existe ningún corte entre la capa que desvía el flujo de gas con la velocidad u_1 y el aire fresco con la velocidad w , lo que equivale a un abandono de la mezcla entre los gases de incendio y el aire fresco.

Cuando el corte se descuida $w = u_1$ y la relación de las alturas de las capas de incendios por gas que entran y salen del volumen de control, se puede estimar que:

$$\frac{h_1}{h} = \frac{(1 - \vartheta)u/u_a}{1 + \vartheta u/u_a} \quad \text{Ecuación 2.15.}$$

Se puede demostrar numéricamente que los valores de φ_1 y φ_2 están cerca de la unidad, con un error inferior al 10% para todos los casos de interés. En este caso la ecuación. 2.12 se puede simplificar para obtener:

$$\left(\frac{u_a}{u} \right)^2 = \frac{1 - 2\vartheta}{1 + 2\vartheta} \left[\left(1 - \frac{\rho}{\rho_a} \right) \frac{1}{F^2} 4(1 - \vartheta) + \left(\frac{\rho}{\rho_a} \right) (1 - 4\vartheta) \right] \quad \text{Ecuación 2.16.}$$

Con el número de Froude $F = u/\sqrt{gh}$ de la capa de gas entrante.

De acuerdo a las:

$$u_a = 0.613 \left(g \frac{\Delta p_{Max}}{\rho_a} H \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

$$h_o = 0,02 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{H}{W}\right) \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$H = 0,0493 \left(\frac{H}{W}\right) H \quad \text{Ecuación 2.19}$$

$$F_0^2 = \frac{u_0^2}{gh_o} = 7,62 \frac{\Delta p_{Max}}{p_a} \left(\frac{H}{W}\right) \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$g'_o = 0,574g \frac{\Delta p_{Max}}{p_a} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

en relación al punto (0), se sustituyen en la ecuación 2.16. para obtener:

$$U_c^2 = C_3^2 \left(C_1 - C_2 \frac{\Delta p_{Max}}{\rho_a} \right) \frac{\Delta p_{Max}}{\rho_a} gH \quad \text{Ecuación 2.22.}$$

Donde:

$$C_1 = \frac{\left[1 - 0,1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]}{\left[1 + 0,1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]} \left(1 + 0,10 \left(\frac{H}{W}\right) - 0,015 \left(\frac{H}{W}\right)^2\right) \cong 1 - 0,10 \left(\frac{H}{W}\right) \quad \text{Ecuación 2.23.}$$

$$C_2 = \frac{\left[1 - 0,1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]}{\left[1 + 0,1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]} 0,574 \left(1 - 0,20 \left(\frac{H}{W}\right)\right) \quad \text{Ecuación 2.24.}$$

$$C_3 = 0,613$$

Cuando la ley de los gases ideales se aplica, la disminución de la densidad puede estar relacionado con el aumento de la temperatura por medio de:

$$\frac{\Delta p_{Max}}{\rho_a} = \frac{x}{1+x}; \text{ con } x = \frac{\Delta T_{Max}}{T_a} \quad \text{Ecuación 2.25.}$$

De la ecuación 2.22. se obtiene:

$$U_c^2 = C_3^2 C_1 \frac{1 + \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right)x}{(1+x)^2} xgH \quad \text{Ecuación 2.26.}$$

Cuando el aumento de la temperatura máxima del humo se expresa como una función de la tasa de liberación de calor por medio de:

$$\frac{\Delta T_{Max}}{T_a} = \frac{T_{Max} - T_a}{T_a} = \Delta T_0^* Q_0^{*2/3} \quad \text{Ecuación 2.27.}$$

La ecuación 2.26. se convierte finalmente en:

$$u_c^* = C_3 \sqrt{C_1 \Delta T_\infty^*} * \frac{\sqrt{1 + \left[1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)\right] \Delta T_\infty^* (Q^*)^{\frac{2}{3}}}}{1 + \Delta T_\infty^* (Q^*)^{\frac{2}{3}}} * (Q^*)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 2.28.}$$

Donde ΔT_∞^* y potencia calorífica Q^* se definen en la ecuación 2.27. y la velocidad U_c^* dimensión viene dada por:

$$u_c^* = U_c / \sqrt{gH} \quad \text{Ecuación 2.29.}$$

El modelo de Roh (Karlsson & Quintiere, 2000; Beard, et al, 2003) está definido por la ecuación 2.15.

$$U_c = \frac{-0.000845 + 8.1661Q}{1 + 2.094Q - 0.021Q^2} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

Donde Q es la potencia del incendio dada en Megawatts.

En el Capítulo 4 se presentan los detalles de análisis de la velocidad crítica basado en los modelos descritos anteriormente.

2.2. Marco Metodológico.

Este trabajo de tesis se basa en un sistema duro, el cual se identifica como aquel sistema en donde interactúan hombres y máquinas. Los sistemas duros se concentran en escoger el mejor medio, para reducir la diferencia entre un estado que se desea alcanzar y el estado actual de la situación.

Esta diferencia define la necesidad de satisfacer el objetivo, eliminadola o reduciéndola. Los sistemas duros tiene la tarea de concebir, diseñar, evaluar e implementar un sistema que satisfaga alguna necesidad definida.

En el siguiente trabajo de tesis sobre el análisis de riesgo de incendios en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, se aplicara la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, dicha metodología es utilizada en el análisis de sistemas complejos para tener un mejor entendimiento.

Las fases del método de C. W. Churchman y R.I. Ackoff son: Formulación del problema, Construcción de un modelo, Obtención de una solución, Prueba del modelo y la solución y por último la implantación y control de la solución. (General Systems Theory, 1968). Ver figura 2.20. Representación gráfica de la Metodología de C.W. Churchman y R.I. Acroff.

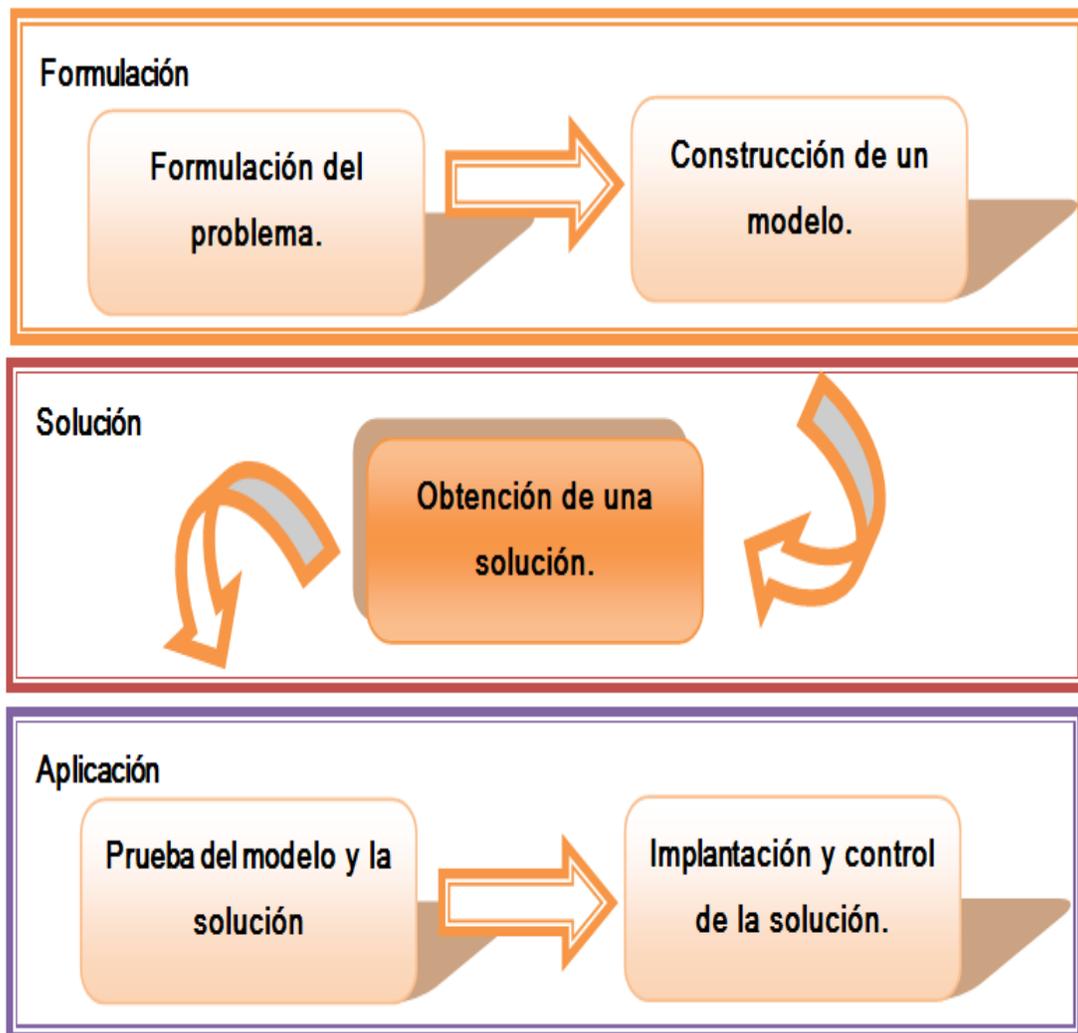


Figura 2.22. Representación gráfica de la Metodología de C.W. Churchman y R. I. Acroff.
Elaboración propia.

A continuación se describirán las 4 fases que componen la metodología antes mencionada, Metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff.

2.2.1. Fase 1. Formulación del problema.

La primera fase de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, es la formulación del problema. Esto incluye determinar los objetivos apropiados, las restricciones sobre lo que se puede hacer, las interrelaciones del área bajo estudio con otras áreas del sistema, las diferentes acciones posibles, los límites de tiempo para tomar una decisión, etc. Ver figura 2.21. Formulación del problema.

Este proceso de definir el problema es crucial ya que afectara en forma significativa la relevancia de las conclusiones del estudio.

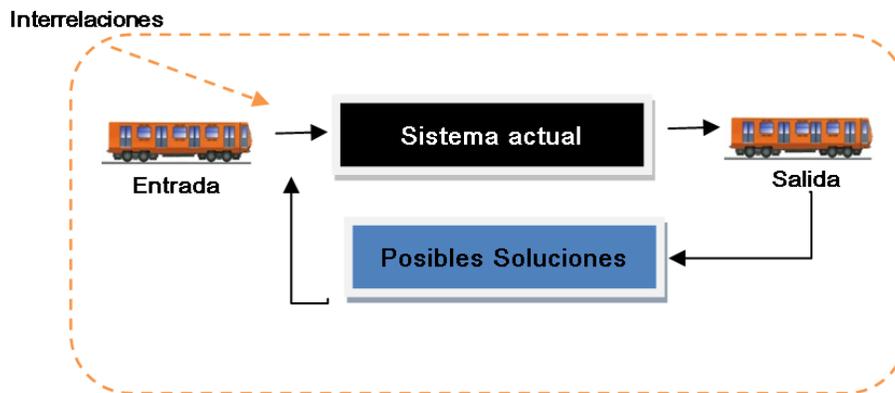


Figura 2.23. Formulación del problema.
Elaboración propia.

2.2.2. Fase 2. Construcción del modelo.

La segunda fase de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, es la creación de un modelo. Un modelo siempre debe ser menos complejo que el problema real, es una representación abstracta de la realidad con consideraciones y simplificaciones que hacen más manejables el problema y permiten evaluar efectivamente las alternativas de solución. Ver figura 2.22. Construcción de un modelo.

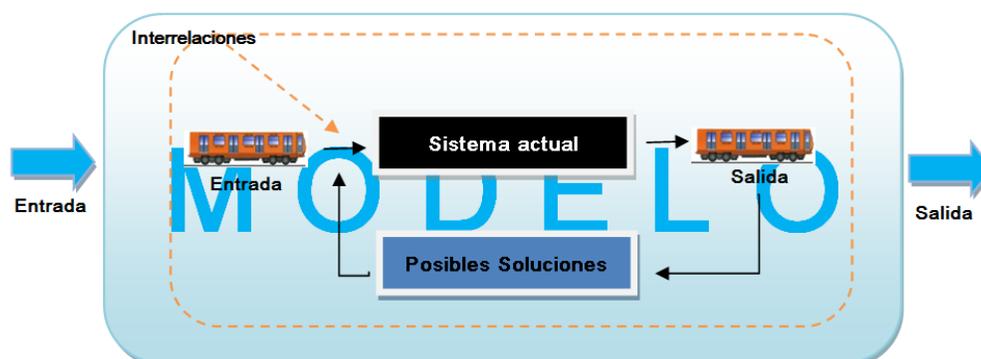


Figura 2.24. Construcción de un modelo.
Elaboración propia.

2.2.3. Fase 3. Obtención de una solución y prueba del modelo.

La tercera fase de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, es la obtención de una solución. Resolver un modelo consiste en encontrar los valores de las variables dependientes, asociadas a los componentes controlables del sistema con el propósito de optimizar, si es posible, o cuando menos mejorar la eficiencia o la efectividad del sistema dentro del marco de referencia que fijan los objetivos y las restricciones del problema. Ver figura 2.23. Obtención de una solución.

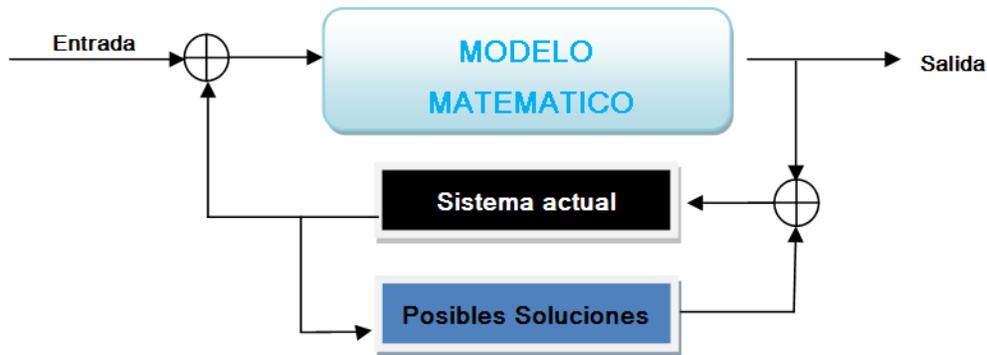


Figura 2.25. Obtención de una solución.
Elaboración propia.

2.2.4. Fase 4. Implantación y control de la solución.

La cuarta fase de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, es establecer el control e implantación de la solución. El establecer controles de la solución consiste en determinar los rangos de variación de los parámetros dentro de los cuales no cambia la solución del problema. Ver figura 2.24. Implantación y control de la solución.

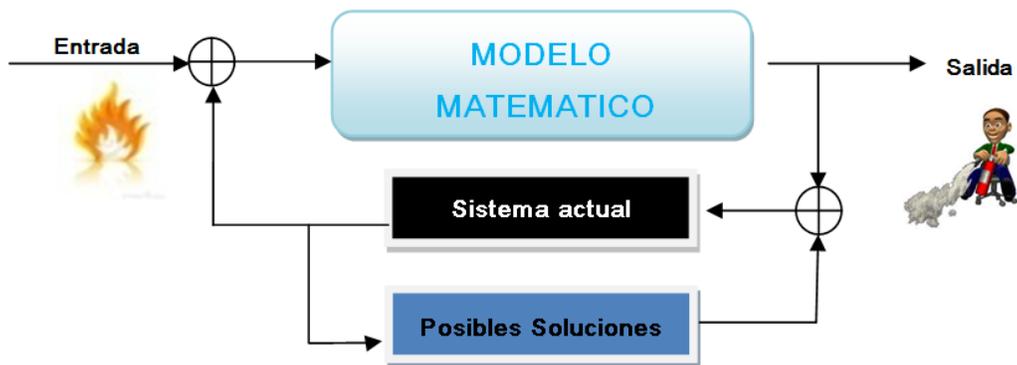


Figura 2.26. Implantación y control de la solución.
Elaboración propia.

Capítulo III. Descripción del caso de estudio.

No esperes que lleguen las circunstancias ideales ni la mejor ocasión para actuar,
porque tal vez no lleguen nunca.
(Anónimo).

Capítulo III.

Descripción del caso de estudio.

3.1. Contexto Temporal del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México.

Las grandes ciudades se caracterizan por conflictos viales debidos a la elevada demanda de transporte e intensa actividad económica.

El Distrito Federal inició el siglo XX con aproximadamente 540 mil habitantes y 800 vehículos para satisfacer su demanda de transporte. Para 1953 la población se había incrementado a 3,5 millones y en 1960 la cifra superaba los 4,5 millones.

Para 1964 había una fuerte tendencia hacia los 5 millones de habitantes en contraste con las 7200 unidades de transporte público que circulaban por la capital (casi un 40% de los viajes totales se hacían en el centro de la ciudad). (Noreña Casado, 1985).

Existen antecedentes poco documentados sobre las propuestas de trenes metropolitanos en la ciudad de México, se dice estudiantes de la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1958, presentaron el proyecto de un monorraíl¹³ para la ciudad de México como tema de tesis; en 1960 Vicente S. Pedrero y Ramón C. Aguado presentaron al Departamento del Distrito Federal estudios de factibilidad para la construcción de un monorraíl; y en 1965 José María Fernández desarrolló un proyecto para la construcción de un sistema de transporte elevado y subterráneo. (Evolución de la transportación en la Ciudad de México, 1989).

El ingeniero Bernardo Quintana Arrijoa, fundador de la empresa mexicana Ingenieros Civiles y Asociados, S.A. de C.V., hoy Empresas ICA¹⁴, S.A. de C.V, elaboró estudios que permitieron la creación de un anteproyecto, y posteriormente un proyecto, para la construcción de un sistema de transporte masivo en la ciudad de México.

La propuesta del proyecto se presentó en 1958 a Ernesto P. Uruchurtu, Regente de la ciudad de México de 1952 a 1966, quien la rechazó al considerarla económicamente costosa. Además, el 28 de julio de 1957, un sismo de 7 grados en la escala *Richter* dañó diversos edificios del centro de la ciudad, hecho que provocó la desconfianza entre las autoridades para construir proyectos de grandes dimensiones como el presentado por Quintana. (Educativa, 2007).

Quintana presentó nuevamente su proyecto de transporte en el sexenio de Gustavo Díaz Ordaz, Presidente de México. De nueva cuenta el obstáculo resultó el costo elevado de la obra. Gustavo Díaz Ordaz decidió aprovechar el acercamiento del presidente francés Charles de Gaulle hacia Latinoamérica. Alex Berger, empresario francés, entonces esposo de la actriz María Félix, amigo de Quintana, fungió como

¹³ Sistemas de transporte en los que las sillas o vagones están suspendidos o se desplazan sobre una estructura de un solo raíl para transportar mercancías o personas.

¹⁴ ICA es la empresa de ingeniería, procuración y construcción más grande de México, con actividades en la operación de infraestructura y el desarrollo de vivienda. Las principales líneas de negocio de ICA son construcciones civiles, construcción industrial, infraestructura y vivienda, con clientes tanto en el sector público como en el sector privado.

mediador entre los gobiernos francés y mexicano para la obtención del crédito. Como resultado de la negociación el gobierno mexicano cubrió el costo de la obra civil, estudios de geotecnia, diseño de estaciones, entre otros, y el gobierno francés la obra electromecánica.

La obra tuvo un costo total de \$2,530 millones, de los cuales, \$1,630 millones provinieron del crédito francés y \$ 900 millones por parte del Departamento del Distrito Federal.

El 29 de abril de 1967 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el decreto presidencial que crea el Sistema de Transporte Colectivo Metro, organismo público descentralizado, para construir, operar y explotar un tren rápido subterráneo como parte del transporte público del Distrito Federal. (El metro y las finanzas, 1989).

En el cruce de Av. Chapultepec con la calle Bucareli, el 19 de junio de 1967, se realizó la ceremonia de inicio de obra para construir la línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo Metro. (Evolución de la transportación en la Ciudad de México, 1989).

El 4 de septiembre de 1969 Gustavo Díaz Ordaz y Alfonso Corona del Rosal, Regente del Distrito Federal de 1966 a 1970, inauguraron formalmente el servicio entre las estaciones Chapultepec y Zaragoza.

Un tren construido por la compañía francesa *Alstom*, modelo *MP-68*, decorado con franjas tricolores y el escudo nacional mexicano a sus costados, realizó el recorrido inaugural entre las estaciones Insurgentes y Zaragoza. (Sistema de Transporte de la Ciudad de México, 2008).

3.1.1. Etapas de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

La construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro se dividió en etapas. Cada etapa está constituida por la construcción de nuevas líneas, ampliaciones e inauguraciones. Hasta el año 2000 se tienen cuantificadas 6 etapas constructivas.

A continuación se presentan las 6 etapas que componen la construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

- **1era etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

La construcción de la primera etapa del Metro de la Ciudad de México, abarcó del 19 de Junio de 1967 al 10 de Junio de 1972. Dicha construcción estuvo bajo la coordinación del Arq. Ángel Borja.

Esta primera etapa consta de tres líneas: la línea 1 que corre de poniente a oriente, desde Zaragoza hasta Chapultepec; la línea 2 de Tacuba a Taxqueña y la Línea 3 de Tlatelolco a Hospital General.

La longitud total de esta primera red fue de 42.4 kilómetros, con 48 estaciones para el ascenso, descenso y transbordo de los usuarios. (Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de, 2010).

- **2da etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

Esta segunda etapa de construcción, abarcó del 7 de Septiembre de 1977 a finales de 1982, en la cual se inicia con la creación de la Comisión Técnica Ejecutiva del Metro, al cual se hizo cargo de la construcción de las ampliaciones de la red.

Posteriormente, el 15 de enero de 1978, se crea la Comisión de Vialidad y Transporte Urbano del Distrito Federal, organismo responsable de proyectar, programar, construir, controlar y supervisar las obras de ampliación, adquirir los equipos requeridos y hacer entrega de instalaciones y equipos al Sistema de Transporte Colectivo Metro para su operación y mantenimiento.

En esta etapa se pueden mencionar dos fases, la primera corresponde a las prolongaciones de la línea 3, hacia el norte, de *Tlatelolco* a la *Raza* y hacia el sur, de *Hospital General* a *Zapata*. Durante la segunda fase arranco la construcción de las líneas 4 y 5. Las obras estuvieron a cargo de la empresa Ingeniería de Sistemas de Transporte Metropolitano, S.A. del Consorcio ICA.

En la conclusión de la segunda etapa, a finales de 1982, la red del Metro alcanzó una longitud de 79.5 kilómetros, el número de estaciones aumento a 80. (Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de, 2010).

- **3era etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

Esta etapa abarco de 1983 a finales de 1985, en donde se hicieron ampliaciones a las líneas 1, 2 y 3 y se iniciaron dos líneas más, la línea 6 y 7. En esta etapa la red se incrementa en 35.2 kilómetros y el número de estaciones aumenta a 105.

La línea 3 se prolonga de *Zapata* a *Universidad*; la línea 1, de *Zaragoza* a *Pantitlán*, y la línea 2 de *Tacuba* a *Cuatro Caminos*, en el límite con el Estado de México. Con estas ampliaciones, las líneas 1, 2 y 3 alcanzaron su trazo actual.

La construcción de la línea 6 (*Rosario* a *Instituto del Petróleo*) y la línea 7 (*Tacubaya* a *Barranco del Muerto*), en su primer fase, significo un incremento a la red de 21.4 kilómetros y 17 estaciones. (Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de, 2010).

- **4ta etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

Esta etapa fue de 1985 a 1987, en esta se realizaron ampliaciones de las líneas 6 (de *Instituto del Petróleo* a *Martín Carrera*) y la línea 7 (*Tacuba* a *El Rosario*), y el inicio de la línea 9 (*Pantitlán* a *Tacubaya*).

La ampliación de la línea 6 agregó 4.7 kilómetros y 4 estaciones a la red, la ampliación de la línea 7 incrementó la red con 5.7 kilómetros y 4 estaciones más.

La línea 9 se edificó en 2 fases, la primera de *Pantitlán* a *Centro Médico*, y posteriormente la segunda fase de *Centro Médico* a *Tacubaya*. Esta línea incorporo a la red 12 estaciones y 15.3 kilómetros. (Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de, 2010).

- **5ta etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

En esta etapa que fue de 1988 a 1994, se realizo la primera extensión de la Red del Metro al Estado de México, con la construcción de la línea A, de *Pantitlán* a *La Paz*, esta línea agregó 10 estaciones y 17 kilómetros de longitud a la red.

En esta etapa, el trazo original de la línea 8 fue modificado, (correspondencia con la estación *Zócalo*). El tramo inicial de la línea 8, de *Constitución de 1917* a *Garibaldi*, incremento la longitud de la red en 37.1 kilómetros, añadiendo dos nuevas líneas y 29 estaciones. Es decir, al finalizar 1994, la red del Metro contaba ya con 178.1 kilómetros de longitud, 154 estaciones y diez líneas. (Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de, 2010).

- **6ta etapa de construcción del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

Los estudios y proyectos del Metropolitano línea B se iniciaron a finales de 1993 con la construcción del primer tramo que comprendía de *Buenavista a La Plaza Garibaldi*. En 1997 el Gobierno del Distrito Federal recibió 178 kilómetros de red de Metro en operación y en proceso de construcción Línea B, de *Buenavista a Ecatepec*, con un avance global de 49%. La línea B (*Buenavista a Ciudad Azteca*) fue concluida en el segundo semestre del año 2000, dicha línea tiene 23.7 kilómetros de longitud, con 13.5 kilómetros en el Distrito Federal y 10.2 kilómetros en el territorio del Estado de México.

Al entrar en operación la línea B, la red en su conjunto se incremento 13% para alcanzar 201.7 kilómetros. (Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de, 2010).

3.2. Contexto Espacial del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México.

Actualmente, en la ciudad de México radica el 9% de los habitantes del país mientras que su territorio apenas representa el 0.8% de la superficie total de la República Mexicana. Su población asciende a 8.6 millones de habitantes y crece a un ritmo del 0.6% anual.

El Metro, realiza el 18% de los 20.6 millones de viajes que se generan en el Distrito Federal y su zona conurbada. Transporta a unos 4.2 millones de pasajeros en día laborable a través de sus 11 líneas que recorren 201.4 kilómetros de vías dobles; 175 estaciones y 324, según su tipo, con capacidad para 170 o 178 pasajeros. Cada una de las líneas del metro tiene asignado un número y un color distintivo (números del 1 al 9 y las letras A y B).

El Sistema de Transporte Colectivo Metro brinda sus servicios con un horario de:

- Días laborales de 5:00 a 24:00 hrs.
- Sábados de 6:00 a 24:00 hrs.
- Domingos y días festivos de 7:00 a 24:00 hrs., los 365 días del año. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, estaciones, correspondencias, est, 2010).

El costo de acceso al metro es de \$3.00 pesos y con este pago unitario el usuario tiene derecho a transbordar de una Línea a otra, para trasladarse a diversos puntos de la ciudad de México y la zona metropolitana, sin necesidad de pagar otro boleto.

Excepto en la Línea férrea A, que corre hacia el oriente de la ciudad y en donde el usuario tiene que depositar otro boleto, para continuar su viaje. (Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de, 2010).

A continuación se presentan un breve descripción de las 12 líneas que conforman el Sistema de Transporte Colectivo Metro. El Anexo B presenta más detalles de las mismas.

3.2.1. Línea 1 “Observatorio – Pantitlán”.

La línea 1 del metro está integrada por 20 estaciones, 7 de ellas de correspondencia, 12 de paso y dos terminales del total, 19 estaciones son subterráneas y una superficial y su color distintivo es el rosa. Se localiza al centro de la ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud total de vía de 18,828 kilómetros, de los cuales 16,654 kilómetros son utilizados para servicio de pasajeros y el restante para maniobras.



Figura 3.1.Red de la Línea 1 (“Pantitlán – Observatorio”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.2. Línea 2 “Cuatro Caminos – Tasqueña”.

La línea 2 se integra por 24 estaciones, 5 de ellas de correspondencia, 17 de paso y dos terminales; del total, 14 estaciones son subterráneas y 10 superficiales, su color distintivo es el azul.



Figura 3.2.Red de la Línea 2 (“Cuatro caminos - Tasqueña”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.3. Línea 3 “Indios Verdes – Universidad”.

La línea 3, tiene una longitud de 23 Kilómetros 609 m (en servicio 21 Kilómetros 278 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 21 estaciones, 6 de ellas de correspondencia, 13 de paso y 2 terminales; del total, 17 estaciones son subterráneas y 4 superficiales, su color distintivo es el verde olivo. Se localiza al centro de la ciudad de México con dirección norte-sur.



Figura 3.3. Red de la Línea 3 (“Indios Verdes – Universidad”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.4. Línea 4 “Santa Anita – Martin Carrera”.

La línea 4, tiene una longitud de 10 Kilómetros 747 m (en servicio 9 Kilómetros 363 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 10 estaciones, 6 de ellas de correspondencia (incluidas dos terminales), y 4 de paso; 2 estaciones son superficiales y 8 elevadas. Su identidad grafica utiliza el color cian.



Figura 3.4. Red de la Línea 4 (“Santa Anita – Martin Carrera”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.5. Línea 5 “Politécnico – Pantitlan”.

La línea 5, tiene una longitud de 15 Kilómetros 675 m (en servicio 14 Kilómetros 435 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 13 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 7 de paso y una terminal más; del total, 4 estaciones son subterráneas y 9 superficiales. Su color distintivo es el amarillo.



Figura 3.5. Red de la Línea 5 (“Politécnico –Pantitlan”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.6. Línea 6 “El Rosario – Martín Carrera”.

La línea 6, tiene una longitud de 13 Kilómetros 947 m (en servicio 11 Kilómetros 434 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 11 estaciones, 4 de ellas de correspondencia (incluidas las dos terminales), 7 de paso; del total, 10 estaciones son subterráneas y una superficial. Su color distintivo es el rojo. Está ubicada al norte de la ciudad de México con dirección oriente-poniente.



Figura 3.6. Red de la Línea 6 (“El rosario – Martin Carrera”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.7. Línea 7 “El Rosario – Barranca del Muerto”.

La línea 7, tiene una longitud de 18 Kilómetros 784 m (en servicio 17 Kilómetros 11 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 14 estaciones, 3 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 10 de paso y una terminal más; del total, 13 estaciones son subterráneas y una superficial. Su color distintivo es el naranja. Su trazo se encuentra al poniente de la ciudad de México con dirección norte-sur.



Figura 3.7. Red de la Línea 7 (“El Rosario – Barranca del Muerto”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.8. Línea 8 “Garibaldi – Constitución de 1917”.

La línea 8, tiene una longitud de 20 Kilómetros 78 m (en servicio 17 Kilómetros 679 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 19 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 13 de paso y una terminal más; del total, 14 estaciones son subterráneas y 5 superficiales. Su color distintivo es el verde. Su trazo se encuentra localizado al centro y suroriente de la ciudad de México.



Figura 3.8. Red de la Línea 8 (“Garibaldi – Constitución de 1917”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.9. Línea 9 “Pantitlán – Tacubaya”.

La línea 9, tiene una longitud de 15 Kilómetros 375 m (en servicio 13 Kilómetros 33 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 12 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluidas las dos terminales), 7 de paso; del total, 8 estaciones son subterráneas y 4 elevadas. Su color distintivo es el café. Su trazo se localiza al centro de la ciudad de México con dirección oriente-poniente.



Figura 3.9. Red de la Línea 9 (“Pantitlan – Tacubaya”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.10. Línea A “Pantitlán – La Paz”.

La línea A, tiene una longitud de 17 Kilómetros 192 m (en servicio 14 Kilómetros 893 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 10 estaciones, 8 de ellas de paso y dos terminales, una con correspondencia; del total, 1 estación es subterránea y 9 superficiales. Su color distintivo es el morado.



Figura 3.10. Red de la Línea A (“Pantitlan – La Paz”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.11. Línea B “Ciudad Azteca – Buenavista”.

La línea B, tiene una longitud de 23 Kilómetros 722 m (en servicio 20 Kilómetros 278 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 21 estaciones, 5 de ellas de correspondencia, 14 de paso y dos terminales; del total, 6 estaciones son subterráneas, 11 superficiales y 4 elevadas, es la única del sistema en utilizar en su identidad gráfica dos colores: verde y gris.



Figura 3.11.Red de la Línea B (“Ciudad Azteca – Buenavista”).

Fuente: (Red de Metro de la ciudad de México).

3.2.12. Línea 12, Línea Dorada “Mixcoac – Tláhuac”.

Con una inversión de 17 mil 583 millones de pesos dan inicio los trabajos para la construcción de la Línea 12 del Metro que correrá de Mixcoac a Tláhuac, considerada como la obra más importante de la ciudad de México y del país en los últimos años.

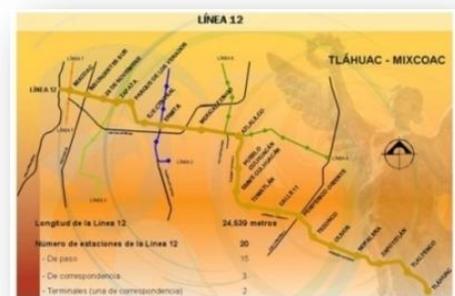


Figura 3.12. Red de la Línea 12, Línea Dorada “Mixcoac – Tláhuac”.

Fuente: (Sabias que...#10)

3.3. Parque vehicular del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

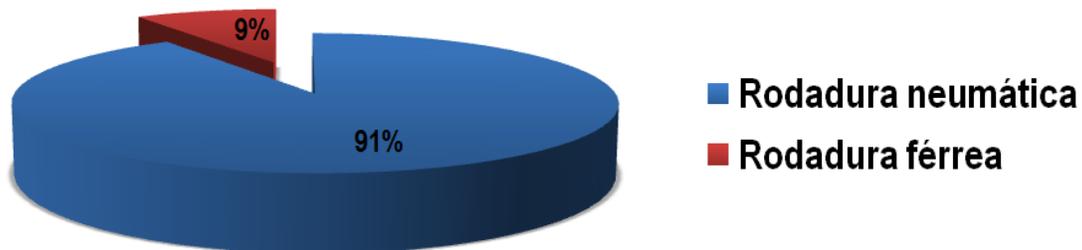
Para trasladarte a los distintos puntos de destino del Distrito Federal y zona metropolitana, el Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene un parque vehicular de 355 trenes, de los cuales 291 son de 9 carros y 31 de 6, en ambos casos de rodadura neumática, así como 33 de rodadura férrea de 6 carros, 39 carros sin formación (están en reserva o en proceso de conversión de M a N) lo que hace un total de 3,042 carros.

Trenes		Total de carros
291	Rodadura neumática	9 carros
31	Rodadura neumática	6 carros
33	Rodadura férrea	6 carros
Total:	355	Trenes

Tabla 3.1. Parque Vehicular
Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

Como se dijo el parque vehicular se encuentra integrado por 13 modelos, pero divididos en dos tipos el férreo y el de tipo neumático (ver Gráfica 3.1). De acuerdo a la tabla 3.1. Tipos de trenes, podemos darnos cuenta que solo la línea A, utiliza al 100% el parque vehicular tipo férreo, siendo este solo el 9% y el otro 91% hace uso del parque vehicular tipo neumático.

Parque Vehicular



Gráfica 3.1. Tipo de rodadura.
Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010).
Elaboración propia.

El Anexo-B presenta detalles adicionales del parque vehicular del sistema Metro.

3.3.1. Conformación de un tren del metro.

Los trenes de la ciudad de México están constituidos por nueve carros, seis de los cuales proporcionan movimiento de tracción al tren a los cuales se les denomina motrices. (ver figura 3.13).

Los vagones de los extremos tienen la característica de tener cabina y a los cuales se les denomina con la letra "M" y a los restantes motrices se les denomina con la letra "N", a los otros carros se les denomina remolques designados por la letra "R", estos trenes constan de tres elementos constituidos de la siguiente manera, además de contar el tren con un vagón designado con las letras "PR" en el cual se encuentra montado el equipo de pilotaje automático.

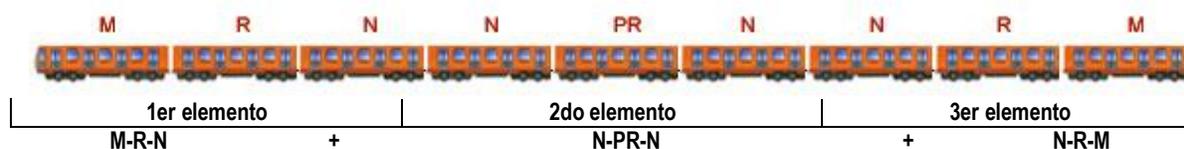


Figura 3.13. Conformación de un tren de 9 carros.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

Los trenes de 9 carros, 4 de ellos son motrices y 2 remolques. Esta formación puede disminuirse a 6 carros, dependiendo de la demanda de transporte (figura 3.14).

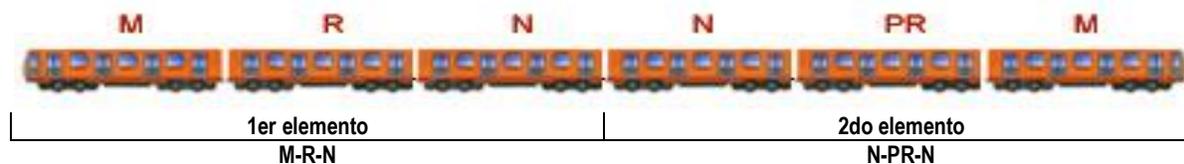


Figura 3.14. Conformación de un tren de 6 carros.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010).

- **M:** Representa a los carros motrices equipados con cabina de conducción y con tracción propia.
- **N:** Representa a los carros motrices que con tracción propia y sin cabina.
- **R:** Representa a los carros remolques.
- **RP:** Representa al carro remolque central que cuenta con el equipo del sistema de pilotaje automático.

De manera general, la conformación y características del material rodante se han distinguido por estar a la vanguardia tecnológica de su tiempo. Las constructoras Concarril, Bombardier, Alston (Halsthom) y CAF son firmas reconocidas, que se destacan por su experiencia, innovación tecnológica, medidas de seguridad, capacidad, comodidad y confiabilidad. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

3.3.2. El cuerpo del carro del metro.

Al cuerpo del carro, donde viajan los pasajeros, se le llama caja. La caja de los carros va montada sobre dos carretillas portadoras, llamadas boguies. En el caso de los carros motrices, cada boguie va equipado con dos motores de tracción (un total de cuatro por cada carro motriz). Los boguies de los carros remolque carecen de motor, los carros motrices toman la corriente de la barra guía, de 750 volts, mediante las escobillas, situadas entre las dos ruedas de cada boguie. (ver figura 3.15).

Bajo las cajas de los carros motores, entre los boguies, van colocados los equipos que regulan el funcionamiento de los motores de tracción. Bajo la caja de los carros remolque están instalados:

1. El compresor, que produce el aire a presión para el frenado neumático y el cierre de puertas.
2. El motogenerador, que genera corriente alterna de 250 volts, destinada al alumbrado de los carros. El compresor y el motogenerador trabajan con la corriente de 750 volts, proporcionada por la motriz N adyacente.
3. El banco de baterías, que generan corriente de baja tensión (72 volts), para los circuitos de mando del tren.
4. En el remolque que ocupa la posición Intermedia va instalado el captor del pilotaje automático.

Los trenes son de rodadura de acero, tipo ferroviario (se denominan férreos, ya que no cuentan con llantas o neumáticos) y están integrados, cada uno, por seis carros, de los cuales 2 son motrices, 1 remolques y de igual forma que los convoyes de rodadura neumática, uno de ellos está equipado con el sistema de pilotaje automático.



Figura 3.15. Cuerpo del carro.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010).

En los trenes férreos la alimentación es por catenaria con 750 VCD (en forma similar a los trolebuses, por medio de un cable de cobre o aluminio, soportado con aisladores) y la toma de alimentación es por medio de un mecanismo de pantógrafo, con un patín de rozamiento de carbón. Las ruedas metálicas, en acero forjado, realizan la misma función de guiado y transmiten los esfuerzos de tracción - frenado. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

En la siguiente tabla se muestran las características físicas de los vagones que componen el cuerpo del carro del metro.

Características	Valores
Altura de riel a techo.	3.60 metros
Altura de piso a techo.	2.40 metros
Ancho exterior:	2.50 metros
Largo motriz con cabina (M):	17.1 metros
Largo motriz sin cabina (N):	16.2 metros
Largo remolque (R):	16.2 metros
Peso vacío	20.8 toneladas
Peso a 4/4 de carga (70kg/PAS)	32.7 toneladas
Pasajero sentados (M)	38 toneladas
Pasajero de pie (M)	132 toneladas
Pasajero sentados (N y R)	39 toneladas
Pasajero de pie (N y R)	131 toneladas

Tabla 3.2. Características físicas del vagón.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

3.3.3. Distribución de trenes en el metro.

La red del Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene un total de 355 trenes asignados (322 neumáticos y 33 férreos), para proporcionar el servicio a los usuarios en horas pico se tiene un polígono de operación de 253 trenes, de los 102 trenes restantes se tienen en promedio: 14 trenes en mantenimiento sistemático, 8 trenes en mantenimiento mayor, 4 en rehabilitación y 5 en proyectos especiales, el resto de los trenes se encuentran disponibles para su explotación. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

La tabla 3.3 muestra la distribución de trenes por líneas del Metro de la ciudad de México:

Línea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	Total
Trenes	51	45	58	13	17	18	26	29	33	33	32	355

Tabla 3.3. Distribución de trenes por línea.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

Nota: La cantidad de trenes por línea puede variar por una redistribución del parque vehicular en función de las necesidades del servicio.

Con objeto de proporcionar un mejor servicio, el Sistema de Transporte Colectivo Metro modificó trenes de 9 carros por trenes de 6 carros con el fin de incrementar la frecuencia del paso de los convoyes.

3.3.4. Capacidad de pasajeros por tren.

La capacidad de pasajeros por tren varía debido al tipo de tren, ya que como se vio, se cuenta con trenes de 6 y 9 vagones. A continuación se muestra la tabla 3.4 con la capacidad de pasajeros por tren dependiendo de la cantidad de vagones que lo conformen. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010).

Tren	Capacidad		
	Sentados	Parados	Total
6 vagones	240	780	1,020
9 vagones	360	1,170	1,530

Tabla 3.4. Capacidad de Usuarios por vagón.
 Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

3.4. Características físicas de los túneles del metro.

Como lo muestran las figuras 3.16 Vista superior del túnel del metro y la 3.17 Vista frontal del túnel del metro, las dimensiones interiores de los túneles del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México son de 8.65 metros por unos 6.59 metros de alto (este dato depende de la contrabóveda del túnel).

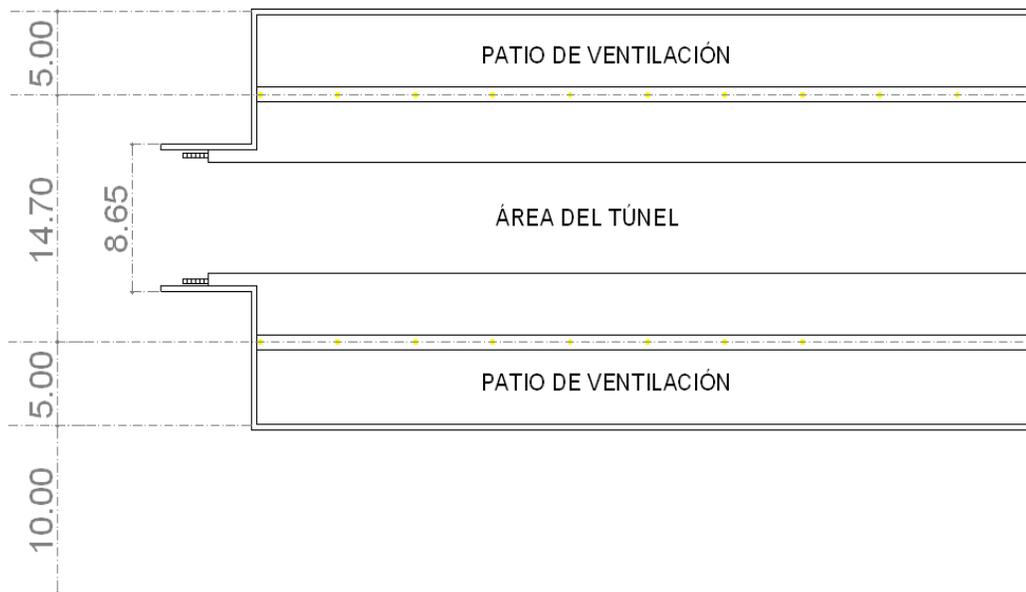


Figura 3.16. Vista superior del túnel del metro.
 Fuente: (Metro, 2009)
 Elaboración propia.

La circulación del metro ocupa la parte más baja del mismo hasta una altura de 1.20 metros medidos desde la contrabóveda, cuyo espesor está comprendido entre 0.5 metros (losa drenada) y 0.6 metros (contrabóveda, o losa curva) a lo que hay que sumar 0.1 metros de hormigón de limpieza. Esta sección es “fija” en todo el túnel de la línea, podemos corroborar estos datos.

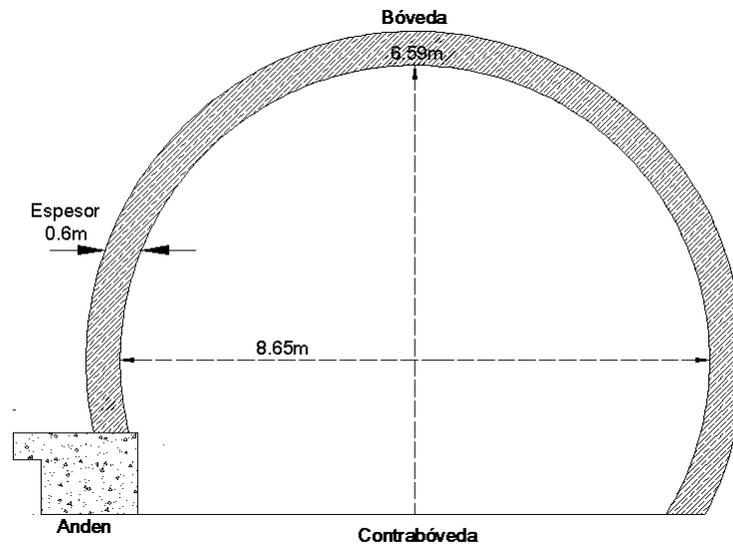


Figura 3.17. Vista frontal del túnel del metro.
 Fuente: (Metro, 2009)
 Elaboración propia.

Sobre esta sección “fija” lleva unos refuerzos transversales (estampidores) de 0.65 metros, quedando una sección libre en la parte superior de unos 4 metros. Esta sección es variable dependiendo de si lleva estampidores o no, así como del tipo de contrabóveda, pero podemos dar por buenos los 4 metros.

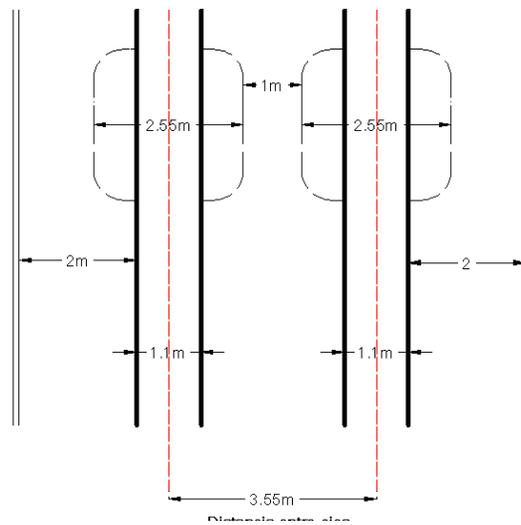


Figura 3.18. Medidas del túnel del metro.
 Fuente: (Metro, 2009)
 Elaboración propia.

Sobre esta altura libre va el dintel¹⁵ cuyo espesor varia de 0.6 metros a 1 metro dependiendo de si es túnel línea entre estaciones, túnel de línea curva, abocinamientos¹⁶ de entrada o salida a estaciones y estaciones propiamente dichas. Y la cota superior del dintel queda 1 metro por debajo de la capa de rodadura de la calle.

3.4.1. Características físicas de las interestaciones subterráneas (Túneles).

En la tabla 3.5, se muestra la clasificación de las terminales, en relación a si tiene correspondencia o no con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Línea	Clasificación por Uso	
	Terminales	
	Sin correspondencia	Con correspondencia
1	1	1
2	2	0
3	2	0
4	0	2
5	1	1
6	0	2
7	1	1
8	1	1
9	0	2
"A"	1	1
"B"	2	0
RED	11	11

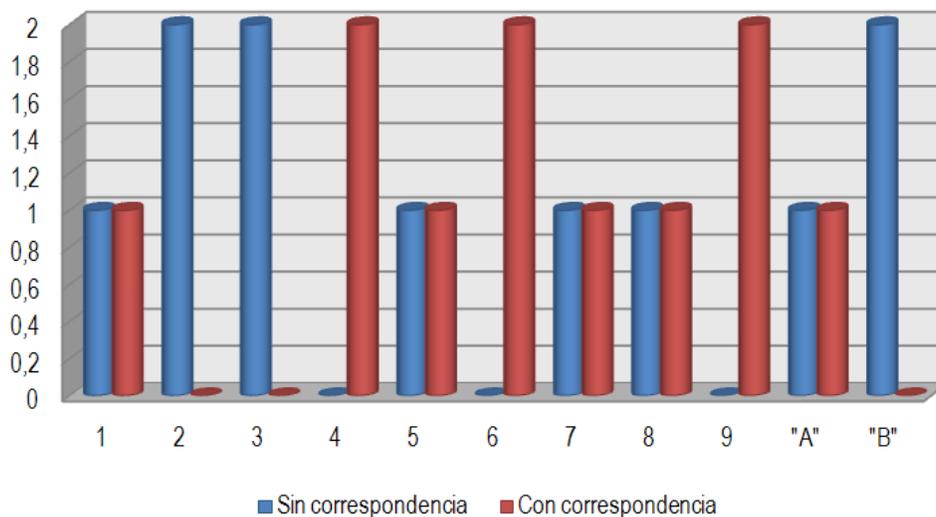
Tabla 3.5. Clasificación de terminales sin o con correspondencia a otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Elaboración propia.

La gráfica 3.2, muestra las líneas sin y con correspondencia con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

¹⁵ Un dintel es un elemento estructural horizontal que salva un espacio libre entre dos apoyos. Es el elemento superior que permite abrir huecos en los muros. Por extensión, el tipo de arquitectura, o construcción, que utiliza el uso de dinteles para cubrir los espacios en los edificios se llama arquitectura adintelada, o construcción adintelada. La que utiliza arcos o bóvedas se denomina arquitectura abovedada.

¹⁶ Los abocinamientos son ensanchamientos de entrada o salida hacia el lado interior de la pared en forma de trompeta o bocina.

Terminales



Gráfica 3.2. Tipo de terminales sin o con correspondencia con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Elaboración propia.

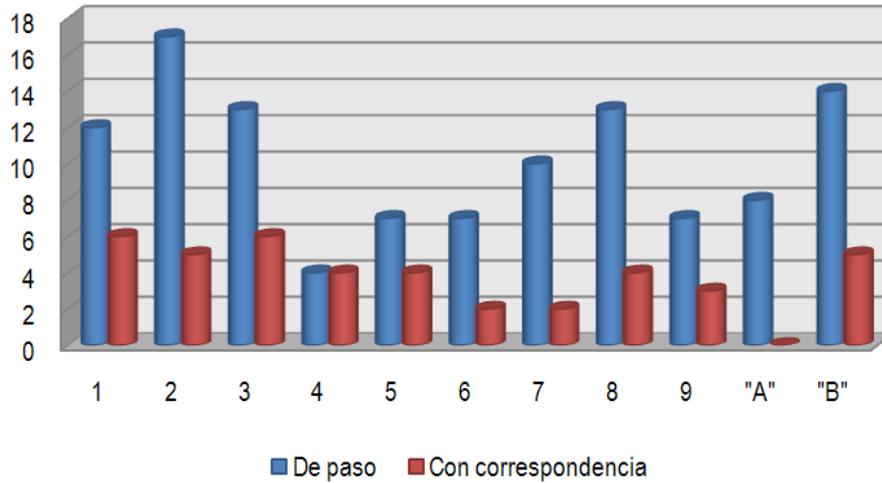
La tabla 3.6, muestra si las estaciones son de paso o tiene correspondencia con otras líneas. Como vemos las estaciones de paso son la mayoría con un total de 112 mientras que las de correspondencia solo son 41 estaciones.

Línea	Clasificación por Uso	
	Estaciones	
	De paso	De correspondencia
1	12	6
2	17	5
3	13	6
4	4	4
5	7	4
6	7	2
7	10	2
8	13	4
9	7	3
"A"	8	0
"B"	14	5
RED	112	41

Tabla 3.6. Clasificación de estaciones de paso o de correspondencia a otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Elaboración propia.

La grafica 3.3, muestra las estaciones de paso y las de correspondencia con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro. Donde vemos que las de mayor frecuencia son las estaciones de paso.

Estaciones



Gráfica 3.3. Tipo de estaciones de paso o de correspondencia con otras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro.
Elaboración propia.

En la tabla 3.7, se nos muestra los tres tipos existentes de construcción de las líneas en la ciudad de México, construcción subterránea, superficial y elevada. Podemos observar que la construcción más recurrente es la subterránea.

Línea	Clasificación por tipo			Total
	Subterráneas	Superficiales	Elevadas	
1	19	1	0	20
2	14	10	0	24
3	17	4	0	21
4	0	2	8	10
5	4	9	0	13
6	10	1	0	11
7	13	1	0	14
8	14	5	0	19
9	8	0	4	12
"A"	1	9	0	10
"B"	6	11	4	21
RED	106	53	16	175

Tabla 3.7. Clasificación de líneas según su construcción.
Elaboración propia.

La tabla 3.8, muestra la longitud que existe entre cada una de las estaciones tomando en consideración únicamente las interestaciones subterráneas. Aquí podemos ver que la interestacion más larga es la de Escuadrón 201 – Atlalilco de la línea 8 con 1738 metros, mientras que la más corta es Hidalgo – Juárez a de la línea 3 con 251 metros.

LÍNEA	INTERESTACIÓN	LONGITUD DE INTERESTACIÓN (metros)	TIPO DE INTERESTACIÓN
8	Escuadrón 201 – Atlalilco	1738	Subterránea
2	Cuatro caminos – Panteones	1639	Subterránea
7	Mixcoac – Barranca del Muerto	1476	Subterránea
3	La raza – Tlatelolco	1445	Subterránea
7	Tacuba – San Joaquín	1433	Subterránea
7	Auditorio – Constituyentes	1430	Subterránea
2	Panteones – Tacuba	1416	Subterránea
A	Pantitlán – Agrícola Oriental	1409	Subterránea
7	Aquiles Serdán – Camarones	1402	Subterránea
1	Pantitlán - Zaragoza	1320	Subterránea
3	Miguel Angel de Quevedo - Copilco	1295	Subterránea
7	Refinería – Tacuba	1295	Subterránea
6	Instituto del Petróleo – Lindavista	1258	Subterránea
6	Azcapotzalco – Ferreria	1173	Subterránea
7	San Joaquín – Polanco	1163	Subterránea
1	Juanacatlán – Tacubaya	1158	Subterránea
3	Zapata- Coyoacán	1153	Subterránea
5	Terminal Aérea – Hangares	1153	Subterránea
9	Centro Médico – Chilpancingo	1152	Subterránea
8	Obrera – Chabacano	1143	Subterránea
6	La Villa – Basílica – Martín Carrera	1141	Subterránea
8	Cerro de la Estrella – UAM 1	1135	Subterránea
9	Patriotismo – Tacubaya	1133	Subterránea
3	Centro Médico – Etiopía	1119	Subterránea
3	Potrero – La Raza	1106	Subterránea
7	Tacubaya – San Pedro de los Pinos	1084	Subterránea
6	Lindavista – Deportivo 18 de Marzo	1075	Subterránea
6	Ferrería – Norte 45	1072	Subterránea
9	Lázaro Cardenas – Centro Médico	1059	Subterránea
3	Tlatelolco – Guerrero	1042	Subterránea

Tabla 3.8. Longitud de Interestación de estación a estación de estaciones tipos subterráneas.
Elaboración propia.

LÍNEA	INTERESTACIÓN	LONGITUD DE INTERESTACIÓN (metros)	TIPO DE INTERESTACIÓN
9	Jamaica – Chabacano	1031	Subterránea
7	Constituyentes – Tacubaya	1005	Subterránea
9	Chabacano – Lázaro Cardenas	1000	Subterránea
1	Chapultepec – Juanacatlán	973	Subterránea
6	Tezozomoc – Azcapotzalco	973	Subterránea
5	Misterios – Valle Gómez	969	Subterránea
8	Santa Anita – Coyuya	968	Subterránea
9	Chilpancingo – Patriotismo	955	Subterránea
7	Camarones – Refinería	952	Subterránea
3	Etiopía – Eugenia	950	Subterránea
9	Mixiuhca – Jamaica	942	Subterránea
3	Coyoacán – Viveros	908	Subterránea
1	San Lázaro – Candelaria	866	Subterránea
8	Chabacano – La Viga	843	Subterránea
3	Viveros – Miguel Angel de Quevedo	824	Subterránea
7	Polanco – Auditorio	812	Subterránea
3	División del Norte – Zapata	794	Subterránea
1	Cuauhtémoc – Insurgentes	793	Subterránea
7	San Antonio – Mixcoac	788	Subterránea
1	Zaragoza - Gómez Farías	762	Subterránea
8	Doctores – Obrera	761	Subterránea
B	Garibaldi - Guerrero	757	Subterránea
6	Vallejo – Instituto del Petróleo	755	Subterránea
1	Merced - Pino Suárez	745	Subterránea
2	Zócalo – Pino Suárez	745	Subterránea
8	Atlalilco – Iztapalapa	732	Subterránea
8	Iztapalapa – Cerro de la Estrella	717	Subterránea
3	Eugenia – División del norte	715	Subterránea
1	Balbuena – Moctezuma	703	Subterránea
3	Guerrero – Hidalgo	702	Subterránea
1	Candelaria – Merced	698	Subterránea
5	Valle Gómez – Consulado	679	Subterránea
3	Balderas – Niños Héroeos	665	Subterránea
6	Norte 45 – Vallejo	660	Subterránea

Continuación de Tabla 3.8.

LÍNEA	INTERESTACIÓN	LONGITUD DE INTERESTACIÓN (metros)	TIPO DE INTERESTACIÓN
3	Juárez – Balderas	659	Subterránea
2	Normal - San Cosme	657	Subterránea
3	Hospital General – Centro Médico	653	Subterránea
1	Insurgentes – Sevilla	645	Subterránea
2	Tacuba – Cuitláhuac	637	Subterránea
8	Garibaldi – Bellas Artes	634	Subterránea
8	La Viga – Santa Anita	633	Subterránea
2	Cuitláhuac – Popotla	620	Subterránea
1	Gómez Farías - Boulevard Puerto Aéreo	611	Subterránea
B	Tepito – Lagunilla	611	Subterránea
7	San Pedro de los Pinos – San Antonio	606	Subterránea
2	Allende – Zócalo	602	Subterránea
1	Boulevard Puerto Aéreo - Balbuena	595	Subterránea
2	Revolución – Hidalgo	587	Subterránea
6	Deportivo 18 de Marzo – La Villa – Basílica	570	Subterránea
8	Salto del Agua – Doctores	564	Subterránea
3	Niños Héroes – Hospital General	559	Subterránea
2	San Cosme – Revolución	537	Subterránea
B	Guerrero - Buenavista	521	Subterránea
2	Colegio Militar – Normal	516	Subterránea
1	Sevilla – Chapultepec	501	Subterránea
B	Morelos – Tepito	498	Subterránea
1	Moctezuma - San Lázaro	478	Subterránea
B	Lagunilla - Garibaldi	474	Subterránea
2	Popotla – Colegio Militar	462	Subterránea
1	Salto del Agua – Balderas	458	Subterránea
8	Bellas Atrtes – San Juan de Letrán	456	Subterránea
2	Hidalgo – Bellas Artes	447	Subterránea
1	Isabel la Católica – Salto del Agua	445	Subterránea
1	Balderas – Cuauhtémoc	409	Subterránea
2	Bellas Artes – Allende	387	Subterránea
1	Pino Suárez – Isabel la Católica	382	Subterránea
8	San Juan de Letrán – Salto del Agua	292	Subterránea
3	Hidalgo – Juárez	251	Subterránea

Continuación de Tabla 3.8.

3.5. Sistema de control de incendios en túnel del metro.

En caso de incendio, uno de los aspectos más importantes para poder actuar de forma rápida y precisa es disponer de un sistema capaz de localizar la posición del incendio en el interior del túnel.

El metro cuenta con una instalación de detección de incendios basada en un sistema continuo de cable detector lineal de fibra óptica, que actúa en toda su longitud como detector termovelocimétrico¹⁷, pudiendo detectar un foco de incendio, su magnitud y dirección. La señal de alarma se produce por alguna de las siguientes razones:

- Sobrepasar una temperatura prefijada.
- Aumento rápido de la temperatura.
- Superar en 15°C la temperatura media del túnel.

Dicho cable de detección de incendios estará compuesto por doble cable de fibra óptica y cubierta de acero inoxidable, manteniendo una separación mínima de 15 cm respecto del techo.

El control del cable detector se realiza desde las unidades de evaluación instaladas en los correspondientes cuartos técnicos.

Mediante la salida RS-232¹⁸ de dichas unidades se pasarán a las remotas de comunicaciones toda la información del sistema, y de la respectiva remota al resto de las remotas y al centro de control a través de la red Fast Ethernet, de tal forma que en caso de incendio se pueda actuar de forma segura sobre el máximo número de elementos (ventilación, iluminación, señalización, megafonía, etc.).

¹⁷ Que detecta la velocidad de aumento de temperatura.

¹⁸ El RS-232 consiste en un conector tipo DB-25 (de 25 pines).

Capítulo IV. Aplicación de la Metodología, Análisis y Resultados.

Los tercios se obstinan en querer sitios inaccesibles
y gastan sin resultado las fuerzas que pudieran aplicar con más juicio.
(Anónimo).

Capítulo IV.

Aplicación de la Metodología, Análisis y Resultados.

4.1. Desarrollo de la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff.

A continuación se desarrollará las 4 fases que componen la metodología de C.W. Churchman y R.I. Ackoff.

4.1.1. Fase 1. Formulación del problema.

La investigación del trabajo de tesis se enfoca en el Análisis de Riesgos de Incendio en el Sistema de Transporte Colectivo Metro, considerando que las estaciones subterráneas predominan en el sistema y que estas son cavidades aisladas del exterior y que por lo tanto presentan la dificultad de eliminar el calor, el humo y las sobrepresiones que se pueden generar durante un incendio, a diferencia de las estaciones elevadas y superficiales, estas serán tomadas como escenario de nuestro análisis.

El fuego además de producir humo, puede incapacitar o matar por la reducción de los niveles de oxígeno, ya sea por el consumo de oxígeno, o desplazándola con otros gases.

Un incendio dentro de un túnel puede llegar a invadir cientos de metros de su trazado en pocos minutos.

Humo y gases tóxicos son un riesgo importante. En un incendio, es el fuego que causa un daño estructural, pero el humo es el principal peligro para las personas, al ser inhalado.

El calor es también un peligro para las vías respiratorias, debido a que los gases sobrecalentados queman el tracto respiratorio. Cuando el aire está lo suficientemente caliente, una respiración puede causar la muerte.

4.1.2. Fase 2. Construcción del modelo.

Considerando lo mencionado en el capítulo II, sección 2.1.1. Sistema de ventilación en túnel, sabemos que la circulación y velocidad del aire depende tanto de la ventilación natural como la ventilación forzada con la que cuenta el túnel. Ver figura 4.1.

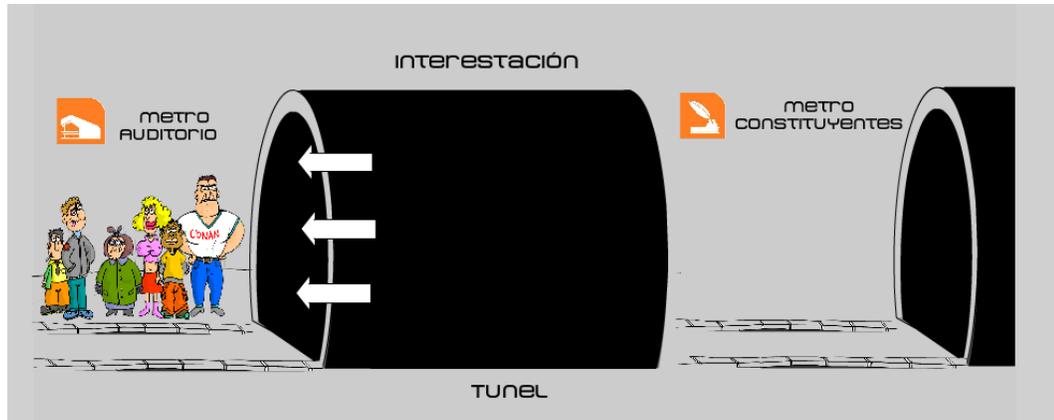


Figura 4.1. Dirección y velocidad del aire en túnel.
Elaboración propia.

Como ya se dijo, la circulación y la velocidad del aire en los túneles depende de algunas cuestiones, pero estos factores son muy importantes en caso de un incendio. Algunos autores proponen ecuaciones (ver capítulo II sección 2.1.10 Velocidad Crítica), para obtener la velocidad crítica de ventilación adecuada para evitar el fenómeno de *backlayering*.

4.1.2.1. Gases tóxicos.

Como se mencionó en el Capítulo II, en un incendio se generan gases como resultado del proceso de combustión del material sólido que se está quemando. Según las estadísticas que se tienen en accidentes debidos a incendios, la mayoría de las muertes producidas por incendios es causada no por quemaduras pero por los gases tóxicos que se generan, en particular el monóxido de carbono (CO).

Ha habido una gran cantidad de estudios de investigación para determinar la cantidad de CO que se requiere para causar la muerte cuando una persona se expone a gases tóxicos, tales como los producidos por incendios. El siguiente modelo ha sido propuesto para determinar el "Tiempo de incapacidad":

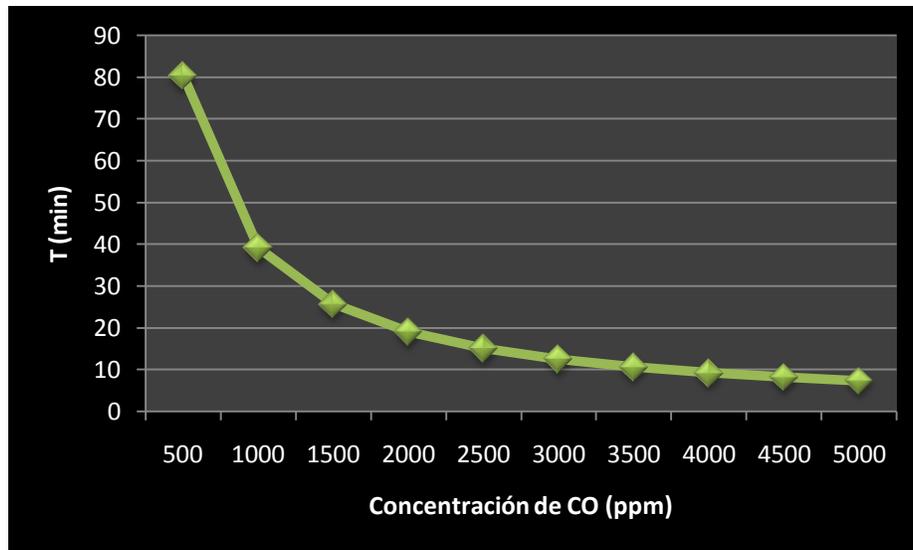
$$TI_{co} = \frac{30}{(5.9706 \times 10^{-4}) Y_{CO}^{1.036}} \quad \text{Ecuación 4.1.}$$

donde:

TI_{co} = Tiempo de incapacidad (CO) [min]

Y_{co} = Concentración de (CO) [ppm]

En este proyecto se llevó a cabo una evaluación del TI_{co} para diferentes concentraciones del monóxido de carbono y los resultados se muestran en la Grafica 4.1.



Grafica 4.1. Comportamiento del CO con el tiempo.
Elaboración propia.

De la figura se puede observar que a medida de aumenta la concentración del CO, menor es el tiempo en que dispone un persona para sobrevivir. Por otro lado, cuando las concentraciones del gas tóxico son pequeños (500 ppm), existe un mayor tiempo (aproximadamente 80 min) para reaccionar ante el evento.

Según investigaciones que se han llevado a cabo en este campo, una persona muere cuando se expone a concentraciones del orden de 3000 ppm. Estos resultados son muy importantes ya que nos permiten conocer los tiempos en que una persona (personas) puede sobrevivir cuando se expone a gases tóxicos como el CO, lo cual permite diseñar sistemas efectivos de evacuación, por ejemplo, para el caso de un evento de incendio en el metro.

4.1.2.2. Backlayering.

En este proyecto también se investigó el fenómeno de "backlayering" o de reflujo de gases tóxicos que se producen cuando ocurre un incendio, por ejemplo, en el metro. La figura 4.2 muestra una vista lateral de un túnel (del metro) y el fenómeno de reflujo.

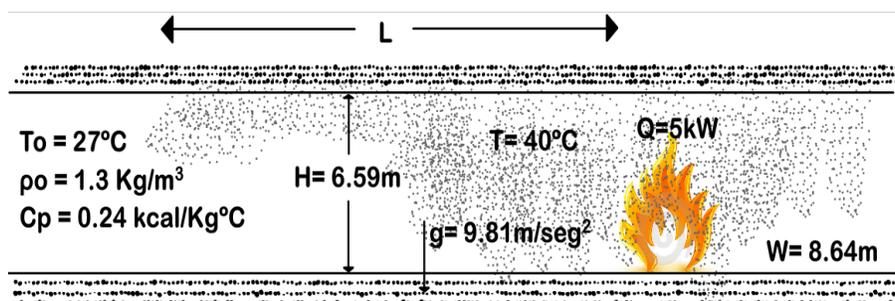


Figura 4.2. Fenómeno de *backlayering* para el caso de un túnel.
Elaboración propia.

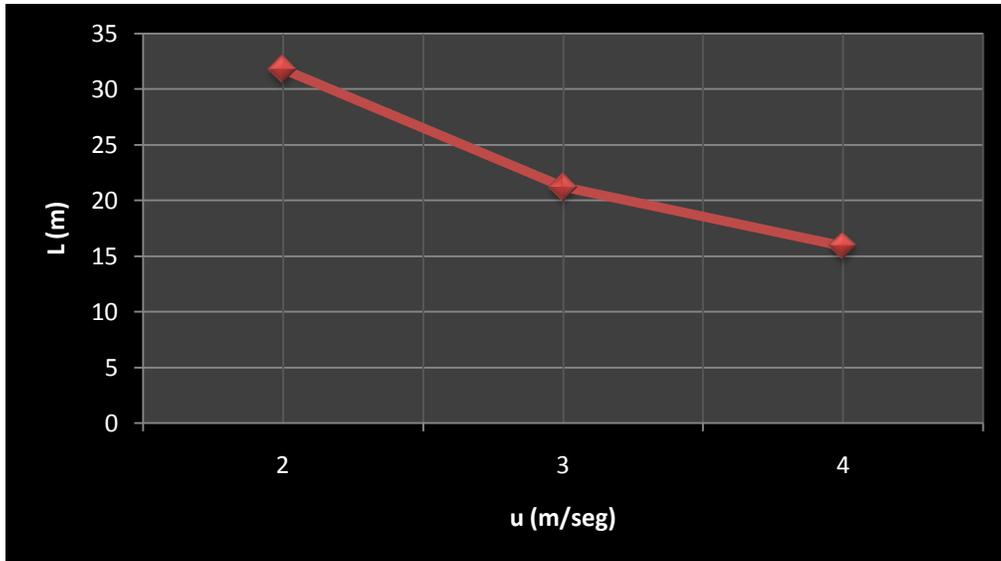
Para tener una idea de la distancia de *backlayering* que se genera cuando ocurre un incendio en un túnel como el del metro, se decidió determinar la distancia (L) (ver figura 4.2) para un escenario en particular; esto es, para una Tasa de Liberación de Calor (TLC o Heat Release Rate, por sus siglas en inglés) (Q) de 20kW, empleando el siguiente modelo:

$$\frac{L}{H} = \sqrt[3]{\frac{gQ}{\rho C_p T u^3 H}} \quad \text{Ecuación 4.2.}$$

donde:

$H =$ Altura del túnel [m]

$u =$ velocidad longitudinal (ventilación natural) $\left[\frac{m}{seg}\right]$



Grafica 4.2. Longitud del *backlayering* en un túnel.
Elaboración propia.

La grafica 4.2 muestra los resultados del cálculo y se puede apreciar claramente el comportamiento del humo (*backlayering*) a diferentes velocidades (2, 3 y 4 m/s). Esto es, a medida que se aumenta la velocidad disminuye la distancia del reflujo de humo y eventualmente se puede y debe eliminar dicha distancia (ver en la sección 4.4 para detalles de la velocidad crítica) para garantizar una segura evacuación y prevenir pérdidas de vidas humanas.

4.1.2.3. Visibilidad.

Otra de las variables importantes que se investigaron es lo concerniente a la visibilidad en el túnel en el caso de un incendio. Para evacuar es necesario, en primer lugar, que se tenga una buena visibilidad. A continuación se presentan los resultados para el caso de estudio. Como se ha descrito en el Capítulo 3, el STCM en su gran mayoría es subterráneo (el capítulo 3 presenta un resumen de todas las líneas subterráneas así como las distancias entre las estaciones). En esta sección se consideraron los siguientes dos casos:

Caso-1: Túnel de la inter-estación "Escuadrón 201-Atlalilco". Este túnel es el más largo del STCM .

Caso-2: Túnel de la inter-estación "Hidalgo-Juárez". Este túnel es le más corto del STCM.

A continuación se presentan más detalles así como los resultados del análisis de la visibilidad en caso de un incendio en dichos túneles.

Caso-1: Túnel de la inter-estación "Escuadrón 201-Atlalilco".

Según los datos mostrados en la sección 3.4 del Capítulo III, el túnel de las estaciones "Escuadrón 201 – Atlalilco" de la línea 8 es de 1738 metros; la figura 4.3. presenta esquemáticamente dicho túnel así como algunas consideraciones de la longitud del túnel consideradas para el análisis.

$$x = \begin{cases} \frac{1}{4} l \\ \frac{1}{3} l \\ \frac{1}{2} l \end{cases} \quad \text{Ecuación 4.3.}$$

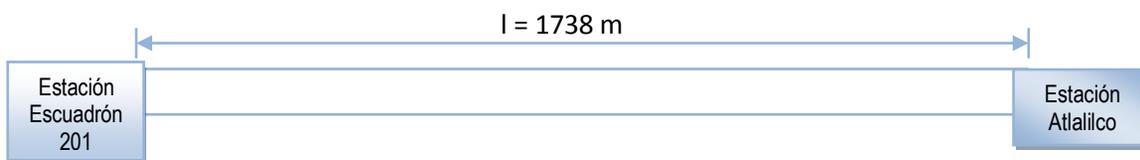


Figura 4.3. Escenario de incendio en el túnel entre las estaciones "Escuadrón 201" y "Atlalilco".
Elaboración propia.

Para determinar la visibilidad (V), se empleo el siguiente modelo:

$$V = 0.87 \left[\frac{uAH_{ce}}{\left(\frac{Q}{t} \left(t - \frac{x}{u}\right)\right) D_{dmo}} \right] \quad \text{Ecuación 4.4.}$$

donde:

V = Visibilidad (m)

u = Velocidad longitudinal (m/seg)

x = distancia del incendio (m)

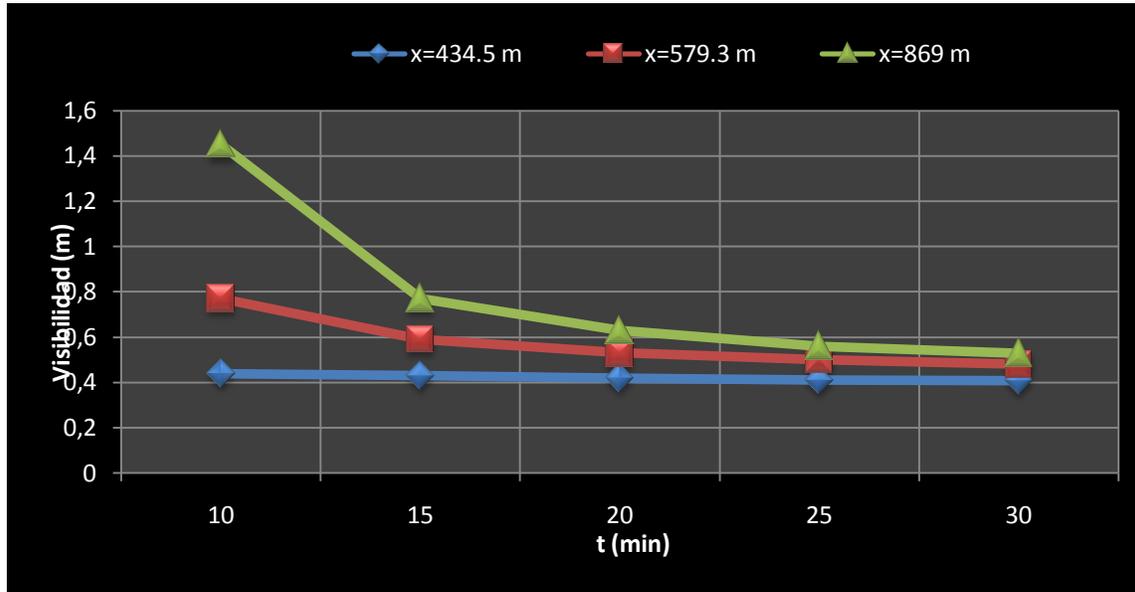
t = tiempo (seg)

A = Área del túnel

H_{ce} = Calor efectivo de combustión (KJ/Kg)

D_{dmo} = Densidad de masa óptica (m²/Kg)

En este análisis se consideró una ventilación longitudinal de 2m/s (ventilación natural; ver Capítulo II). Además, se consideró $Q=20\text{kW}$; por otro lado, el valor considerado para el calor efectivo de combustión (H_{ce}) y la densidad de masa óptica (D_{dmo}) fueron de 27 MJ/Kg y 335 m²/Kg respectivamente.



Gráfica 4.3. Visibilidad para diferentes distancias y tiempos para el caso-1.
Elaboración propia.

La gráfica 4.3 muestra los resultados del análisis de la visibilidad para el escenario considerado. De la figura se puede observar que cuando la distancia tomada al origen del incendio es de 434.5 m, en los primeros 10 min, la visibilidad es de 0.63 m. Por otro lado, al aumentar el tiempo y para la misma distancia se observa que la visibilidad disminuye. De manera similar ocurre cuando se considera una distancia al incendio de 579.3 m (1/2, ver Figura 4.3); por ejemplo, en los primeros 10 min se tiene una visibilidad de aproximadamente 0.80 m y al aumentar el tiempo se observa una disminución en la visibilidad, tal y como en el caso anterior. Finalmente, se determinó la visibilidad a una distancia de 869 m del origen del incendio y se observa que en los primeros 10 min la visibilidad es casi de 1.4 m. Por otro lado, se observa que en los 30 min la visibilidad alcanza aproximadamente medio metro para las tres distancias consideradas en el análisis.

Los resultados mostrados en la grafica 4.3 se consideran para una Q (o TLC) que crece linealmente y para una velocidad longitudinal dentro del túnel constante.

Caso-2: Túnel de la inter-estación "Hidalgo-Juárez"

La figura 4.4 muestra una representación esquemática para este caso. Como se mencionó anteriormente, el túnel de la inter-estación "Hidalgo-Juárez" de la línea 3 es la más corta con tan solo 251 metros. Sin embargo, en términos de riesgos de incendio así como las posibles consecuencias en caso de un evento indeseable pueden ser considerables.

Al igual que en el caso anterior, se consideró la misma velocidad longitudinal dentro del túnel, así como también los mismos valores de Q, (H_{ce}), y (D_{dmo}).

Las distancias consideradas a la fuente de origen del incendio también fueron similares al criterio adoptado para el caso anterior y éstos se muestran en la figura 4.4. Además, los tiempos considerados fueron en los primeros 30 min desde que alcanzó el incendio un valor de $Q=20\text{kW}$.

$$x = \begin{cases} \frac{1}{4} l \\ \frac{1}{3} l \\ \frac{1}{2} l \end{cases} \quad \text{Ecuación 4.3.}$$

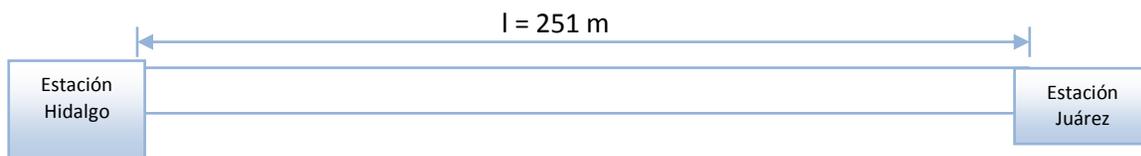
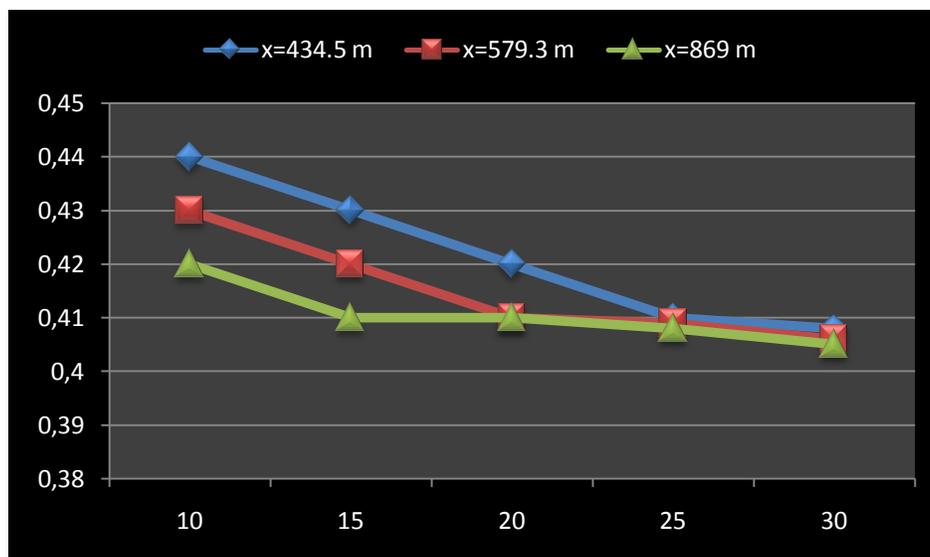


Figura 4.4 Escenario de incendio en el túnel entre las estaciones "Hidalgo" y "Juárez".
Elaboración propia.

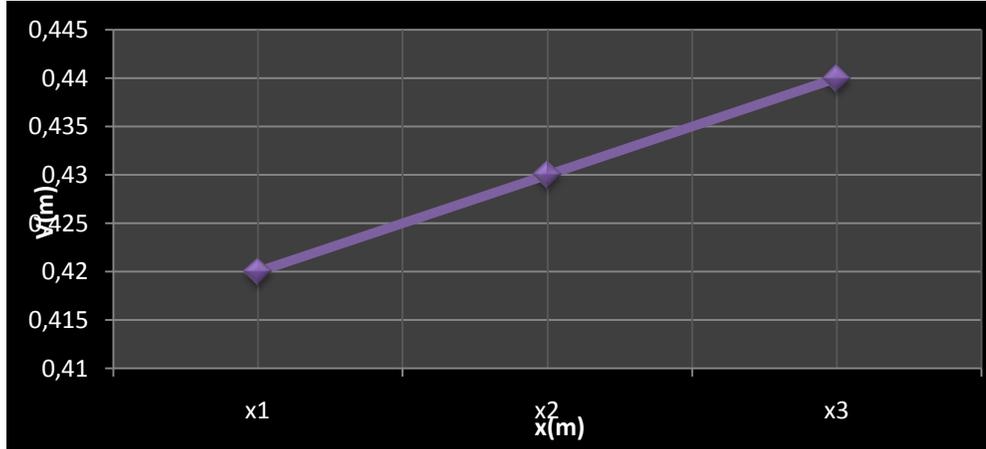


Grafica 4.4. Visibilidad para diferentes distancias y tiempos para el caso-2.
Elaboración propia.

La grafica 4.4 muestra los resultados del análisis para este caso. Como era de esperarse, al ser un túnel relativamente corto se muestra que la visibilidad decae considerablemente con el tiempo. Por ejemplo, en el caso cuando $x=125.5 \text{ m}$ en los primeros 10 min, la visibilidad es de aproximadamente 0.44 m. De manera similar ocurre para las distancias de 84 m y 125.5 m. Se puede apreciar en la figura que las tres distancias casi convergen en un valor de la visibilidad de 0.41 m para un $t= 30 \text{ min}$.

Por otro lado, la grafica 4.5 resume de alguna manera el comportamiento que se tiene de la visibilidad en relación a las distancias consideradas en este caso; es decir mientras más cercano se

encuentren las personas del origen del incendio menor será la visibilidad que se tenga. Todo lo contrario ocurre cuando las personas se encuentran más alejadas del lugar del incendio, es decir mayor será la visibilidad. La gráfica 4.8 muestra el caso para los primeros 10 min. (Además, $x_1=62.75\text{m}$; $x_2= 84 \text{ m}$; y $x_3= 125.5\text{m}$).



Grafica 4.5. Visibilidad para diferentes distancias y un tiempo de 10 min.
Elaboración propia.

4.1.2.4. Cálculo de la velocidad crítica de ventilación (V_c).

A continuación se presentan los resultados de la estimación de la velocidad crítica de acuerdo a cinco modelos que han sido desarrollados por diferentes investigadores ejemplo (Deberteix, et al. 2001; Kile, 1997; Karlsson, 2000; Heskestad, 1972, 1975; beard, et al. 2003, entre otros).

- **Modelo propuesto por Heselden.**

En el capítulo II, se presentó el modelo, aquí se reproduce nuevamente:

$$U_c = 0.8 \left(\frac{gQT}{C_p \rho_o T_o^2 W} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

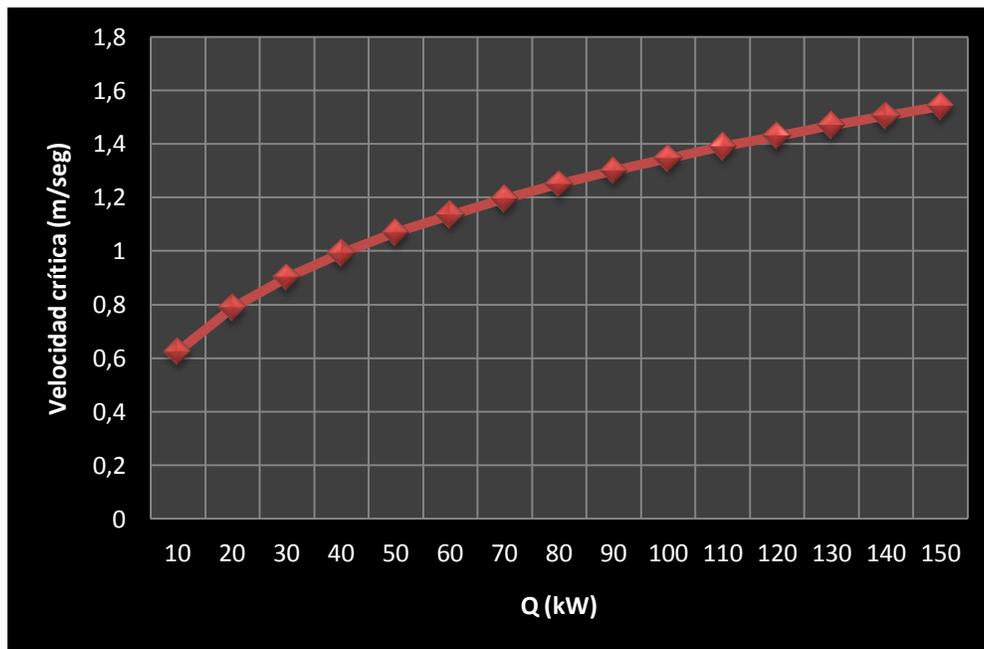
0.8	Valor constante	Adimensional
Q	Potencia del incendio	MW ó KW
ρ_o	Densidad	Kg/m ³
T_o	Temperatura del ambiente	°C
T	Temperatura de la capa de humos	°C
C_p	Calor específico de aire a presión constante	Kcal/Kg°C
W	Ancho del túnel	m

Para nuestro caso de estudio, los siguientes valores han sido considerados para cada una de las variables del modelo mostrado anteriormente:

Valores:

0.8	Adimensional
Q	5kW = 1.19423kcal/seg. Los kW se convierten a Kcal/seg.
ρ_o	1.3 Kg/m ³
T _o	27 °C
T	40 °C
C _p	0.24 Kcal/Kg°C
W	8.64 m
H	6.59 m
g	9.81m/seg ²

Los valores de la TLC, se variaron de 15kw a 150kw y los resultados se presentan en la grafica 4.6.



Grafica 4.6. Velocidad crítica-modelo Heselden.
Elaboración propia.

La gráfica 4.6 presenta el comportamiento de la velocidad crítica para diferentes valores de Q. Para el rango considerado de 10-150kW, la velocidad crítica varía de entre 0.6 a 1.55.

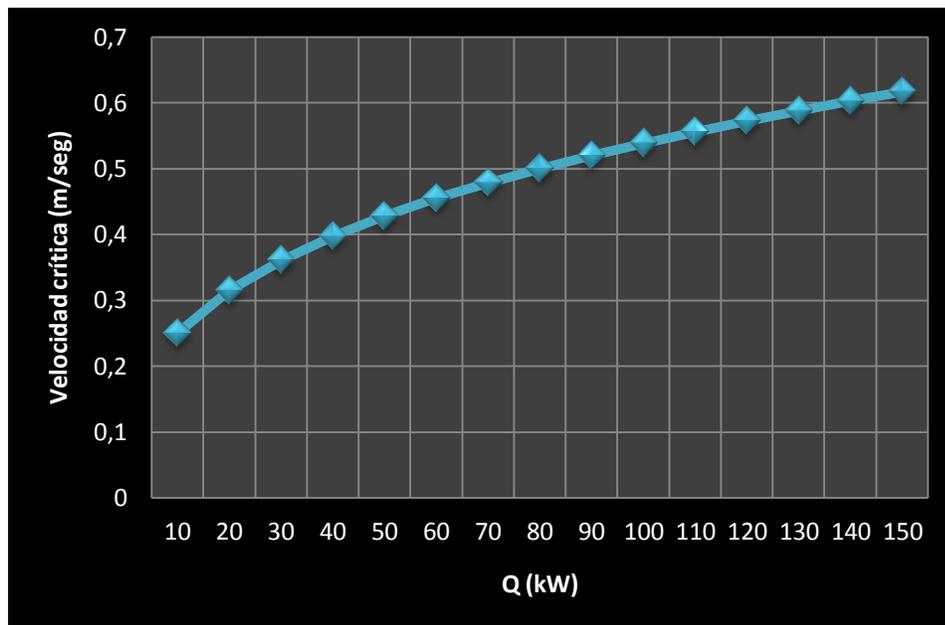
- **Modelo propuesto por Danzinger y Kennedy.**

$$U_c = K g k \left(\frac{gQH}{C_p \rho_o T A F r c} \right)^{1/3} \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

donde:

0.8	Adimensional
Q	5kW = 1.19423kcal/seg. Los kW se convierten a Kcal/seg.
ρ_o	1.3 Kg/m ³
T _o	27 °C
T	40 °C
C _p	0.24 Kcal/Kg°C
W	8.64 m
A	39.9533 m ²
Uc*	Propuesta 0.06359 m/seg
Kg	1 adimensional
k	0.61 adimensional
H	6.59 m
g	9.81 m/seg ²
Frc	0.35 adimensional

Al igual que en el caso anterior, el valor de Q se varió de 15kw a 150kw, los resultados se muestran en la gráfica 4.7.



Gráfica 4.7. Velocidad crítica-modelo Danzinger & Kennedy.
Elaboración propia.

Al igual que en caso anterior, el mismo rango de Q fue considerado y se observa que la velocidad crítica oscila entre 0.25-0.58 m/s.

- **Modelo propuesto por Oka.**

A continuación se presenta nuevamente el modelo propuesto por Oka para la determinación de la velocidad crítica.

$$V^* = \begin{cases} K_v \left(\frac{Q^*}{0.12} \right)^{1/3} & \text{para } Q^* \leq 0.12 \\ K_v & \text{para } Q^* > 0.12 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.7.}$$

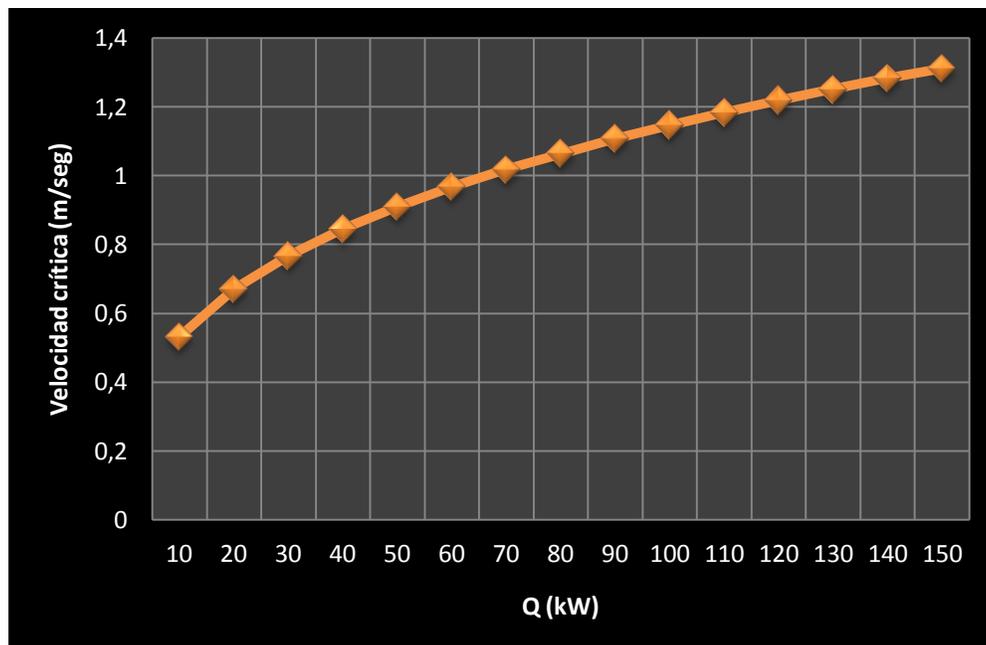
donde:

$$Q^* = \left(\frac{Q}{\rho \omega T \omega C p \sqrt{g H^5}} \right) \quad \text{Ecuación 2.8.}$$

$$V^* = \left(\frac{U_c}{\sqrt{g H}} \right) \quad \text{Ecuación 2.9.}$$

Dado que el modelo se obtuvo de un trabajo experimental por consiguiente es necesario llevar a cabo un escalonamiento mediante el empleo de la Ecuación 2.9. mostrada anteriormente.

Los resultados se muestran en la gráfica 4.8.



Gráfica 4.8. Velocidad crítica-modelo Oka & Atkinson.
Elaboración propia.

La velocidad crítica en el modelo de Oka & Atkinson varía entre 0.5 y 1.25 m/s para el mismo rango de valores de Q (10-150 kW).

- **Modelo propuesto por Kunsh.**

En el Capítulo 2 se presentó las consideraciones teóricas de la formulación del modelo propuesto por Kunsh. Los parámetros que considera el modelo son el TLC-a dimensional, Q^* , H (altura) y W (ancho) del túnel. A continuación se detallan los valores considerados.

$$U_c = C_3 \sqrt{C_1 \Delta T_\infty^*} * \frac{\sqrt{1 + \left[1 - \left(\frac{C_2}{C_1}\right)\right] \Delta T_\infty^* (Q^*)^{\frac{2}{3}}}}{1 + \Delta T_\infty^* (Q^*)^{\frac{2}{3}}} * (Q^*)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{gH} \quad \text{Ecuación 2.28.}$$

$$C_1 \cong 1 - 0.1 \left(\frac{H}{W}\right)$$

$$C_1 \cong 1 - 0.1 \left(\frac{6.59}{8.65}\right)$$

$$C_1 \cong \mathbf{0.9238}$$

$$C_1 \cong m/m$$

Adimensional

$$C_2 = 0.574 \frac{\left[1 - 0.1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]}{\left[1 + 0.1 \left(\frac{H}{W}\right)\right]} \left(1 - 0.2 \left(\frac{H}{W}\right)\right)$$

$$C_2 = 0.574 \frac{\left[1 - 0.1 \left(\frac{6.59}{8.59}\right)\right]}{\left[1 + 0.1 \left(\frac{6.59}{8.59}\right)\right]} \left(1 - 0.2 \left(\frac{6.59}{8.59}\right)\right) \quad C_2 = \frac{\left[\left(\frac{m}{m}\right)\right]}{\left[\left(\frac{m}{m}\right)\right]} \left(\frac{m}{m}\right)$$

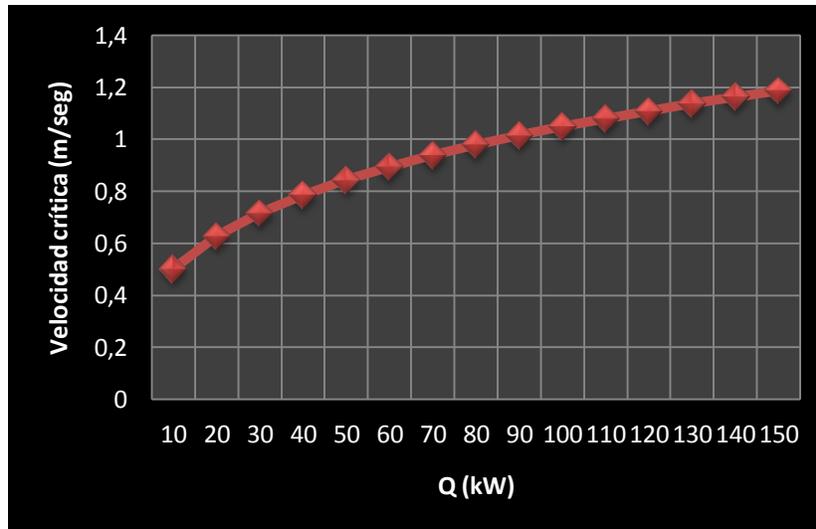
$$C_2 = \mathbf{0.4176} \text{ Adimensional}$$

$$C_3 = \mathbf{0.613} \text{ Adimensional}$$

$$\gamma = k = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$$

$$Q^* = \frac{\gamma - 1}{\gamma} * \frac{Q}{p \sqrt{gH^{\frac{5}{2}}}} = \text{adimensional}$$

Los resultados se muestran en la grafica 4.9. para los diferentes valores de la TLC (Q). Se puede observar que la velocidad crítica oscila entre los valores de 0.5 m/s a 1.2 m/s.



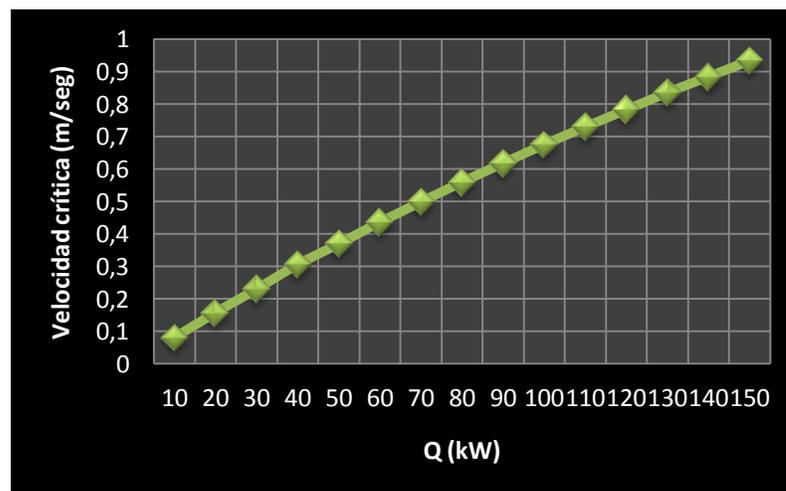
Grafica 4.9. Velocidad crítica-modelo Kunsch.
Elaboración propia.

- **Modelo propuesto por Roh.**

El modelo propuesto por Roh, a diferencia de los modelos presentados anteriormente, tiene la característica que considera como dato solamente Q.

$$U_c = \frac{-0.000845 + 8.1661Q}{1 + 2.094Q - 0.021Q^2} \quad \text{Ecuación 2.29}$$

La grafica 4.10. presenta los resultados de la aplicación del modelo. Al igual que los resultados del modelo de Danzinger, los valores obtenidos para la velocidad crítica son menores a 1; esto es, los valores obtenidos caen entre 0.07 y 0.83 m/s. cabe destacar que fueron los mismos datos de entrada para todos los casos.



Grafica 4.10. Velocidad crítica-modelo de Roh.
Elaboración propia.

4.1.3. Fase 3. Obtención de una solución y prueba del modelo.

Una vez realizados los cálculos de la velocidad crítica de ventilación para los diferentes valores de Q (Potencia del incendio), en los diferentes modelos. Se presenta la tabla 4.1. Tabla de resultados de la velocidad crítica, mostrando los resultados obtenidos para Q igual a 10kwatts hasta 150 kwatts.

Tasa de Liberación de Calor (TLC) [kW]	Modelo Propuesto por Heselden	Modelo propuesto por Danziger & Kennedy	Modelo propuesto por Oka & Atkinson	Modelo propuesto por Kunsh	Modelo propuesto por Roh
10	0.6251	0.2522	0.5316	0.5081	0.0791
20	0.78765	0.3151	0.6698	0.6285	0.1559
30	0.90164	0.3607	0.7668	0.7166	0.2297
40	0.9923	0.3970	0.8439	0.7861	0.306
50	1.069	0.4277	0.9091	0.84402	0.3688
60	1.135	0.4554	0.9661	0.894	0.434
70	1.195	0.4785	1.017	0.9387	0.4978
80	1.25	0.500	1.063	0.9788	0.558
90	1.30	0.5203	1.106	1.015	0.6177
100	1.346	0.5389	1.145	1.049	0.6746
110	1.39	0.5563	1.1824	1.080	0.7295
120	1.43	0.5727	1.217	1.109	0.7826
130	1.47	0.5881	1.25	1.137	0.834
140	1.506	0.6029	1.2814	1.163	0.883
150	1.541	0.6169	1.31	1.187	0.933

Tabla 4.1. Tabla de resultados de la velocidad crítica.
Elaboración propia.

La variación de estos resultados depende de que los autores, consideran diferentes variables según su ecuación como pueden ser: el ancho, el alto, el área y la pendiente del túnel, además de algunos factores de corrección.

Con los resultados obtenidos en la tabla 4.1. Tabla de resultados de la velocidad crítica, se presenta el grafico 4.11.Grafica de velocidades críticas de ventilación, en donde se puede observar el comportamiento de los resultados obtenidos.

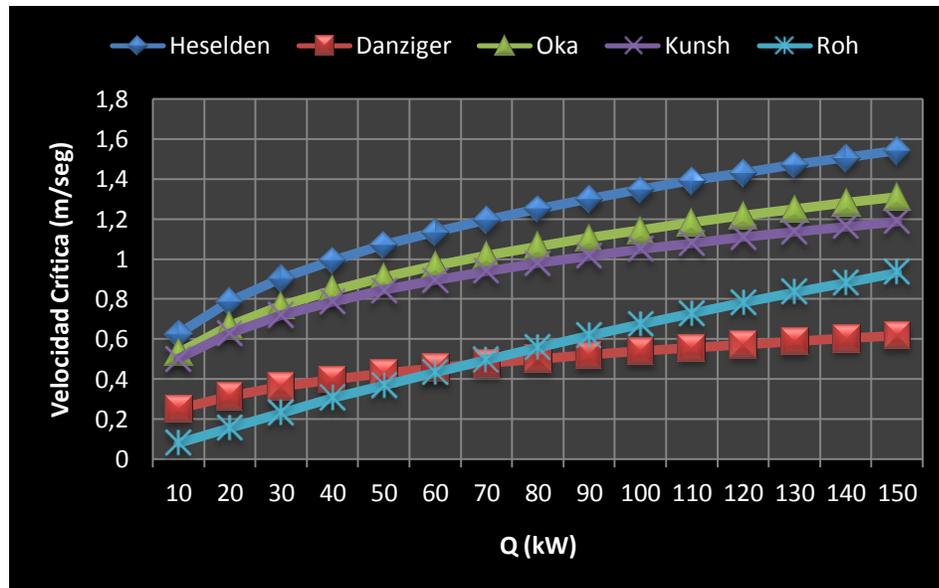


Gráfico 4.11. Resumen de velocidades críticas de los modelos empleados.
Elaboración propia.

Como podemos observar en la grafica 4.11. Grafica de velocidades críticas de ventilación, el comportamiento de las velocidades si varía una de otra debido a los datos requeridos para los cálculos. El Capítulo V presenta una discusión de los resultados obtenidos en esta sección.

4.1.4. Fase 4. Implantación y control de la solución.

Dada la variedad de variables involucradas en el análisis de los diferentes escenarios de riesgos de incendio en túneles del metro de la Ciudad de México, fue necesario el desarrollo de un software. El software permitió realizar las estimaciones de la velocidad crítica y de las otras variables de una manera más eficiente. Cabe destacar que en este capítulo se presentaron los resultados de dos escenarios para el caso de la visibilidad; sin embargo las longitudes de los túneles varía considerablemente. Así que el software es de gran utilidad para este estudio.

El software que a continuación se va a desarrollar se realiza en Visual Basic 6.0. Los elementos que se utilizaran para el cálculo de la velocidad crítica de ventilación son:

- CommandButton (1 al 7 en orden descendente).
- Frame (1 y 2 de izquierda a derecha).
- Label (1 al 28 en orden descendente y de izquierda a derecha).
- TextBox (1 al 16 en orden descendente y de izquierda a derecha).

La siguiente figura 4.5. Interfaz grafica del software Velocidad Crítica de Ventilación, muestra la interfaz grafica del software, mostrando la distribución de cada uno de nuestros elementos elemento.

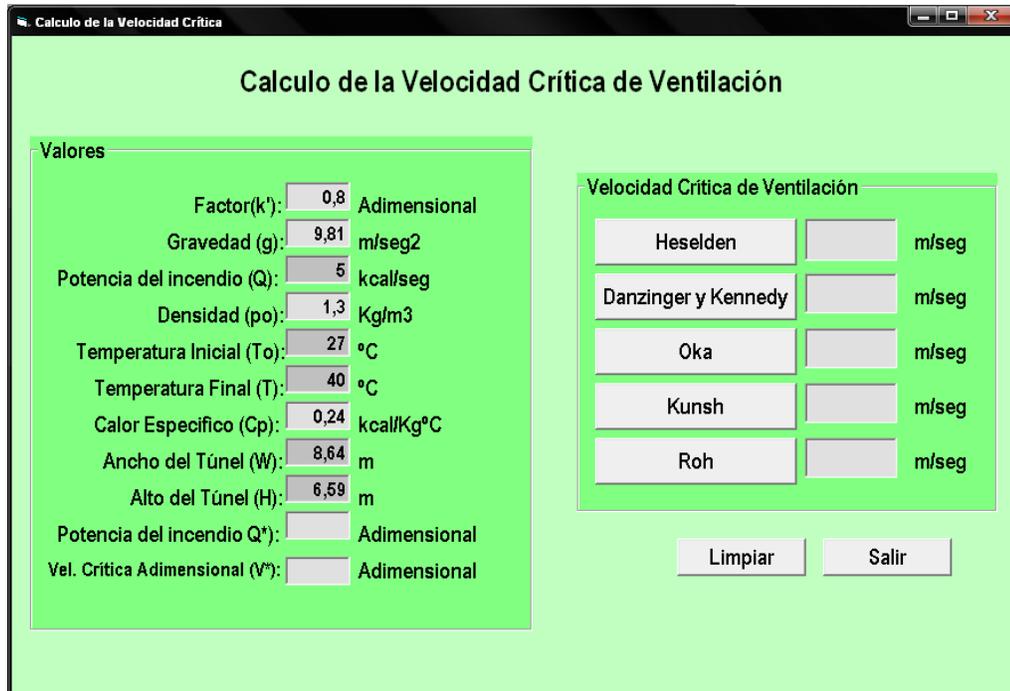


Figura 4.5. Interfaz grafica del software, Velocidad Crítica de Ventilación. Elaboración propia.

Ahora se van a describir cada una de las funciones de nuestros elementos que compone el software presentado en la figura anterior 4.5. Interfaz grafica del software Velocidad Crítica de Ventilación.

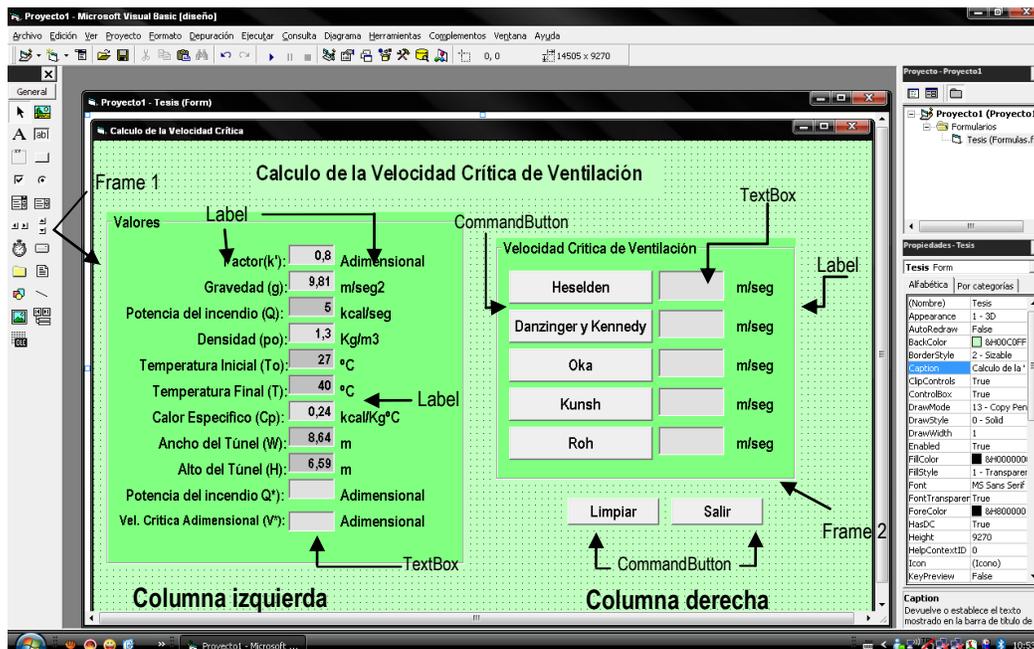


Figura 4.6 Descripción de las funciones del software, Velocidad Crítica de Ventilación. Elaboración propia.

El software se compone por dos columnas, la columna de la izquierda consta de los valores que se requieren para el cálculo de la velocidad crítica de ventilación según el autor a utilizar, los campos que se observan en sombreado de color gris son campos dinámicos, es decir son TextBox, en los cuales escribiremos los diferentes valores que pueden tomar de acuerdo a las características que se presenten en nuestros escenarios de estudio, dichos valores son:

- Potencia del incendio (Q)
- Temperatura Inicial (To)
- Temperatura final (T)
- Ancho del túnel (W)
- Alto del túnel (H)

La columna derecha se compone de CommandBoton, a los cuales se les designo el nombre de cada uno de nuestros autores, que al ser presionados realizan el cálculo de sus ecuaciones, dando como resultado la velocidad crítica de ventilación. Ver figura 4.6. Descripción de las funciones del software Velocidad Crítica de Ventilación.

CommandButton.

Command1 CommandButton: "Heselden", calcula la velocidad crítica de ventilación según el autor Heselden.

Command2 CommandButton: "Danzinger y Kennedy", calcula la velocidad crítica de ventilación según el autor Danzinger y Kennedy.

Command3 CommandButton: "Oka", calcula la velocidad crítica de ventilación según el autor Oka.

Command4 CommandButton: "Kunsh", calcula la velocidad crítica de ventilación según el autor Kunsh.

Command5 CommandButton: "Roh", calcula la velocidad crítica de ventilación según el autor Roh.

Command6 CommandButton: "Limpiar", borra los contenidos de los TextBox del lado derecho.

Command7 CommandButton: "Salir", cierra o sale del software.

Label.

Label # Label: Label del 1 al 28, contienen los títulos de nuestros valores y sus unidades.

TextBox.

Text # TextBox: Text del 1 al 16 en orden descendente y de izquierda a derecha, los del lado izquierdo contienen los valores que se utilizan para los cálculos de la velocidad crítica y los de la derecha presentan dichos resultados. De los TextBox que se localizan del lado izquierdo, algunos están sombreados de color gris oscuro, estos TextBox tienen la opción de cambiar sus valores, estos TextBox son:

- **Text2 TextBox:** Se pondrá el valor de la potencia del incendio (Q).
- **Text4 TextBox:** Se pondrá el valor de la temperatura Inicial (To).
- **Text5 TextBox:** Se pondrá el valor de la temperatura final (T).
- **Text7 TextBox:** Se pondrá el valor del ancho del túnel (W).
- **Text8 TextBox:** Se pondrá el valor del alto del túnel (H).

Del lado izquierdo se encuentran los TextBox que contendrán los resultados de la velocidad crítica de cada autor.

- **Text11 TextBox:** Resultado de la velocidad crítica de ventilación del autor Heselden.
- **Text12 TextBox:** Resultado de la velocidad crítica de ventilación del autor Danzinger y Kennedy.
- **Text13 TextBox:** Resultado de la velocidad crítica de ventilación del autor Oka.
- **Text14 TextBox:** Resultado de la velocidad crítica de ventilación del autor Kunsh.
- **Text15 TextBox:** Resultado de la velocidad crítica de ventilación del autor Roh.

En la siguiente figura 4.7. Software, Calculo de la Velocidad Crítica de Ventilación, se muestra como se presentan los resultados obtenidos al calcular la velocidad según los diferentes autores.

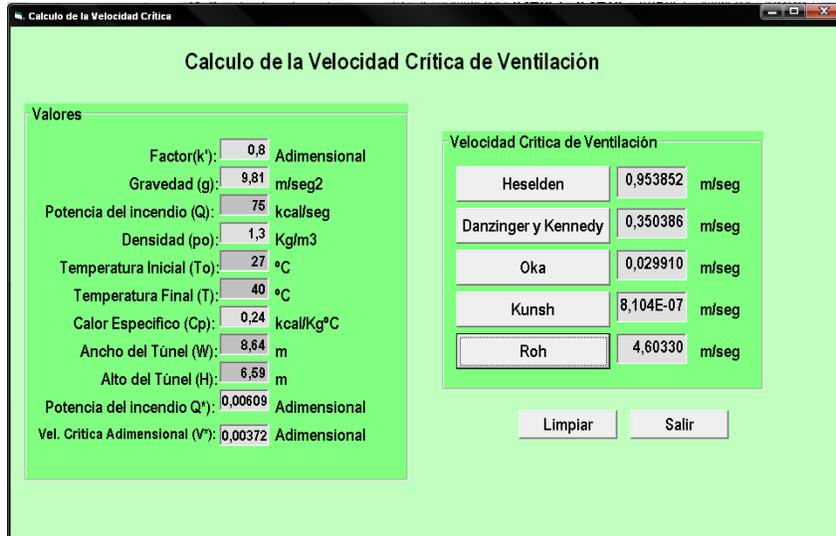


Figura 4.7. Software, Calculo de la Velocidad Crítica de Ventilación.
Elaboración propia.

Capítulo V. Discusión, Conclusiones y Futuro Trabajo.

Al final, no nos acordaremos tanto de las palabras de nuestros enemigos,
sino de los silencios de nuestros amigos.

(Martin Luther King, Jr.)

Capítulo V.

Discusión, Conclusiones y Futuro Trabajo.

5.1. Discusión.

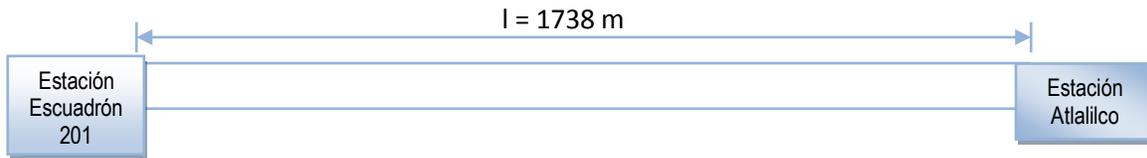
5.1.1 Gases tóxicos, visibilidad, backlayering, velocidad crítica.

Este trabajo de tesis se enfocó a los riesgos asociados con un incendio en túneles, tales como el caso del Sistema de transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México. Según las estadísticas mostradas en el capítulo I, ha habido un número de incendios en túneles de Metro en diferentes ciudades del mundo (ver sección 1.3 del capítulo I). Algunos de ellos no ocasionaron muertes; sin embargo han provocado la interrupción de la operación de dichos sistemas y afectando a miles de personas (ver por ejemplo la gráfica 1.1 del capítulo I, donde muestra la afluencia de personas que hacen uso de este modo de transporte; otros países del mundo tienen cifras similares). En algunos otros casos, los incendios han ocasionado muerte, así como daños considerables a las instalaciones; además de la interrupción de operaciones. Por ejemplo, el incendio del metro en Daegu, Corea del Sur en 2003, causó la muerte a 192 personas y 148 lesionados. De manera similar, un corto circuito otras 148. De manera similar, en 1995, un incendio provocado por un corto circuito en dos vagones del muerto ocasionó la muerte de 289 personas y cientos de lesionados.

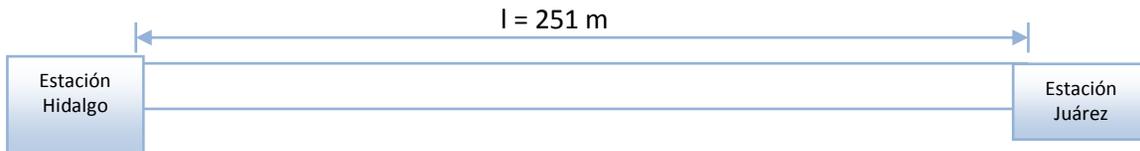
Como se mencionó en el capítulo II, un riesgo incendio siempre está presente en este tipo de sistemas. Por ejemplo, una chispa eléctrica o un corto circuito son peligros potenciales que aunados con suficiente combustible pueden y han causado incendios en los vagones de metro. Por otro lado, cuando un incendio ocurre se producen gases tóxicos que cuando se tienen concentraciones muy grandes, causan la muerte de una persona (por ejemplo, una concentración de 3000 ppm del CO). En este proyecto de tesis se abordó este problema y la gráfica 4.1 del capítulo III muestra el comportamiento de la concentración del CO en relación al tiempo de exposición. Claramente se observa que conforme aumenta la cantidad de CO, se puede argumentar que una persona difícilmente logra sobrevivir en un tiempo mayor a 10 min.

Por otro lado, la visibilidad (medido en 'm') es otro factor muy importante en un incendio en túneles. Dada su importancia, el presente proyecto evaluó la visibilidad en el caso de un incendio en los siguientes dos escenarios para el caso de estudio (se reproducen nuevamente las figuras del capítulo IV):

Caso-1: Túnel de la inter-estación "Escuadrón 201-Atlalilco". Este túnel es el más largo del STCM .



Caso-2: Túnel de la inter-estación "Hidalgo-Juárez". Este túnel es el más corto del STCM.



Es decir, se consideraron los casos extremos, el túnel más largo (Caso-1) y el más corto (Caso-2). Además, en el análisis se consideró un valor de TLC (Tasa de Liberación del Calor) 20MW así como diferentes distancias consideradas a partir de la fuente del incendio; esto es 1/4, 1/2 y 3/4 de la longitud total del túnel. Los resultados se muestran en las figuras 4.3 y 4.4 respectivamente. Para ambos casos, el comportamiento que se tienen de la visibilidad es que conforme aumenta el tiempo para una misma distancia, el nivel de visibilidad disminuye considerablemente. Por ejemplo, en uno de los varios escenarios analizados se encontró que a una distancia 434.5 m de la fuente del incendio, en los primeros diez minutos, la visibilidad es de 0.63 m y al aumentar la distancia (579.3 m) para el mismo tiempo la visibilidad aumenta (aproximadamente 0.8 m). Este resultado es significativo, porque cuando una persona o personas quieran evacuar en un momento dado, la visibilidad juega un papel importante. En el ejemplo, 0.63 m de visibilidad es muy difícil evacuar y según investigación que se ha llevado a cabo en esta área, si la visibilidad es menor a 10 m, la personas no evacuan en esa dirección por lo que tienen a regresarse y buscar una mejor visibilidad.

Como se mencionó en el capítulo II y IV, el fenómeno de *backlayering* es de crucial importancia, ya que si no se considera en un análisis de riesgos de incendio en túneles como el sistema metro, puede y ha causado que en caso de incendio las personas queden atrapadas en los gases tóxicos generados por el incendio. El presente proyecto, llevó a cabo un análisis también de este fenómeno. Los resultados se presentan a detalle en el capítulo IV; por ejemplo, en uno de los varios escenarios que se analizaron mostró que la distancia del *backlayering* para un $Q = 20\text{MW}$, fue de más de 30 m, lo cual quiere decir que es casi difícil de evacuar. Dado, esto es importante evitar este fenómeno y es por eso que se analizó el concepto de la "velocidad crítica", la cual si es bien analizada, garantiza que no ocurra el fenómeno de *backlayering*.

Dado lo anterior, en este proyecto de investigación, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura para entender los diferentes modelos matemáticos que han sido propuestos por diferentes investigadores a nivel mundial respecto a este concepto, por ejemplo (Deberteix, et al. 2001; Kile, 1997; Karlsson, 2000; Heskestad, 1972, 1975; beard, et al. 2003, entre otros). Los resultados se presentaron a detalle en el capítulo IV.

Como se describió en el capítulo IV, los resultados de la aplicación de los modelos propuestos y usados en el presente trabajo mostraron discrepancias aún con las mismas consideraciones. Por ejemplo, para un escenario en particular de un incendio en un túnel con un TLC=0.1 MW (100 kW); H=6.6 m; W=8.64, y con los valores de densidad, temperatura y constantes usados (ver capítulo IV), los resultados mostraron lo siguiente:

Tasa de Liberación de Calor (TLC) [kW]	Modelo Propuesto por Heselden	Modelo propuesto por Danziger & Kennedy	Modelo propuesto por Oka & Atkinson	Modelo propuesto por Kunsh	Modelo propuesto por Roh
100	1.346	0.5389	1.145	1.049	0.6746

Tabla 5.1. Resumen de resultados de la velocidad crítica para un escenario en particular. Elaboración propia.

De la tabla anterior se puede observar que los modelos que tienen a coincidir en la estimación de la velocidad crítica son los de Heselden (1.346 m/s), Oka & Atkinson (1.145), y Kunsch (1.049). Por otro lado, los valores obtenidos mediante la aplicación de los otros dos modelos son los siguientes: Roh (0.6746), Danziger & Kennedy (0.5389).

De lo anterior surge la siguiente pregunta, ¿qué valor de velocidad crítica debe ser considerado para un escenario en particular?

Claramente, la respuesta a la pregunta resulta difícil ya que la persona o personas que toman decisiones tienen que ser expertos en el área para tomar la decisión adecuada.

5.1.2 Sistema de control del incendio.

De los resultados presentados en este proyecto, se puede argumentar que el control del incendio así como el humo es de gran importancia para evitar la pérdida de vidas humanas que pueden ser causados por un incendio en un sistema como el caso del metro. En el capítulo II se abordó con detalle un componente del sistema de control del humo y del incendio; esto es los sistemas de ventilación (ver sección 2.1.5).

Lo anterior quiere decir que en caso de que ocurra un incendio, se puede determinar la velocidad crítica para evitar el fenómeno de *backlayering* y así activar cualquier modo de ventilación que garantice el flujo de aire fresco con esta velocidad garantizar una evacuación segura.

Sin embargo, es necesario que exista otro sistema que tenga la capacidad de identificar el incendio y esto se presenta a continuación.

En general, hay dos tipos de sistemas de protección contra incendios; estos son: protección pasiva y la protección activa. La protección pasiva implica a todos aquellos aspectos que están implícitos en el sistema; por ejemplo, material del vagón del metro altamente resistente al fuego. Por otro lado, los sistemas de protección activa son todos aquellos que tienen que ser activados por un sistema de control, por ejemplo, para identificar un incendio. Por ejemplo, un alarma contra incendio. En el caso particular, del metro, efectivamente debe haber los dos tipos de sistemas.

Los sistemas de detección de incendios pueden ser de tres tipos:

1. Detectores de calor
2. Detectores de humo
3. Detectores de flamas

Por otro lado, existen métodos de supresión del incendio y estos son:

1. enfriamiento
2. eliminación del oxígeno
3. separación del oxígeno de la fuente de combustible

En general debe de haber un sistema integral que conjugue todos estos elementos y así garantizar un funcionamiento efectivo del sistema en caso de que se presente un incendio.

5.2. Conclusiones.

El objetivo de la presente tesis era realizar un estudio de los riesgos asociados con un incendio en el caso del Metro de la Ciudad de México. Un número importante de variables críticas han sido analizadas y evaluadas. también, se llevó a cabo un análisis de la velocidad crítica usando diferentes modelos. Dado esto, las principales conclusiones de este proyecto de tesis se resumen a continuación:

- El riesgo de incendio en el STCM de la Ciudad de México está latente en todo momento.
- Un incendio en un túnel como el de las interestaciones es muy difícil de controlar si no se tienen en cuenta las variables críticas como las que se abordaron en el presente proyecto de tesis.
- Además, no es suficiente conocer las variables presentadas en este proyecto, pero también deben de considerarse dentro de un sistema integral de sistemas de prevención y protección contra incendios.
- Las personas o persona que tome decisiones en el ámbito de protección civil contra incendios en el STCM debe de ser altamente capacitada ya que una decisión equivocada puede (y ha habido casos) tener muy graves consecuencias en términos de vidas humanas. (Ver por ejemplo, la sección de discusión de la velocidad crítica).
- Se desarrolló un software que permite evaluar las diferentes variables asociados con los riesgos de incendio para el caso del Metro.

5.2.1. Limitaciones

- Antes de concluir es necesario mencionar que durante el trabajo de tesis no encontramos con la falta de información necesaria para poder llevar a cabo un análisis más a detalle.
- Algo con lo que nos topamos es la falta de información en cuanto al los sistemas existentes de prevención y protección en el sistema bajo estudio; esto pudo haber contribuido a una mayor discusión acerca de los resultados encontrados en este proyecto de investigación.

5.3. Futuro Trabajo.

Dada la complejidad del problema, hay muchos aspectos que se pueden mejorar en el presente trabajo. Algunos provienen de las propias limitaciones con las que nos encontramos y otros de fenómenos

aún no tomados en cuenta y que, dada la naturaleza del problema, hacen posible considerarlos de una forma abordable.

Quizás algo que se podría considerar es encontrar la manera de ajustar los coeficientes manejados en cada modelo presentado. Esto implica diferentes comparaciones numéricas y experimentales con distintos tipos de túneles, de diferente geometría, velocidades de ventilación y magnitud de incendio.

De entre las limitaciones propias del modelo, cabe mencionar el hecho de que se trata de un estudio estático, de ser posible sería bueno poder realizar ensayos experimentales.

Aspectos no tomados en cuenta y que podría ayudar a mejorar el modelo serían: efecto de la pendiente, estudio del tiro natural, efectos de la presencia de obstáculos (trenes), análisis de las condiciones meteorológicas en las bocas (sobre todo su efecto en la presión y velocidad de aire), mejorar la zona de transición entre la zona del penacho y la de difusión, para el posible estudio transitorio tener en cuenta el movimiento inducido antes del incendio por los vehículos en movimiento.

Algunos de los puntos anteriores se consideran indirectamente a través de la velocidad longitudinal del aire impuesta, ya que su efecto final sería aumentar o disminuir la velocidad de la corriente. Actualmente, ese efecto de aceleración o frenado no se calcula y habría que darlo como dato.

Todo lo descrito anteriormente, señala las múltiples vías que se podrían seguir para mejorar el trabajo de tesis presentado. En muchos casos son temas complementarios que no requerirían modificar esencialmente el modelo, mientras que en otros lo que se abrirían serían nuevas líneas de actuación que modificarían esencialmente la presente tesis.

Finalmente, un estudio desde el punto de vista de la dinámica de los gases producidos en un incendio en un túnel podría ser beneficioso en el entendimiento del fenómeno, por ejemplo, de *backlayering*, entre otros. Las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos y que podrían ser usados para tener un mejor entendimiento del comportamiento de los gases tóxicos en un túnel, son los siguientes:

Conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0$$

Conservación de momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho B_i$$

Conservación de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \dot{q}_j^R \right)$$

Conservación de especies:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_\alpha) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} \right) + S_\alpha$$

Ecuación de estado:

$$P = \rho RT$$

Donde ρ representa la densidad; u_i representa la velocidad del gas en la dirección x_i ; τ_{ij} representa el tensor de esfuerzos; B_i representa las fuerzas del cuerpo en la dirección x_i ; h representa la entalpía; λ representa la conductividad de calor; c_p representa la constante de capacidad de calor específico a una presión constante; \dot{q}_j^R representa el flujo de calor debido a la radiación térmica; Y_α representa la fracción molar de especies α , and S_α .

Referencias Bibliográficas y Webgrafía.

La derrota no tiene amigos, el triunfo tiene miles.
(Anónimo).

Referencias Bibliográficas y Webgrafía.

1985. [aut. libro] Francisco y Castañeda Narváez, Carlos Noreña Casado. *Planeación y construcción en líneas de metro*. México : s.n., 1985, págs. 9-64.

2010. Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes. *Datos de operación*. [En línea] 17 de Marzo de 2010. [Citado el: 17 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/index.html>.

2010. Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes. *Datos de operación*. [En línea] 17 de Marzo de 2010. [Citado el: 17 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/conformactren.html>.

Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes. [En línea] [Citado el: 26 de mayo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/clasestacxtipo.html>.

Bali, Jaime. 2006. *El metro de la Ciudad de México*. México : Gobierno del Distrito Federal, 2006.

C, Weimer Richard. 1996. *Estadística*. D.F. : Continental, 1996.

Campos Arenas, Agustín. 2005. *Mapas conceptuales mapas mentales y otras formas de presentación del conocimiento*. Bogotá : Magisterio, 2005.

César, Ramírez Cavassa. 1991. *Seguridad Industrial. Un enfoque Integral*. D.F. : Limusa, 1991.

2009. Cinco personas intoxicadas muy leves en un incendio del metro de Madrid- 20minutos.es. [En línea] 29 de Diciembre de 2009. [Citado el: 23 de Enero de 2010.] <http://www.20minutos.es/noticia/596518/0/intoxicadas/incendio/metro/>.

2009. Cinco personas intoxicadas muy leves en un incendio del Metro de Madrid- 20minutos.es. [En línea] 29 de Diciembre de 2009. [Citado el: 23 de Enero de 2010.] <http://www.20minutos.es/noticia/596518/0/intoxicadas/incendio/metro/>.

Comite de riesgo. Área de Seguridad e Higiene. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre 2010 de 2010.] <http://www.odon.uba.ar/comiteriesgo/instructivoextincion.pdf>.

Dirección General de Protección y Emergencias. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2010.] http://www.proteccioncivil.org/es/DGPCE/Informacion_y_documentacion/informes/tuneles/proyec04-02.htm.

Educativa, Dirección General de Televisión. 2007. *Un temblor de 7 grados sacude a la Ciudad de México*. 2007.

El incendio es una de las amenazas más peligrosas para los ocupantes . [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2010.] http://www.tdb.es/webTecnica/introd_inc.htm.

1989. *El metro y las finanzas*. México : Instituto de Investigaciones Económicas, 1989.

1989. Evolución de la transportación en la Ciudad de México. *Metro metropoli México*. México, D.F. : Instituto de Investigaciones Económicas, 1989. pág. 17.

1975. Fueron 86 los heridos. *La prensa*. 21 de Octubre de 1975, pág. 3.

Galagovsky Kurman, Lydia R. 1998. *Redes conceptuales aprendizaje, comunicación y memoria*. Buenos Aires : Lugar Editorial, 1998.

García Ferrer, Carlos Alberto. 1990. *Túneles planeación, diseño y construcción*. México : Limusa, 1990. pág. 219. Vol. 2.

1968. *General Systems Theory*. 1968.

Guiar- Legislación- Directiva 96/82/CE DEL CONSEJO, DE 9 DE DICIEMBRE DE 1996. [En línea] [Citado el: 2010 de Mayo de 30.] http://www.unizar.es/guiar/1/Legisla/D96_82.htm.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea1.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea2.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea3.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea4.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea5.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea6.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea7.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea8.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/linea9.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/lineaA.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est. *Red*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/lineaB.html>.

2010. Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, estaciones, correspondencias, est. *Red del Sistema de Transporte Colectivo*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 2010 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/red/index.html#h>.

Incendio en la estación de metro de King's Cross. 1991. 1991, Fuego, pág. 8.

2004. Incendio en la línea 4 del metro, México, esmas. [En línea] 31 de Diciembre de 2004. [Citado el: 30 de Enero de 2010.] <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/415613.html>.

2004. Incendio en la línea 4 del Metro, México, esmas. [En línea] 31 de Diciembre de 2004. [Citado el: 30 de Enero de 2010.] <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/415613.html>.

2007. Incendio en metro de París provocó alarma. [En línea] 30 de Julio de 2007. [Citado el: 25 de Enero de 2010.] http://es.wikinews.org/wiki/Incendio_en_metro_de_Par%C3%ADs_provoc%C3%B3_alarma.

Johannsen, O. 1975. *Introducción a la Teoría General de Sistemas*. Chile : Universidad de Chile, 1975.

L., Chao Lincoln. 2000. *Introducción a la estadística*. D.F. : Continental, 2000.

2006. Los peores accidentes de metro en el mundo. [En línea] 4 de Julio de 2006. [Citado el: 30 de Enero de 2010.] <http://edant.clarin.com/diario/2006/07/03/um/m-01227143.htm>.

2006. Los principales accidentes en el mundo. [En línea] 03 de Julio de 2006. [Citado el: 05 de Febrero de 2010.]

http://www.elpais.com/articulo/espana/principales/accidentes/metro/mundo/elpepuesp/20060703elpepunac_7/Tes.

Luis, Pou Marin. 1978. *La protección contra incendios en la construcción*. Barcelona : Técnicos Asociados, 1978. págs. 17-19.

2007. Metro (Sistema de transporte). [En línea] 17 de Abril de 2007. [Citado el: 22 de Febrero de 2010.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_\(sistema_de_transporte\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_(sistema_de_transporte)).

2007. Metro sistema de transporte. [En línea] 17 de Abril de 2007. [Citado el: 22 de Febrero de 2010.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_\(sistema_de_transporte\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_(sistema_de_transporte)).

2007. Metro Sistema de transporte. [En línea] 17 de Abril de 2007. [Citado el: 22 de Febrero de 2010.] [http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_\(sistema_de_transporte\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_(sistema_de_transporte)).

Metro, Sistema de Transporte. 2009. *Planos por Estación*. México D.F. : s.n., 2009.

Navarra, Bomberos de. 2003. *Extinción de Incendios*. 10 de Diciembre de 2003.

2010. Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red SCT Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion5.html>.

2010. Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red de STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion6.html>.

2010. Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de. *Costo del boleto*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/costoboleto.html>.

2010. Organismo, mensaje de la dirección general ¿Quiénes somos?, organigrama del stc, directorio de. *Costo del boleto*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/costoboleto.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red del STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion1.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red de STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion2.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red del STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion3.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama del stc, directorio de. *Etapas de construcción de la red SCT Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion4.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama delstc,directorio de. *Etapas de construcción de la red del STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion1.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama delstc,directorio de. *Etapas de construcción de la red de STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion2.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama delstc,directorio de. *Etapas de construcción de la red del STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion3.html>.

2010. Organismos, mensajes de la dirección general, ¿Quiénes somos? organigrama delstc,directorio de. *Etapas de construcción de la red STC Metro*. [En línea] 14 de Marzo de 2010. [Citado el: 14 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/organismo/construccion4.html>.

2008. Principales sistemas de metro en términos de pasajeros. [En línea] 17 de Abril de 2008. [Citado el: 22 de Febrero de 2010.] http://es.enc.tfode.com/Principales_sistemas_de_metro_en_t%C3%A9rminos_de_pasajeros.

Química del Fuego. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2010.] <http://usuarios.multimania.es/galapagar/quimica.html>.

Rene, Bayon. 1987. *La protección contra incendios en la construcción*. Barcelona : Técnicos Asociados, 1987.

Sabias que...#10. [En línea] [Citado el: 30 de Marzo de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/sabias/linea12c.html#10>.

2004. Se descarrilan dos vagones del metro, esmas. [En línea] 21 de Diciembre de 2004. [Citado el: 04 de Febrero de 2010.] <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/414084.html>.

2004. Se descarrilan dos vagones del Metro, esmas. [En línea] 21 de Diciembre de 2004. [Citado el: 04 de Febrero de 2010.] <http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/414084.html>.

Sistema de Transporte Colectivo - metro de la Ciudad de México, mapa de la red, historia del metro. *Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes*. [En línea] [Citado el: 28 de Agosto de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/cifrasoperacion.html#5>.

Sistema de Transporte Colectivo - Metro de la Ciudad de México, mapa de la red, historia del metro. *Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes*. [En línea] [Citado el: 28 de Agosto de 2010.] <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/cifrasoperacion.html#5>.

2008. *Sistema de Transporte de la Ciudad de México*. México : Ciudad de México, 2008.

Teoría de Sistemas, Nuevo Paradigmas: Enfoque de Niklas Luhmann. Arnold, M. 1989. 1989, Revista Paraguaya de Sociología, págs. 51-72.

2007. Teoría General de Sistemas. *Principios Básicos de Teoría y Metodología de Sistemas.* s.l., Cartagena de Indias : Universidad Tecnológica de Bolívar, 12 de Julio de 2007.

2006. Tragedia en Valencia: 42 vidas perdidas en una línea. *El País.* 06 de Julio de 2006.

Triangulo y tetraedro de fuego. [En línea] [Citado el: 05 de Septiembre de 2010.] <http://www.expower.es/triangulo-tetraedro-fuego.htm>.

2009. Un incendio en el metro de Basauri provoca una gran humareda. Deia. Noticias de Bizkaia. [En línea] 04 de Noviembre de 2009. [Citado el: 23 de Enero de 2010.] <http://www.deia.com/2009/11/04/bizkaia/sucesos/un-incendio-en-el-metro-de-basauri-provoca-una-gran-humareda>.

Un incendio en el metro de Chicago. [En línea] [Citado el: 17 de noviembre de 2010.] http://actualidad.rt.com/actualidad/ee_uu/issue_10189.html.

2007. Un muerto y nueve heridos en accidente en el metro de Caracas. *La prensa.* 30 de Julio de 2007, pág. Internacionales.

Van Wylen Gordon J, Sonntag E. Richard. 1998. *Fundamentos de termodinámica.* México : Limusa, 1998.

Virgil, moring Faires. 1999. *Termodinámica.* México : Hispano Americana, 1999.

Virgilio, Hernandez Forte. 2007. *Mapas conceptuales la gestión del conocimiento en la didáctica.* D.F. : Alfaomega, 2007.

Deberteix, P., Gabay, D., Blay, D. 2001. Experimental study of fire-induced smoke propagation in a tunnel in the presence of longitudinal ventilation, in: Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape fro, Tunnels, Washington, pp. 257–265.

Kile, G.K. & Gonzalez, J.A. 1997. The Memorial tunnel fire ventilation test program: the longitudinal and natural tests, ASHRAE Transactions 103 (1997) 701–713.

Karlsson, B. & Quintiere, J.G..2000. Enclosure Fire Dynamics, CRC Press, Washington, 2000, pp. 53–64.

Heskestad, G. 1975. Physical modeling of fire, Journal of Fire and Flammability 6, pp. 253–273.

Heskestad, G. 1972. Modeling of enclosure fires, in: Proceedings of the 14th Symposium on Combustion, The Pennsylvania State University, USA, pp. 1021–1030.

Beard, AN, Thomson, P, Santos-Reyes, J. 2003. Fire safety, explosions and process safety- Module. Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, UK.

Anexo A. Afluencia anual de pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Cuando pierdes, no te fijas en lo que has perdido, sino en lo que te queda por ganar.
(Anónimo).

Anexo A.

Afluencia anual de pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

A.1. Afluencia de pasajeros.

En la tabla 1 Afluencia de pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro, se muestra la información relacionada con la afluencia anual del sistema. Esta información data del año 2003 a Junio del 2010, con la cual se elaboró la grafica 1.2. Afluencia anual del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la sección 1.4. del capítulo I.

Enero - Diciembre 2003		Enero - Diciembre 2004	
Líneas	Total	Líneas	Total
1	280.908.905	1	254.386.727
2	285.545.087	2	264.606.498
3	238.577.420	3	225.873.109
4	26.185.864	4	23.164.937
5	71.766.917	5	54.418.195
6	38.028.588	6	35.087.353
7	79.168.436	7	75.763.989
8	116.258.566	8	108.405.941
9	81.276.459	9	97.542.984
"A"	50.127.066	"A"	75.995.446
"B"	107.246.125	"B"	106.251.380
RED	1.375.089.433	RED	1.321.496.559

Enero - Diciembre 2005		Enero - Marzo 2006	
Líneas	Total	Líneas	Total
1	237.860.352	1	253.029.835
2	260.290.330	2	267.550.776
3	218.808.995	3	234.136.094
4	21.226.700	4	23.177.267
5	63.253.240	5	72.189.040
6	37.032.692	6	40.769.956
7	76.507.794	7	81.235.430
8	109.838.741	8	117.386.342
9	99.160.469	9	108.510.380
"A"	83.037.776	"A"	97.597.747
"B"	111.956.082	"B"	121.413.107
RED	1.318.973.171	RED	1.416.995.974

Tabla A.1. "Afluencia de Pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro".

Afluencia anual de pasajeros del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Enero - Diciembre 2007	Líneas	Total	Enero - Diciembre 2008	Líneas	Total
	1	230.505.895		1	248.966.006
	2	250.383.920		2	284.508.401
	3	230.691.139		3	237.442.618
	4	19.423.114		4	22.942.961
	5	68.624.019		5	78.546.510
	6	41.986.319		6	43.560.642
	7	78.901.894		7	87.079.975
	8	112.993.643		8	125.102.716
	9	103.878.861		9	108.108.613
"A"	99.923.541	"A"	98.190.312		
"B"	115.096.079	"B"	132.914.139		
RED	1.352.408.424	RED	1.467.362.893		

Enero - Diciembre 2009	Líneas	Total	Enero - Junio 2010	Líneas	Total
	1	232.066.859		1	114.921.071,00
	2	266.681.914		2	127.712.726,00
	3	235.355.746		3	113.988.596,00
	4	23.762.060		4	11.789.174,00
	5	76.335.400		5	36.752.030,00
	6	40.284.270		6	19.231.050,00
	7	80.285.617		7	38.082.818,00
	8	127.628.685		8	62.258.887,00
	9	107.758.501		9	51.855.558,00
"A"	83.196.255	"A"	38.127.353,00		
"B"	141.552.491	"B"	72.331.396,00		
RED	1.414.907.798	RED	687.050.614,00		

Continuación Tabla A.1.

Anexo B. Información adicional de las líneas del Metro.

No merece la pena preocuparse por lo que piensan los demás de ti, porque están demasiado ocupados preguntándose qué piensas tu de ellos.

(Anónimo).

Anexo B.

Información adicional de las líneas del Metro.

B.1 Líneas del Metro.

B.1.1 Línea 1 “Observatorio – Pantitlán”.

La línea 1 del metro está integrada por 20 estaciones, 7 de ellas de correspondencia, 12 de paso y dos terminales del total, 19 estaciones son subterráneas y una superficial y su color distintivo es el rosa. Se localiza al centro de la ciudad de México con dirección oriente-poniente. Tiene una longitud total de vía de 18,828 kilómetros, de los cuales 16,654 kilómetros son utilizados para servicio de pasajeros y el restante para maniobras.



Esta línea tiene correspondencia con otras líneas del sistema como son las líneas 7 y 9 en Tacubaya; línea 3 en Balderas; línea 8 en Salto del Agua; línea 2 en Pino Suárez; línea 4 en Candelaria; línea B en San Lázaro y líneas 5, 9 y A en Pantitlán.

Está construida bajo las siguientes avenidas: Camino a Belén, Arq. C. Lazo, Av. Jalisco, Gral. Pedro Antonio de los Santos, Avenida Chapultepec, Arcos de Belén, José María Izazaga, San Pablo, Carretones, Esteban Martín, Juan Pablo II, Gral. Emiliano Zapata, Av. Ing. Eduardo Molina, Calzada Ignacio Zaragoza y Río Churubusco. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones que comprende la línea 1 son: Observatorio, Tacubaya, Juanacatlán, Chapultepec, Sevilla, Insurgentes, Cuauhtémoc, Balderas, Salto del Agua, Isabel la Católica, Pino Suárez, Merced, Candelaria, San Lázaro, Moctezuma, Balbuena, Boulevard Puerto Aéreo, Gómez Farías, Zaragoza y Pantitlán.

B.1.2 Línea 2 “Cuatro Caminos – Tasqueña”.

La línea 2 se integra por 24 estaciones, 5 de ellas de correspondencia, 17 de paso y dos terminales; del total, 14 estaciones son subterráneas y 10 superficiales, su color distintivo es el azul.

Esta construida al centro de la ciudad de México con dirección sur-norte de Tasqueña a Zócalo y dirección oriente-poniente de Allende a Cuatro Caminos. Tiene una longitud total



de vía de 23,432 kilómetros, de los cuales 20,713 son utilizados para el servicio de pasajeros y el restante para maniobras o mantenimiento. La línea 2 tiene correspondencia con otras líneas del sistema: línea 7 en Tacuba; línea 3 en Hidalgo; línea 8 en Bellas Artes; línea 1 en Pino Suárez y líneas 8 y 9 en Chabacano.

La construcción de la línea es superficial de Tasqueña a San Antonio Abad y subterránea de Pino Suárez a Cuatro Caminos.

Está construida en las avenidas: Calzada San Bartolo Naucalpan, Calzada México-Tacuba, Ribera de San Cosme, Puente de Alvarado, Av. Hidalgo, Tacuba, República de Guatemala, Seminario, Calzada Pino Suárez, San Antonio Abad, Calzada de Tlalpan y Puerto Rico. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones comprendidas en la línea 2 son: Cuatro Caminos, Panteones, Tacuba, Cuitláhuac, Popotla, Colegio Militar, Normal, San Cosme, Revolución, Hidalgo, Bellas Artes, Allende, Zócalo, Pino Suárez, San Antonio Abad, Chabacano, Viaducto, Xola, Villa de Cortés, Nativitas, Portales, Ermita, General Anaya y Tasqueña.

B.1.3 Línea 3 “Indios Verdes – Universidad”.

La línea 3, tiene una longitud de 23 Kilómetros 609 m (en servicio 21 Kilómetros 278 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 21 estaciones, 6 de ellas de correspondencia, 13 de paso y 2 terminales; del total, 17 estaciones son subterráneas y 4 superficiales, su color distintivo es el verde olivo. Se localiza al centro de la ciudad de México con dirección norte-sur.



Tiene correspondencia con las siguientes líneas: línea 6 en Deportivo 18 de marzo; línea 5 en La Raza; línea B en Guerrero; línea 2 en Hidalgo; línea 1 en Balderas y línea 9 en Centro Médico.

El tipo de construcción de la línea es superficial en el tramo Indios Verdes-Potrero y la estación Universidad. El resto de la línea es subterránea. Está construida en el trazo de las avenidas: Avenida de los Insurgentes Norte, Calzada Vallejo, Zoltán Kodály, Zarco, Balderas, Niños Héroes, Dr. Pasteur, Av. Cuauhtémoc, Av. Universidad, Av. Copilco, Pedro Henríquez Ureña y Av. Antonio Delfín Madrigal. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones que componen la línea 3 son: Indios Verdes, Deportivo 18 de Marzo, Potrero, La Raza, Tlatelolco, Guerrero, Hidalgo, Juárez, Balderas, Niños Héroes, Hospital General, Centro Médico, Etiopía-Plaza de la Transparencia, Eugenia, División del Norte, Zapata, Coyoacán, Viveros-Derechos Humanos, Miguel Ángel de Quevedo, Copilco y Universidad.

B.1.4 Línea 4 “Santa Anita – Martin Carrera”.

La línea 4, tiene una longitud de 10 Kilómetros 747 m (en servicio 9 Kilómetros 363 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 10 estaciones, 6 de ellas de correspondencia (incluidas dos terminales), y 4 de paso; 2 estaciones son superficiales y 8 elevadas. Su identidad grafica utiliza el color cian.



Tiene correspondencias con las siguientes líneas: línea 6 en Martín Carrera; línea 5 en Consulado; línea B en Morelos; línea 1 en Candelaria; línea 9 en Jamaica y línea 8 en Santa Anita.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo Metro es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

Fue la primera línea en emplear la solución de viaducto elevado. Únicamente las estaciones Martín Carrera y Candelaria son de tipo superficial. Está construida sobre las avenidas: Ferrocarril Hidalgo y Av. Congreso de la Unión. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Sus estaciones son: Martín Carrera, Talismán, Bondojoito, Consulado, Canal del Norte, Morelos, Candelaria, Fray Servando, Jamaica y Santa Anita.

B.1.5 Línea 5 “Politécnico – Pantitlán”.

La línea 5, tiene una longitud de 15 Kilómetros 675 m (en servicio 14 Kilómetros 435 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 13 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 7 de paso y una terminal más; del total, 4 estaciones son subterráneas y 9 superficiales. Su color distintivo es el amarillo.



Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 6 en Instituto del Petróleo; línea 3 en La Raza; línea 4 en Consulado; línea B en Oceanía y con las líneas 1, 9 y A en Pantitlán.

El tipo de construcción es superficial entre las estaciones Politécnico a La Raza, Consulado a Oceanía y la estación Pantitlán; es subterránea de Misterios a Valle Gómez y Terminal Aérea a Hangares.

La línea está construida en las avenidas: Eje Central Lázaro Cárdenas, Av. 100 Metros, Paganini, Av. Río Consulado, Bulevar Puerto Aéreo, Fuerza Aérea Mexicana, Manuel Lebrija y Talleres Gráficos. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones que componen la línea 5 son: Politécnico, Instituto del Petróleo, Autobuses del Norte, La Raza, Misterios, Valle Gómez, Consulado, Eduardo Molina, Aragón, Oceanía, Terminal Aérea, Hangares y Pantitlán

B.1.6 Línea 6 “El Rosario – Martín Carrera”.

La línea 6, tiene una longitud de 13 Kilómetros 947 m (en servicio 11 Kilómetros 434 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 11 estaciones, 4 de ellas de correspondencia (incluidas las dos terminales), 7 de paso; del total, 10 estaciones son subterráneas y una superficial. Su color distintivo es el rojo. Está ubicada al norte de la ciudad de México con dirección oriente-poniente.



Tiene correspondencia con otras líneas: línea 7 en El Rosario; línea 5 en Instituto del Petróleo; línea 3 en Deportivo 18 de marzo y línea 4 en Martín Carrera.

De acuerdo a estadísticas del Sistema de Transporte Colectivo Metro es considerada una línea de baja afluencia de pasajeros, por ese motivo se emplean trenes de 6 carros.

El tipo de construcción es superficial para la estación El Rosario; es subterránea el resto de la línea. Está construida en las avenidas: Tierra Colorada, Av Aquiles Serdán, Av. Ahuehuetes, Esperanza, Refinería, Azcapotzalco, Antigua Calzada de Guadalupe, Calzada Azcapotzalco, La Villa, Poniente 134, Ricarte, Colector 13, Ricarte y Alberto Herrera. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est, 2010).

Las estaciones que componen la línea 6 son: El Rosario, Tezozómoc, Azcapotzalco, Ferrería, Norte 45, Vallejo, Instituto del Petróleo, Lindavista, Deportivo 18 de Marzo, La Villa- Basílica y Martín Carrera.

B.1.7 Línea 7 “El Rosario – BARRANCA DEL MUERTO”.

La línea 7, tiene una longitud de 18 Kilómetros 784 m (en servicio 17 Kilómetros 11 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 14 estaciones, 3 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 10 de paso y una terminal más; del total, 13 estaciones son subterráneas y una superficial. Su color distintivo es el naranja. Su trazo se encuentra al poniente de la ciudad de México con dirección norte-sur.



Tiene correspondencia con otras líneas: línea 6 en El Rosario, línea 2 en Tacuba y con las líneas 1, 9 en Tacubaya.

La estación terminal El Rosario es la única de tipo superficial en toda la línea. La línea está construida bajo las avenidas: Tierra Colorada, Av. Aquiles Serdán, Av. Ferrocarriles Nacionales, Golfo de Adén, Lago Chiem, Lago Helmar, Av. Río San Joaquín, Lago Onega, Arquímedes, Calzada Chivatito, Calzada Molino del Rey, Av. Parque Lira, Puente de la Morena y Av. Revolución. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia,est, 2010).

Las estaciones que componen la línea 7 son: El Rosario, Aquiles Serdán, Camarones, Refinería, Tacuba, San Joaquín, Polanco, Auditorio, Constituyentes, Tacubaya, San Pedro de los Pinos, San Antonio, Mixcoac y BARRANCA DEL MUERTO

B.1.8 Línea 8 “Garibaldi – Constitución de 1917”.

La línea 8, tiene una longitud de 20 Kilómetros 78 m (en servicio 17 Kilómetros 679 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 19 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluida una de sus terminales), 13 de paso y una terminal más; del total, 14 estaciones son subterráneas y 5 superficiales. Su color distintivo es el verde. Su trazo se encuentra localizado al centro y suroriente de la ciudad de México.



Tiene dirección oriente-poniente entre las estaciones Constitución de 1917 y Atlalilco, y dirección norte-sur entre Escuadrón 201 y Garibaldi-Lagunilla.

Tiene correspondencia con otras líneas en: línea 4 en Santa Anita; líneas 2 y 9 en Chabacano; línea 1 en Salto del Agua; línea 2 en Bellas Artes y línea B en Garibaldi-Lagunilla.

El tipo de construcción es superficial en el tramo Aculco-Coyuya y la estación Constitución de 1917; el resto de la línea es de tipo subterránea.

La línea está construida en las siguientes avenidas: Av. Paseo de la Reforma (solo estación Garibaldi-Lagunilla), Eje Central Lázaro Cárdenas, Juan A. Mateos, Prol. José Tomás Cuellar, Calzada de la Viga, Viaducto, Coyuya, Hidalgo, Centeno, Violeta, Francisco del Paso y Troncoso, Avenida 5 y Av. Ermita Iztapalapa. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones de la línea 8 son: Garibaldi-Lagunilla, Bellas Artes, San Juan de Letrán, Salto del Agua, Doctores, Obrera, Chabacano, La Viga, Santa Anita, Coyuya, Iztacalco, Apatlaco, Aculco, Escuadrón 201, Atlalilco, Iztapalapa, Cerro de la Estrella, UAM-I y Constitución de 1917.

B.1.9 Línea 9 “Pantitlán – Tacubaya”.

La línea 9, tiene una longitud de 15 Kilómetros 375 m (en servicio 13 Kilómetros 33 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 12 estaciones, 5 de ellas de correspondencia (incluidas las dos terminales), 7 de paso; del total, 8 estaciones son subterráneas y 4 elevadas. Su color distintivo es el café. Su trazo se localiza al centro de la ciudad de México con dirección oriente-poniente.



Tiene correspondencia con otras líneas: líneas 1 y 7 en Tacubaya; línea 3 en Centro Médico; líneas 2 y 8 en Chabacano; línea 4 en Jamaica y líneas 1, 5 y A en Pantitlán.

El tipo de construcción es subterráneo en el tramo Tacubaya - Mixiuhca. De Velódromo a Pantitlán es viaducto elevado.

La línea está construida en las avenidas: José Martí, Gral. Francisco Murguía, Benjamin Franklin, Av. Baja California, Av. Dr. Ignacio Morones, José Peón Contreras, Calz. Chabacano, Av. Morelos, Viaducto y Río Churubusco. (Inauguraciones por orden cronológico, longitudes de la línea, correspondencia, est, 2010).

Las estaciones que componen la línea 9 son: Tacubaya, Patriotismo, Chilpancingo, Centro Médico, Lázaro Cárdenas, Chabacano, Jamaica, Mixiuhca, Velódromo, ciudad Deportiva, Puebla y Pantitlán.

B.1.10 Línea A “Pantitlán – La Paz”.

La línea A, tiene una longitud de 17 Kilómetros 192 m (en servicio 14 Kilómetros 893 m y el resto se usa para maniobras). Se integra por 10 estaciones, 8 de ellas de paso y dos terminales, una con correspondencia; del total, 1 estación es subterránea y 9 superficiales. Su color distintivo es el morado.



La construcción de la Línea 12 tendrá dos etapas, la primera será inaugurada en el 2011, que irá de Tlahuac a Atlalilco; y la segunda que termina en Mixcoac, estará dando servicio en el 2012.

La Línea 12 proporcionara conectividad con las líneas 2, 3, 7 y 8 en el sur de ciudad de México. Con la construcción de la Línea Dorada, Línea del Bicentenario, se beneficiará a más de 400 mil personas de las delegaciones Tláhuac, Iztapalapa, Coyoacán, Benito Juárez, Álvaro Obregón y Xochimilco, se acortarán los viajes de dos horas a sólo 45 minutos, asimismo se generarán más de 25 mil empleos directos y 60 mil indirectos. (Sabias que...#10)

Las estaciones de la línea 12 "línea Dorada serán: Mixcoac, Insurgentes Sur, 20 de Noviembre, Zapata, Parque de los Venados, Eje Central, Ermita, Mexicaltzingo, Atlalilco, Pueblo Culhuacán, ESIME Culhuacán, Tomatlán, Calle 11, Periferico Ote., Tezonco, Olivos, Nopalera, Zapotiitlan, Tlaltenco y Tláhuac.

B.2 Parque vehicular del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Para trasladarte a los distintos puntos de destino del Distrito Federal y zona metropolitana, el Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene un parque vehicular de 355 trenes, de los cuales 291 son de 9 carros y 31 de 6, en ambos casos de rodadura neumática, así como 33 de rodadura férrea de 6 carros, 39 carros sin formación (están en reserva o en proceso de conversión de M a N) lo que hace un total de 3,042 carros.

Trenes		Total de carros
291	Rodadura neumática	9 carros
31	Rodadura neumática	6 carros
33	Rodadura férrea	6 carros
Total:	355	Trenes

Tabla B.1. Parque Vehicular

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

Este parque vehicular está integrado por 13 modelos, 2 de ellos férreos y el resto neumáticos. Se distinguen 2 tipos de tecnología en su fabricación: el 30% cuenta con sistema de tracción-frenado del tipo electromecánico JH (árbol de levas) y el resto cuenta con un sistema de tracción-frenado con semiconductores y control electrónico, lo que permite aumentar la fiabilidad y reducir los costos de operación y mantenimiento, debido a que tienen mayor eficiencia en la recuperación de energía durante la etapa de frenado eléctrico. (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010).

Modelo	Modelo	Procedencia	Tipo	Constructora	Características	Líneas en las que opera
	MP-68R93	Francesa	JH	Bombardier	Rodadura neumática y control electromecánico	Varias Líneas
	MP-68R96	Francesa	JH	Bombardier	Rodadura neumática y control electromecánico	B
	NM-73 A	Mexicana	JH	Concarril	Rodadura neumática y control electromecánico	Varias Líneas
	NM-73 B	Mexicana	JHR	Concarril	Rodadura neumática y control electromecánico	Varias Líneas

Información adicional de las líneas del Metro.

	NM-79	Mexicana	Choper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico	3
	NC-82	Canadiense	Choper	Halsthom	Rodadura neumática y control electrónico	5
	MP-82	Francesa	Choper	Bombardier	Rodadura neumática y control electrónico	8
	NM-83 A	Mexicana	Choper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico	Varias líneas
	NM-83 B	Mexicana	Choper	Concarril	Rodadura neumática y control electrónico	1
	FM-86	Mexicana	Choper	Concarril	Rodadura férrea, tracción frenado de corriente directa	A
	NE-92	Española	Choper	CAF	Rodadura neumática y control electrónico	1
	FM-95A	Mexicana	Asíncro no	Concarril	Rodadura férrea y tracción frenado de corriente alterna	A
	NM-02	Mexicana	Asíncro no	Consortio Bombardier Transportation y CAF	Rodadura neumática y tracción frenado de corriente alterna	2

Tabla B.2. Tipos de trenes.

Fuente: (Afluencia de estación por línea, cifras de operación, parque vehicular, modelos de los trenes, 2010)

Nota: El número de serie del modelo indica el año de pedido, no así el año en que fueron puestos en servicio. Es importante destacar que la entrega de trenes no es en bloques sino mes por mes.

Como se dijo el parque vehicular se encuentra integrado por 13 modelos, pero divididos en dos tipos el férreo y el de tipo neumático. De acuerdo a la tabla B.2. Tipos de trenes, podemos darnos cuenta que solo la línea A, utiliza al 100% el parque vehicular tipo férreo, siendo este solo el 9% y el otro 91% hace uso del parque vehicular tipo neumático.

Anexo C. Programación del software para el cálculo de la velocidad critica de ventilación.

La vida sólo nos parece corta porque la medimos inconsiderablemente
con nuestras locas esperanzas.
(Anónimo).

Anexo C.

Programación del software para el cálculo de la velocidad crítica de ventilación.

C.1. Programación del software.

En la sección 4.1.4 Fase 4. Implantación y control de la solución, de la metodología de de C.W. Churchman y R.I. Ackoff, del capítulo IV, se realizó un software en Visual Basic 6.0, para realizar el cálculo de la velocidad crítica de ventilación.

De acuerdo con la figura 4.5. Interfaz grafica del software, Velocidad Crítica de Ventilación, a continuación se presenta la programación del software.

Programación del software.

Botón Heselden.

```
Private Sub Command1_Click()
A = (Text2 * Text10) / 3600
Text11 = (Text9 * (((Text1 * A * Text5) / (Text6 * Text3 * (Text4 ^ 2) * (Text7)))) ^ 1 / 3
Text11 = Format(Text11, "0.000000")
End Sub
```

Botón Danzinger y Kennedy.

```
Private Sub Command2_Click()
A = (Text2 * Text10) / 3600
Text11 = ((A) / (Text6 * Text3 * 39.9533 * 0.06359)) + Text4
Text12 = (0.61) * (((Text1 * A) / (Text6 * Text3 * Text11 * Text8)) ^ 1 / 3)
Text12 = Format(Text12, "0.000000")
End If
End Sub
```

Botón Oka.

```
Private Sub Command3_Click()  
A = (Text2 * Text10) / 3600  
Q = A / (Text3 * Text4 * Text6 * (Sqr(Text1 * Text8 ^ 5)))  
If Q <= 0.12 Then  
Text13 = (0.22 * ((Q / 0.12) ^ 1 / 3))  
Else  
Text13 = Q  
End If  
Text13 = Format(Text13, "0.00000")  
Q = Format(Q, "0.00000")  
Text13 = (Text13) * (Sqr(Text1 * Text8))  
Text13 = Format(Text13, "0.000000")  
Text13.Visible = True  
End Sub
```

Botón Kunsh.

```
Private Sub Command4_Click()  
c1 = 1 - (0.1 * (Text8 / Text7))  
c2 = (0.574) * (1 - 0.1 * (Text8 / Text7)) / (1 + 0.1 * (Text8 / Text7)) * (1 - 0.2 * (Text8 / Text7))  
y = 1.4  
A = (Text2 * Text10) / 3600  
Q1 = (((y - 1) / y) * ((A) / ((100000) * (Sqr((Text1) * (Text8 ^ 5 / 2))))))  
M1 = ((0.613) * (Sqr(c1 * 6.13)))  
M2 = (Sqr(1 + (1 - (c2 / c1)) * 6.13 * (Q1 ^ 2 / 3))) / ((1 + 6.13 * (Q1 ^ 2 / 3)))  
M3 = ((Q1 ^ 1 / 3) * (Sqr(Text1 * Text8)))  
Text14 = (M1 * M2 * M3)  
Text14 = Format(Text14, "0.000E+00")  
Text14.Visible = True  
End Sub
```

Botón Roh.

```
Private Sub Command5_Click()  
A = (Text2 * Text10) / 3600  
Text15 = (-0.000845 + (8.1661 * A) / (1 + (2.094 * A) - (0.021 * A ^ 2)))  
Text15 = Format(Text15, "0.00000")  
Text15.Visible = True  
End Sub
```

Botón Limpiar.

```
Private Sub Command6_Click()  
Text11 = ""  
Text12 = ""  
Text13 = ""  
Text14 = ""  
Text15 = ""  
End Sub
```

Botón Salir.

```
Private Sub Command7_Click()  
End  
End Sub
```

Campo de texto Potencia del incendio (Q).

```
Private Sub Text2_KeyPress(KeyAscii As Integer)  
If KeyAscii = 8 Then Exit Sub  
If (KeyAscii < 48) Or (KeyAscii > 57) Then  
If KeyAscii <> 46 Then KeyAscii = 0  
MsgBox "Solo se aceptan números", vbOKOnly + Exclamation, "Verificar"  
Text2.SetFocus  
End If  
End Sub
```

Campo de texto Temperatura Inicial (To).

```
Private Sub Text4_KeyPress(KeyAscii As Integer)  
If KeyAscii = 8 Then Exit Sub  
If (KeyAscii < 48) Or (KeyAscii > 57) Then  
If KeyAscii <> 46 Then KeyAscii = 0  
MsgBox "Solo se aceptan números", vbOKOnly + Exclamation, "Verificar"  
Text4.SetFocus  
End If  
End Sub
```

Campo de texto Temperatura Final (T).

```
Private Sub Text5_KeyPress(KeyAscii As Integer)
If KeyAscii = 8 Then Exit Sub
If (KeyAscii < 48) Or (KeyAscii > 57) Then
If KeyAscii <> 46 Then KeyAscii = 0
MsgBox "Solo se aceptan números", vbOKOnly + Exclamation, "Verificar"
Text5.SetFocus
End If
End Sub
```

Campo de texto Ancho de Túnel (W).

```
Private Sub Text7_KeyPress(KeyAscii As Integer)
If KeyAscii = 8 Then Exit Sub
If (KeyAscii < 48) Or (KeyAscii > 57) Then
If KeyAscii <> 46 Then KeyAscii = 0
MsgBox "Solo se aceptan números", vbOKOnly + Exclamation, "Verificar"
Text7.SetFocus
End If
End Sub
```

Campo de texto Alto del Túnel (H).

```
Private Sub Text8_KeyPress(KeyAscii As Integer)
If KeyAscii = 8 Then Exit Sub
If (KeyAscii < 48) Or (KeyAscii > 57) Then
If KeyAscii <> 46 Then KeyAscii = 0
MsgBox "Solo se aceptan números", vbOKOnly + Exclamation, "Verificar"
Text8.SetFocus
End If
End Sub
```
