



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESIINA D'ESPECIALITAT

Títol

**Estudi dels condicionants associats a la gestió de viatgers a gran profunditat en sistemes de transport: El cas de les infraestructures ferroviàries
722-TES-CA-3900**

Autor

David Díaz Rodríguez

Tutor

Carles Casas Esplugas

Departament

Infraestructura del Transport i Territori (ITT)

Intensificació

Transports

Data

Octubre 2009

Agraïments

Vull agrair al Carles Casas i l'Adrina Bachiller, el recolzament que m'han donat en la elaboració del present document.

Igualment m'agradaria recordar els companys i excompanys d'Ifercat, que amb les seves hores de companyia, m'han ajudat a comprendre que l'excel·lència rau en la honradesa i el treball.

De la mateixa manera, agrair als meus pares i germà, que amb molta paciència han suportat els maldecaps d'un fill que obstinadament volia estudiar camins, però no trobava el moment d'acabar.

A l'Anna, pel suport incondicional i decidit

Finalment al Cruz i a l'Amàlia, que de ben segur, compartiu aquesta fita amb mi, allà on sigueu.

Gràcies

Resum

Títol: Estudi dels condicionants associats a la gestió de viatgers a gran profunditat en sistemes de transport: El cas de les infraestructures ferroviàries

Autor: David Díaz Rodríguez

Tutor: Carles Casas Esplugas

L'actual tendència a construir infraestructures de gran capacitat, per tal de donar major nivell de servei, ha portat a una evolució continuada del seu soterrament, cada cop a més fondària.

En l'àmbit urbà l'alta ocupació de la superfície ha comportat la colonialització d'un subsòl, que a data d'avui es troba també molt densificat. Aquest fet, ha comportat una redefinició dels criteris de disseny i explotació que s'apliquen en l'actualitat a les infraestructures.

La present Tesina, analitza aquesta redefinició centrant-se en els aspectes funcionals lligats a l'accessibilitat i ventilació d'estacions profundes de ferrocarril metropolità. Aquesta anàlisi s'ha complementat amb l'aplicació al cas pràctic de la nova Línia 9 del Metro de Barcelona.

El document s'inicia amb una breu descripció de les infraestructures subterrànies a nivell del seu origen i tipologia, centrant-nos fonamentalment en l'àmbit ferroviari urbà. Així mateix, es fa menció als condicionants de disseny a nivell tècnic, seguretat i explotació, que entre altres, estableixen alguns dels criteris emprats per a la planificació de sistemes de ferrocarril urbà a nivell d'infraestructura. Així mateix es fa menció de les normatives més representatives a nivell nacional i internacional que són d'aplicació en l'àmbit del transport ferroviari soterrat i que servirà per documentar formalment les metodologies i criteris dels aspectes de evacuació i ventilació.

El tractament del transport ferroviari urbà s'ha realitzat mitjançant una descripció simplificada de les característiques més rellevants. Així, s'analitza la cadena de transport, les capacitats dels seus elements i els temps d'evacuació per tal de poder abordar el problema del transport vertical en les actuals estacions de metro, on la profunditat no és gaire elevada. De la mateixa manera, s'analitza la metodologia més consolidada dins de l'àmbit ferroviari a nivell de ventilació.

El capítol 3 de la tesina s'ha centrat en l'estudi en les solucions per l'evacuació i la ventilació adoptades en estacions poc profundes per poder abordar a continuació les implicacions que té l'augment de la fondària en aquests dos aspectes cabdals per a la seguretat dels usuaris.

S'ha analitzat el cas d'estacions profundes prenent com a referència el cas de la L9 del Metro de Barcelona, un exemple d'infraestructura d'alta capacitat que en gran part del seu traçat discorre a gran fondària pel subsòl barceloní; definint les característiques del projecte, traçat i solució constructiva. Igualment, s'analitzen els aspectes relatius als condicionants del projecte que han portat a que la L9, sigui en l'actualitat una de les infraestructures urbanes més profundes a nivell internacional. En aquesta anàlisi s'apliquen els resultats obtinguts a partir de l'estudi del model de gestió de passatgers, analitzant els factors profunditat i demanda per tal de definir uns criteris bàsics alhora de triar el mitjà de transport vertical més adequat.

Finalment el document tanca amb unes prescripcions i recomanacions que provenen dels resultats obtinguts al cos del document i que pretenen resumir les idees més rellevants a nivell d'explotació i seguretat que es desprenen de l'anàlisi de l'evacuació i ventilació en sistemes de transport a gran fondària; a nivell de disseny, construcció i marc normatiu regulador.

Summary

Title:

Author: David Díaz Rodríguez

Tutor: Carles Casas Esplugas

Title: Study of factors associated with the management of passengers in a high depth transport system: the case of rail infrastructure.

The current trend of building high capacity infrastructures in order to provide higher level of service has led to a continuous evolution of their underground at increasingly lower levels.

The high density of the urban areas has led to their settlement in the underground, which today is also very dense. This fact has provoked the redefinition of the design and operation criterias that currently apply to the infrastructure.

The second chapter of this document is a brief description of the underground infrastructures, its origins and typologies. It is primarily focused on the urban rail sector. It also mentions the conditions of technical design, safety and operation which, among other things, establishes some criteria for the planning of urban rail systems in terms of infrastructure.

This chapter also talks about the more representative national and international regulations that are applicable to the area of transport and underground railways and will be used to document the methodologies and the criteria of the ventilations and evacuation aspects that will be further developed within the following chapters.

The third chapter talks about the urban rail transport, using a simplified description of the main characteristics. The transport chain, the capabilities of its components and the evacuation time are analyzed to address the problem of vertical transport of the current underground stations where the depth is not very high.

Similarly, the more consolidated methodologies of the ventilation area of the railway sector are analyzed. This chapter focuses on the study of the evacuation and ventilation solutions of the shallow stations. Section three addresses the implications of the increased depth of the stations under the point of view of these two crucial aspects of safety.

The fourth section analyzes the case of the deep stations in reference to the Metro Line 9 of Barcelona. It is an example of high-capacity infrastructure where most of its route lies deep inside of the subsoil of Barcelona which defines the project characteristics, route and constructive solution. Similarly, the factors related to the constraints of the project that led the Metro Line 9 to be one of the deepest of the international infrastructures are studied.

From the results of the third Chapter this one examines the model of passenger management, analyzing the depth and demand factors in order to define the basic criteria to choose the appropriate means of vertical transport.

In the same way, at section two the ventilation environmental variables, the implementing rules and the functional scheme applied to the Line 9 are discussed.

Finally, this document ends with some prescriptions and recommendations obtained from the results of the body of the document that pretends to summarize the most relevant ideas, in terms of operation and safety, arising from the analysis of the evacuation and ventilation systems of transport of high depth, level design, construction and regulatory framework.

Índex

1	introducció, objectius i metodologia	13
2	Infraestructures subterrànies	17
2.1	Gènesi i tipologies de transport subterrani.....	17
2.2	Evolució de la fondària amb el temps de les infraestructures que s'han anat construint.	18
2.3	Condicionants de disseny	21
2.3.1	Geologia i obres existents	21
2.3.2	Tècniques constructives.....	22
2.3.3	Criteris de seguretat.....	24
2.3.4	Criteris d'exploració.....	25
2.4	Marc Normatiu a nivell de seguretat.	25
2.4.1	Normativa Existent	26
3	El Transport Ferroviari Urbà. Generalitats	29
3.1	La cadena de transport.	31
3.1.1	Elements de la cadena de transport	31
3.1.2	Cadena de Transport	35
3.1.3	Estudi de capacitats	42
3.1.4	Càlcul dels temps d'evacuació.....	44
3.1.5	El transport vertical. Criteris de disseny en relació a les variables demanda i profunditat.	49
3.2	Ventilació	58
4	Estacions a gran profunditat. El cas de la L9 del Metro de Barcelona.....	65
4.1	Definició, característiques i ubicació del projecte	66
4.1.1	Condicionants del projecte.....	70
4.1.2	Traçat.....	71
4.1.3	Solució constructiva	72
4.2	Gestió de passatgers.	78
4.2.1	Comparativa de solucions de transport vertical.	78
4.2.2	Evacuació en estacions profundes.	87
4.2.3	Càlcul d'evacuació segons NFPA-130 d'una estació tipus L9	95
4.3	Sistema de ventilació	104
4.3.1	Documentació de referència	104
4.3.2	Criteris de disseny generals dels sistemes de ventilació a L9	104
4.3.3	Criteris de disseny de ventilació d'estacions en emergència.....	108
4.3.4	Criteris de disseny de ventilació d'estacions en confort.....	109
4.3.5	Casos de funcionament de la ventilació.....	109
4.3.6	Conclusions del sistema de ventilació.	112
5	Conclusions	113
6	Futures línies d'investigació	117
	Bibliografia	119

Índex de figures

Figura 1	El carrer Aragó (Barcelona) l'any 1915. Font: Renfe.	18
Figura 2	Projecte de soterrament de la via de FGC a Sarrià el 1952. Font: Imatge de l'arxiu històric de FGC.....	19
Figura 3	Evolució de la fondària de les estacions de ferrocarril metropolità de Barcelona. Font: Elaboració pròpia.....	20
Figura 4	Evolució de la fondària dels túnels de base. Font: Elaboració pròpia.....	20
Figura 5	Esquema constructiu mètode cut and cover i el seu condicionament a discórrer per la trama urbana. Cas L2. Font: Elaboració pròpia	23
Figura 6	Esquema de tuneladora de la Línia 9. Font: Herrenknecht.....	24
Figura 7	Imatges del metro d'Istanbul. Font: Comas 2009	30
Figura 8	Imatges del metro Moscou i Londres d'esquerra a dreta. Font: JuanFran 2009	30
Figura 9	Exemple de xarxes metropolitanas de ferrocarril urbà Barcelona, Tòquio i Nova York. Font: Julià, 2005.....	31
Figura 10	Exemple de xarxes de nodes de les ciutats de Nova York i Madrid. Font: MTA New York City Subway i Metro de Madrid	32
Figura 11	Exemple d'estació elevada al Metro de Santiago de Chile. Font: Ariel Cruz	32
Figura 12	Exemple d'estació superficial. Metro de Minnesota. Font: Metrotransit.....	33
Figura 13	Estació de Metro de Bilbao. Estació subterrània. Font: Metro de Bilbao	33
Figura 14	Estacions intercanviador a la xarxa de FMB. Font: ATM.....	34
Figura 15	Material mòbil de Metro de Madrid. Font: CAF.	35
Figura 16	Accés estació Bagatza de Metro de Bilbao. Font: Metro de Bilbao	36
Figura 17	Línia de validadores i màquines de venda de títols de transport. Font: Cristóbal Manuel.....	36
Figura 18	Andana Metro de Madrid. Font: Cristóbal Manuel	37
Figura 19	Cadena de transport Metro	38
Figura 20	Accés estació subterrània. Font: Elaboració pròpia.....	39
Figura 21	Vestíbul i línia de peatge. Font: Ifercat 2009.....	40
Figura 22	Esquema Zona de Transició B. Font: Elaboració pròpia.....	41
Figura 23	Zona de transició B i andana. Font: Ifercat 2009	42
Figura 24	Interior vehicle Alstom Metropolis C830. Font: GNU Free Documentation License.....	42
Figura 25	Distribució χ^2 de Pearson de la probabilitat referent al nombre d'estacions que recorren els passatgers. Font: Elaboració pròpia i ATM.....	47
Figura 26	Termòmetre d'estacions L2 del FMB. Font: Elaboració pròpia	49
Figura 27	Exemple ascensor elèctric. Font: ThyssenKrupp Elevadores i elaboració pròpia	51
Figura 28	Exemple escala mecànica. Font: ThyssenKrupp Elevadores i elaboració pròpia	55
Figura 29	Esquema escala mecànica. Font: Elaboració pròpia	57
Figura 30	Comparació entre escales mecàniques i ascensors sota un escenari de 500 passatgers i considerant una bateria de 5 ascensors o 2 escales mecàniques.....	58
Figura 31	Ventilació mitjançant pous interestació i a extrem d'estació. Font: Elaboració pròpia	60
Figura 32	Termòmetre d'estacions a L1. Font: Elaboració pròpia	62
Figura 33	Esquema d'ocupació del subsòl. Font: Elaboració pròpia	66
Figura 34	Esquema general de la L9. Font: Elaboració pròpia	67
Figura 35	Esquema general de la L9. Font: Elaboració pròpia	68
Figura 36	Termòmetre de la L9 i intercanviadors. Font: Elaboració pròpia	68
Figura 37	Tipologies constructives de la L9. Font: Elaboració pròpia.....	69

Figura 38	Esquema dels condicionaments del projecte L9. Font: Elaboració pròpia..	70
Figura 39	Esquema estratègia de tuneladores a L9. Font: Elaboració pròpia	71
Figura 40	Esquema de la cubeta d'assentaments d'un túnel. Font: Elaboració pròpia	71
Figura 41	Esquema tipologies d'estació a L9. Font: Elaboració pròpia	73
Figura 42	Seccions estació subterrània poc profunda. Font: Ifercat 2009	73
Figura 43	Imatge renderitzada d'una estació tipus viaducte a L9. Font: Ifercat 2009.	74
Figura 44	Entroncament pou vertical i túnel a estacions tipus L9. Font: Elaboració pròpia.	74
Figura 45	Imatges del pou d'una estació profunda tipus L9. Font: Ifercat 2009	75
Figura 46	Estació tipus L9 amb ascensors de gran capacitat. Font: Ifercat 2009.....	76
Figura 47	Estació tipus L9 amb escales mecàniques. Font: Ifercat 2009	76
Figura 48	Comparació profunditat estació tipus L9 (estació de Sarrià) amb alçada de la Torre Agbar. Font: Ifercat 2009	77
Figura 49	Temps d'evacuació i de viatge en funció de la profunditat del pou. Font: Elaboració pròpia	79
Figura 50	Temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou sense tenir en compte el temps d'espera. Font: Elaboració pròpia	80
Figura 51	Temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou. Supòsit A 192 persones. Font: Elaboració pròpia	82
Figura 52	Temps d'evacuació d'andanes en funció de la profunditat del pou. Supòsit B 384 persones. Font: Elaboració pròpia	83
Figura 53	Temps d'evacuació d'andanes en funció de la profunditat del pou. Supòsit 576 persones. Font: Elaboració pròpia	84
Figura 54	Esquema comparatiu Ascensors-Escales mecàniques, respecte temps d'evacuació. Font: Estudi d'alternatives d'escales i ascensors. Sener 2007	84
Figura 55	Esquema comparatiu per diferents demandes de Ascensors i Escales mecàniques tipus 2, respecte el temps d'evacuació i la fondària. Font: Elaboració pròpia.	86
Figura 56	Elements considerats per a la evacuació desde l'andana fins al vestíbul d'una estació tipus L9. Font: Elaboració pròpia.	88
Figura 57	Esquema de rutes d'evacuació d'una estació tipus L9. Font: Elaboració pròpia.	89
Figura 58	Portes de sectorització andana-preandana. Font: Ifercat 2009	90
Figura 59	Esquema composició tren. Font: Alstom.....	93
Figura 60	Esquema evacuació estació tipus L9. Font: Auding	103
Figura 61	Esquema de ventilació estació tipus L9. Font: Auding 2007.....	106
Figura 62	Corba de d'incendi tipus Múnich. Font: Auding 2007.....	107
Figura 63	Esquema de funcionament ventilació en confort. Font: PaymaCotas 2007	110
Figura 64	Esquema de funcionament ventilació amb incident a l'andana inferior. Font: PaymaCotas 2007	110
Figura 65	Esquema de funcionament ventilació amb incident a l'andana superior. Font: PaymaCotas 2007	111
Figura 66	Esquema de funcionament ventilació amb incident al vestíbul. Font: PaymaCotas 2007	111
Figura 67	Esquema comparatiu Ascensors-Escales mecàniques, respecte el temps d'evacuació d'andana. Font: Estudi d'alternatives d'escales i ascensors. Sener 2007	114
Figura 68	Esquema comparatiu de l'àrea de captació d'una estació de Metro a l'augmentar la fondària de l'estació.....	117

Índex de taules

Taula 1	Exemple de càrregues d'ocupació i temps d'evacuació a estacions de la Línia 2 del FMB. Font: Elaboració pròpia i FMB	49
Taula 2	Taula comparativa d'amplades nominals i velocitats nominals. Font: Elaboració pròpia a partir de dades facilitades per Thyssenkrupp	56
Taula 3	Dades equipaments de ventilació L1. Font: TMB	62
Taula 4	Taula comparativa de càrregues tèrmiques. Font: Elaboració pròpia.....	63
Taula 5	Aportacions tèrmiques. Font: Elaboració pròpia	63
Taula 6	Noms i abreviatures de les estacions de la L9. Font: Elaboració pròpia	67
Taula 7	Criteris de disseny del traçat. Font: Ifercat 2009.....	72
Taula 8	Característiques ascensors L9. Font: Elaboració pròpia	79
Taula 9	Característiques escales mecàniques. Font: Elaboració pròpia	80
Taula 10	Característiques material mòbil L9. Font: Alstom	92
Taula 11	Temps d'evacuació d'andana. Font: Auding [6]	98
Taula 12	Temps d'evacuació estació amb ascensors. Font: Auding [6]	99
Taula 13	Temps d'evacuació d'andana. Font: Auding [6]	101
Taula 14	Temps d'evacuació estació amb escales mecàniques. Font: Auding [6]..	102
Taula 15	Caracterització de l'ambient. Font:[6].....	107
Taula 16	Caracterització de l'incendi. Font: [6].....	107

1 INTRODUCCIÓ, OBJECTIUS I METODOLOGIA

És un fet, que en l'actualitat la necessitat d'infraestructures de gran capacitat, així com l'elevada densificació del subsòl de les àrees urbanes i la construcció de grans túnels de base ha portat al disseny i construcció d'infraestructures cada vegada a més fondària.

En àmbit urbà, l'alta ocupació superficial ha comportat, simultàniament la progressiva colonialització del subsòl ocupant-lo amb diverses infraestructures cada vegada a un ritme més elevat.

El transport urbà ferroviari és un clar exemple d'aquest procés. L'augment de la fondària de les seves instal·lacions, ha iniciat un procés de redefinició del model constructiu i d'explotació. Això es tradueix en la irrupció de problemàtiques de diversa índole, que afecten en menor o major grau la qualitat, la eficàcia i la seguretat dins de la explotació.

Entre tots els aspectes que implica la gran fondària, destaquen els relacionats amb la evacuació i la ventilació. La primera fa referència a la gestió dels usuaris, i la segona s'entén com una condició bàsica per garantir la salubritat i la seguretat dins de la infraestructura.

L'evacuació, comprèn dues situacions: en mode normal d'explotació, i en situació d'emergència. Tots dos estats prenen importància quan la infraestructura augmenta la seva fondària, però les implicacions que té en elles són molt diferents. En el primer cas, la profunditat afecta a la velocitat en que els passatgers es desplacen per dins de la estació, incidint en l'agilitat del medi de transport. En el segon cas, és una qüestió de seguretat el fet de tenir passatgers concentrats a una zona profunda de la que han de sortir amb la major rapidesa possible.

Les solucions constructives per al transport de viatgers que es troben a gran profunditat, han de recórrer a la mecanització dels desnivells. Això es tradueix en la instal·lació d'ascensors o escales mecàniques, a banda de les preceptives escales fixes. Aquests dos sistemes de transport vertical, presenten funcionaments molt diferents, fent que la seva conveniència, quedi determinada per factors com la demanda o la fondària, no existint a dia d'avui uns criteris bàsics que en facilitin la seva tria de manera sistemàtica.

Pel que fa a la ventilació, pel fet d'augmentar la fondària, es fa més difícil recórrer a la ventilació natural, arribant fins i tot a ser inviable aquest recurs. Això comporta la necessitat de garantir uns requisits de salubritat que únicament s'obtenen a partir d'uns cabals de ventilació mínims. Per aquest motiu, la fondària implica el ressorgir de principis que ja eren aplicats en àmbits com la mineria; la injecció d'aire de l'exterior a l'interior, i l'expulsió de l'aire viciat. Aquests aspectes esdevenen clau en l'anàlisi de la seguretat, especialment en cas d'incendi.

És aquest context, que es situa la present tesina, que versa sobre l'estudi dels condicionants associats a la gestió de viatgers a gran profunditat. En concret, analitza com la fondària afecta a la cadena de transport, en termes de temps i capacitat, i com sota aquestes condicions de contorn, el transport vertical esdevé peça clau i fonamental en termes de seguretat.

Igualment, la ventilació, esdevé objecte d'estudi, arran de la desaparició de la ventilació natural, esdevenint igual que el transport vertical, peça fonamental per a la garantia de les condicions de seguretat a la pròpia explotació.

D'aquests dos aspectes, neix el tercer aspecte que es tracta en aquesta tesina, que és la particularització de l'anàlisi al cas de la Línia 9 del Metro de Barcelona, en particular, com s'han abordat l'evacuació i la ventilació a nivell de disseny i construcció.

Així, la tesina es planteja com a objectiu principal **analitzar els aspectes funcionals lligats a les estacions profundes: transport vertical ventilació.**

A més de l'objectiu principal de la tesina, s'han establert una sèrie d'objectius secundaris que constitueixen fites necessàries per assolir l'objectiu final de la tesina i per contextualitzar el treball en el marc d'una actuació actualment en curs com és la Línia 9 de metro de Barcelona.

Així, entre els objectius secundaris de la tesina es poden enumerar:

- Anàlisi de les infraestructures ferroviàries soterrades en àmbit urbà
- Plantejar les principals diferències entre estacions superficials i profundes des d'un punt de vista funcional
- Recopilació dels aspectes normatius lligats al transport de viatgers soterrat
- Anàlisi individualitzat de la funcionalitat dels elements que componen el sistema d'accés i evacuació de les estacions de viatgers soterrades
- Analitzar un cas real (en aquest cas la Línia 9 del metro de Barcelona)

La metodologia que s'ha seguit per a la consecució dels objectius plantejats ha estat la següent:

S'ha realitzat una breu descripció de les infraestructures subterrànies a nivell del seu origen i tipologia, centrant-se fonamentalment en l'àmbit ferroviari urbà. Així mateix, es fa menció als condicionants de disseny a nivell tècnic, seguretat i explotació, que entre altres, estableixen alguns dels criteris emprats per a la planificació de sistemes de ferrocarril urbà a nivell d'infraestructura. Igualment s'han recopilat les normatives més representatives a nivell nacional i internacional que són d'aplicació en l'àmbit del transport ferroviari soterrat i que serveix per documentar formalment les metodologies i criteris dels aspectes de evacuació i ventilació que seran objecte dels següents capítols. Aquesta descripció es presenta al capítol segon.

Seguidament s'ha tractat el transport ferroviari urbà, mitjançant una descripció simplificada de les característiques més rellevants analitzant la cadena de transport, les capacitats dels seus elements i els temps d'evacuació per tal de poder abordar el problema del transport vertical en les actuals estacions de metro, on la profunditat no és gaire elevada. De la mateixa manera, s'ha analitzat la metodologia més consolidada dins de l'àmbit ferroviari a nivell de ventilació. Aquests aspectes s'han desenvolupat al capítol 3

Finalment s'ha analitzat el cas d'estacions profundes prenent com a referència el cas de la L9 del Metro de Barcelona, un exemple d'infraestructura d'alta capacitat que en gran part del seu traçat discorre a gran fondària pel subsòl barceloní. S'han identificat les característiques del projecte, traçat i solució constructiva. Igualment, s'han analitzat els aspectes relatius als condicionants del projecte que han portat a que la L9, sigui en l'actualitat una de les infraestructures urbanes més profundes a nivell internacional.

A partir d'aquest exemple, s'ha realitzat una anàlisi del model de gestió de passatgers, a partir dels factors profunditat i demanda per tal de definir uns criteris bàsics a l'hora de triar el mitjà de transport vertical més adequat. De la mateixa, s'ha plantejat el tema de la ventilació analitzant les variables de contorn, la normativa d'aplicació i l'esquema funcional aplicat al cas de la L9. Aquest desenvolupament ocupa el capítol 4.

Finalment el document es tanca amb les conclusions que es deriven dels aspectes estudiats en el desenvolupament de la Tesina (capítol 5) i es conclou amb la menció de possible línies futures d'investigació (capítol 6).

2 INFRAESTRUCTURES SUBTERRÀNIES

És una realitat, que en el decurs dels anys, les infraestructures, tant necessàries per al desenvolupament humà, han anat ocupant el subsòl per lliurar espais a les ciutats, tant densament poblades en l'actualitat.

Particularment, en el cas de les infraestructures de transport, especialment en el cas dels ferrocarrils metropolitans, però també de les vies urbanes, el seu creixement i necessitat d'espais ha portat a ocupar el subsòl de les ciutats a la vista de l'actual situació d'alta ocupació superficial. Igualment, l'increment en la construcció de túnels de base, ha portat també a disposar de més quilòmetres de infraestructura soterrada, fora de l'àmbit urbà, i a profunditats importants.

2.1 GÈNESI I TIPOLOGIES DE TRANSPORT SUBTERRANI

El túnel neix de la necessitat de superar obstacles naturals, generalment massissos muntanyosos. Però a més a més de la muntanya, existeixen altres barreres que es poden salvar mitjançant túnels com són els cursos d'aigua – fluvial o marina – o el pas per zones urbanes en les que és molt habitual la presència de túnels que permeten oferir tant serveis de transport com altres serveis de caire urbà evitant la interferència amb la malla de la ciutat.

Entre els usos més freqüents dins de l'àmbit urbà podem enumerar els túnels per a vehicles, per a xarxes de ferrocarril, per a ús peatonal, per abastament d'aigua, sanejament, galeries de servei...

Si bé el túnel en sentit estricte es caracteritza pel seu marcat caràcter lineal, aquí es considerarà, per extensió, el terme túnel en sentit ampli, no sols com a obra lineal sinó com a element subterrani que inclou amplis espais transitables dins del que podria englobar-se com urbanisme i espai subterrani; en suma, el túnel com a obra de trànsit i també com hàbitat.

La gènesi del transport subterrani es remunta, en l'àmbit urbà, a la necessitat d'esponjar els antics entramats urbans on coexistien els transports privats, els transports públics i els vianants. Pel que fa a l'àmbit extraurbà, el catalitzador del soterrament de certes infraestructures de transport ha estat en gran mesura els condicionants geomètrics dels traçats, cada cop més estrictes en matèria de pendents, radis i capacitats entre d'altres factors.

En l'àmbit dels transports, el primer túnel ferroviari fou el de Terre-Noir a França, de la línia Roanne-Andrezieux, camí de carrils traccionat per cavalls, construït en 1826 amb 1.476 metres de longitud, 5 metres d'alçada i prop de 3 metres d'amplada.

Els ferrocarrils de vapor, que van tenir el seu origen a Gran Bretanya, es van multiplicar de forma important entre els anys 1830 i 1845. El ferrocarril de Liverpool a Manchester, obra d'Isambard Kingdom Brunel fou el primer; aquesta línia creuava la muntanya mitjançant dos túnels, un de 4.8 km i un altre de 1.6 km. En l'actualitat aquestes xifres son anecdòtiques, però llavors eren gestes històriques.

Ara bé, la història dels túnels esdevé frenètica amb el naixement del Ferrocarril Metropolità a Londres en 1863. És a partir d'aquest on el creixement de les grans ciutats adquireix una nova dimensió. Es permeabilitzen les ciutats, es dinamitzen i es nodreixen d'una xarxa cada cop més extensa que assegura un transport col·lectiu urbà

més ràpid, segur i eficaç; generant a la vegada un potent escenari subterrani, on es contraposen a les antigues estructures elevades agressives visualment i acústicament com el Metro elevat de Nova York o el Loop de Chicago. El Metro subterrani proporciona un espai propi i interior comunicant la ciutat per dins seu i aflorant en superfície amb elements, a vegades tan singulars com els edicles Art Nouveau d'Héctor Guimard del Metro de París o les estacions d'Otto Wagner a Viena.

2.2 EVOLUCIÓ DE LA FONDÀRIA AMB EL TEMPS DE LES INFRAESTRUCTURES QUE S'HAN ANAT CONSTRUÏT.

Inicialment, les infraestructures van ocupar la superfície, independentment de la seva naturalesa. És el cas per exemple dels serveis urbans tals com les recollides d'aigües, les xarxes de distribució elèctrica, on les primeres discorrien a nivell de terra i les segones penjaven en molts casos de les façanes dels edificis. És per tant cabdal considerar l'urbanisme de les ciutats i la seva evolució, l'aparició de noves tecnologies i els seus requeriments, entre d'altres, que han condicionat la ubicació de tots aquests serveis, tant de transports com d'equipaments.

A nivell urbà, els serveis de clavegueram, xarxa elèctrica, gas entre d'altres van anar ocupant el subsòl, i en la majoria de casos, seguint els traçats urbans dels carrers i avingudes. En primer lloc a través de les façanes dels edificis, que servien de suport per cablejats o per les pròpies voreres.

De la mateixa manera, els transports urbans van seguir els traçats viaris ocupant carrers i avingudes a nivell superficial. Així, la Figura 1 mostra l'impacte del tren en el carrer Aragó de Barcelona a principis de segle. L'evolució de la implantació dels serveis de transport va seguir la mateixa tònica a la majoria de les ciutats.



Figura 1 El carrer Aragó (Barcelona) l'any 1915. Font: Renfe.

Els vehicles de tracció animal van deixar pas als sistemes de transport ferroviaris urbans: el tramvia en primer lloc i posteriorment el metro. L'aparició dels vehicles amb motor d'explosió (automòbil i autobús) suposa una revolució pel sistema de transports. Dos modes que s'aniran convertint en els amos del transport de superfície urbà, provocant la substitució dels tramvies pels troleibusos i autobusos.

La densificació de l'ocupació superficial de les ciutats fa entrar en conflicte als diferents mitjans de transport, on el transport privat cada cop guanyava més espai seguint una tendència creixent que ha arribat fins els nostres dies.

L'aparició de les primeres màquines de ferrocarril elèctric va fer que els antics traçats superficials que anaven pel mig del carrer fossin progressivament soterrats.

Aquesta decisió va implicar assumir inicialment cotes poc profundes, on pràcticament el sostre del túnel feia de suport de la via pública. N'és un exemple clar el túnel de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC) durant el seu traçat per la Via Augusta de Barcelona. El recobriment de la clau d'aquest túnel es correspon pràcticament amb la llosa que configura la Via Augusta, tal i com es pot veure a la Figura 2



Figura 2 Projecte de soterrament de la via de FGC a Sarrià el 1952. Font: Imatge de l'arxiu històric de FGC.

Aquest procés de soterrament es trobà amb dificultats. A poca profunditat apareixien els conductes de les xarxes de clavegueram i diferents tipus d'instal·lacions. Això va portar a dissenyar seccions per sota d'aquests elements, fet que va produir que a poc a poc els túnels guanyessin profunditat.

A la vegada, les instal·lacions es van anar densificant i guanyant tamany, donat en gran mesura al creixement continu de les ciutats. A més quantitat d'habitants més volum de serveis i de necessitats, per la qual cosa, el subsòl també es va anar saturant. Aquesta tendència portà a incrementar les profunditats assolides pels túnels a mesura que es generaven noves infraestructures.

Fins aquí hem parlat de traçats que discorrien per l'àmbit urbà, sota carrers i avingudes, però aquest procés de colonialització del subsòl va continuar endavant amb pas ferm.

Un cop tenim el transport sota terra, apareix una nova dimensió que permet plantejar nous traçats, i això és el que va ocórrer d'ençà en endavant. D'aquesta manera es podien perllongar línies de metro per sota de les edificacions, salvar fonamentacions això sí, guardant els recobriments preceptius que garantissin l'estabilitat de les mateixes. D'aquesta manera les limitacions imposades pels carrers desapareixen i permet al transport públic accedir i connectar àmbits trencant l'entramat de vies urbanes existents, que constrenyia els traçats previs.

Així mateix el subsòl es va anar saturant, i les línies del suburbà van començar a creuar-se en profunditat amb el pas del temps. Aquest fet va comportar l'establiment d'estrats per on discorrien els diferents traçats i poc a poc aquests van anar incrementant la seva profunditat.

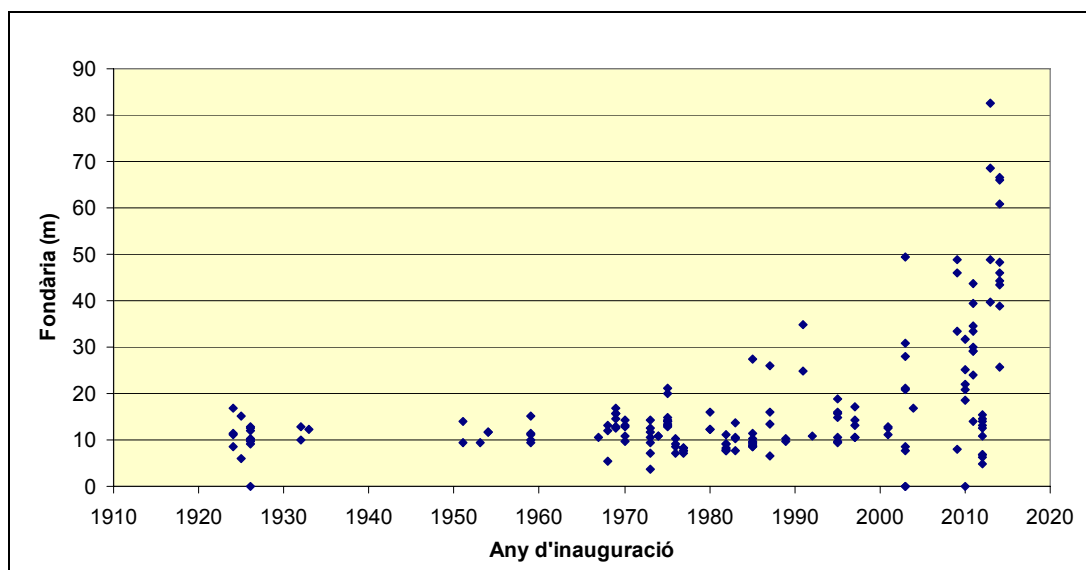


Figura 3 Evolució de la fondària de les estacions de ferrocarril metropolità de Barcelona. Font: Elaboració pròpia.

A la Figura 3 podem observar com a mesura que ha anat passant el temps, les estacions del ferrocarril urbà a la ciutat de Barcelona s'han construït a cotes més profundes. Cal tenir present que el gràfic contempla estacions que encara no s'han executat. Per a la seva elaboració s'han considerat aquelles estacions que es troben en procés d'execució i amb un calendari d'inauguracions establert.

Fora de l'àmbit urbà, ens trobem que les infraestructures de transport subterrani són la via per salvar accidents orogràfics tals com cursos fluvials o principalment massissos muntanyosos (és el cas dels grans túnels de base que permeten creuar els Alps) o, més excepcionalment, creuar mars, com és el cas del Túnel sota el Canal de la Mànega. En general, la profunditat d'aquestes infraestructures ve donada per l'accidentalitat del relleu a superar. Així doncs l'avanç en la tècnica de la construcció de túnels ha permès abordar túnels més llargs que creuin massissos més grans i conseqüentment s'assoleixin cotes més profundes.

En l'àmbit terrestre, degut principalment a condicionants geomètrics de traçat (pendents màxims i radis de corba mínims), s'ha evolucionat cap a la construcció de túnels de base, cada cop més llargs i a la vegada més profunds. En la Figura 4 es pot observar aquest fet.

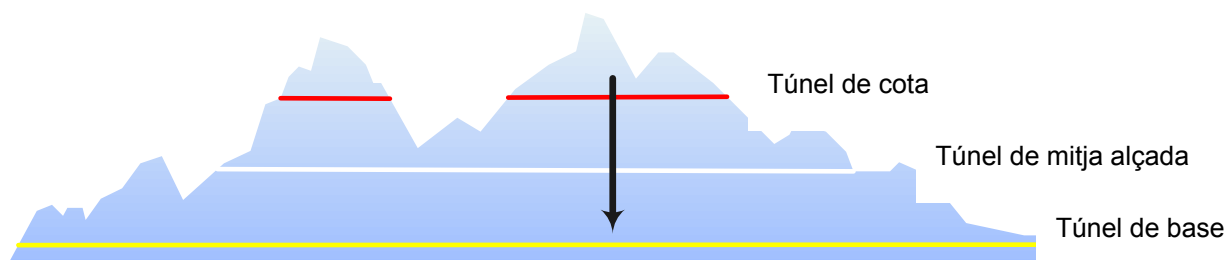


Figura 4 Evolució de la fondària dels túnels de base. Font: Elaboració pròpia.

Sobretot, en les línies d'alta velocitat així com també, i principalment, en les línies dedicades al transport de mercaderies, els condicionants geomètrics han conduït a la necessitat de construir túnels més profunds, i conseqüentment, més llargs.

2.3 CONDICIONANTS DE DISSENY

L'execució i planificació d'infraestructures de gran profunditat ve determinada per un seguit de condicionants a nivell de disseny com són **geologia/geotècnia i obres existents, tècniques constructives, seguretat, i explotació**, entre d'altres.

Tota obra subterrània té un objectiu funcional que és prioritari, però existeixen, pràcticament sempre, altres objectius complementaris, de índole diversa, que s'han de contemplar i que poden tenir una importància decisiva. En el cas que ens afecta, l'objectiu prioritari és donar resposta a les necessitats de transport, així el túnel s'integra en el traçat d'una via de comunicació (ferrocarril o carretera habitualment). Pel que fa als objectius complementaris o addicionals del túnel, tenim l'efecte xarxa, la intermodalitat i la seva promoció per tal d'influir en l'estructura territorial i condicionar-ne el seu creixement d'una manera sostenible

Com a condicionants claus podem dir que directa o indirectament corresponen en la seva gran majoria a exigències de sostenibilitat mediambiental, ja sigui a favor de triar la solució de túnel que permet protegir l'entorn existent, o bé una vegada sigui triada la solució cal imposar en el seu disseny i construcció certs condicionants que garanteixin la sostenibilitat i seguretat del mateix. Podem destacar:

- Impacte mediambiental del disseny. La preservació del valor mediambiental del paisatge, la limitació de sorolls a la zona, la reducció de volums de terres i la reducció de terrenys a expropiar.
- Impacte mediambiental del procés constructiu. Immissió sonora, contaminació de freàtics, afeccions a serveis existents, drets de pas i ocupacions temporals.
- Prevenció de danys físics, tant en construcció com en explotació.

2.3.1 Geologia i obres existents

A nivell de **geologia**, és fonamental la caracterització del terreny que es pretén foradar. L'estudi geològic i geotècnic d'un massís es fonamenta en l'establiment de diverses característiques del mateix. Això es tradueix en els següents punts:

- **Característiques intrínseques del material**, entenent com la valoració del conjunt de roques matrius que componen el massís a nivell de identificació i classificació
- **Avaluació de discontinuïtats**, establint d'aquesta manera la orientació dels plans de fractura per tal de tenir-los presents en el disseny i durant la construcció.
- **Resposta esperada del massís**. Conèixer les capacitats resistents del massís.

És doncs molt important, a nivell de disseny, la geologia del terreny. És un condicionant que s'interrelaciona amb el corresponent a l'elecció de les tècniques constructives, donat que és aquest el que determina, en gran mesura, la metodologia constructiva que es farà servir com veurem seguidament.

Tot i així, la geologia també és important perquè permet tenir un criteri alhora de decidir realitzar les obres en una zona o una altra (o una fondària o una altra) en funció

de la qualitat del material existent, per raons de seguretat i estabilitat de la obra subterrània, factors econòmics, arqueològics (jaciments) etc...

A nivell d'obres existents, el subsòl de moltes ciutats es troben poblats per equipaments tals com serveis urbans, túnels ja existents i fonamentacions d'edificis que cal evitar per garantir la integritat dels mateixos. Podem dir, sense exagerar, que la informació sobre els serveis existents en el subsòl de la zona de la futura obra subterrània és tan important com la relativa a la geotècnica.

2.3.2 Tècniques constructives

Des d'un punt de vista exclusivament teòric, es diu amb freqüència que el sistema constructiu d'un túnel és la simple conseqüència dels estudis bàsics del Projecte, però això és una simplificació que no reflecteix la realitat del procés de disseny d'un túnel.

De fet, la selecció d'una tècnica constructiva o una altra, no depèn únicament d'un factor. Hi ha diversos condicionants tals com la tipologia del subsòl, la profunditat del túnel, la seva longitud, el tipus de secció necessària, la seva funció, el disseny de les estacions, etc, aspectes tots ells interrelacionats que condueixen a una decisió complexa respecte a la tècnica idònia per construir el túnel.

A més a més, cal tenir present que avui dia els projectistes de túnels tenen en compte des d'un principi, els possibles mètodes constructius com un dels temes més importants a considerar i, això explica, una vegada més, per què a les obres subterrànies, més que a cap especialitat, les decisions estan altament interrelacionades.

Bàsicament, els mètodes constructius de túnels es poden classificar en dues tipologies:

- Cut and Cover
- Excavacions pròpiament subterrànies

a) Cut and Cover

Són mètodes que es caracteritzen per la realització d'una excavació des de la superfície mitjançant la creació de dues pantalles i l'excavació del seu intradós, de forma que s'obté una secció de túnel en forma de calaix. Un cop s'assoleix la cota desitjada s'executa la coberta del calaix. Ha estat un mètode molt emprat per a la realització d'estacions de metro i túnels que discorren per sota de carrers, això sí, a poca profunditat, habitualment no més de 20 metres [1]. Requereix evidentment que la superfície es trobi lliure per poder realitzar les obres.

Són mètodes econòmics comparats amb els d'excavació subterrània. A mesura que l'excavació ha de ser més profunda, aquest sistema requereix de mitjans de contenció més potents, encarint considerablement l'execució, fent que siguin més interessants els mètodes d'excavació subterrània que veurem seguidament.

Aquest mètode aplicat a les ciutats, condiona la definició dels traçats, que necessàriament han de discórrer per sota dels carrers, fent més difícil el deslligar-se de la trama urbana per poder arribar a punts d'una manera més directa com es veu a la Figura 5. Així doncs són els carrers els qui marquen el disseny del traçat.

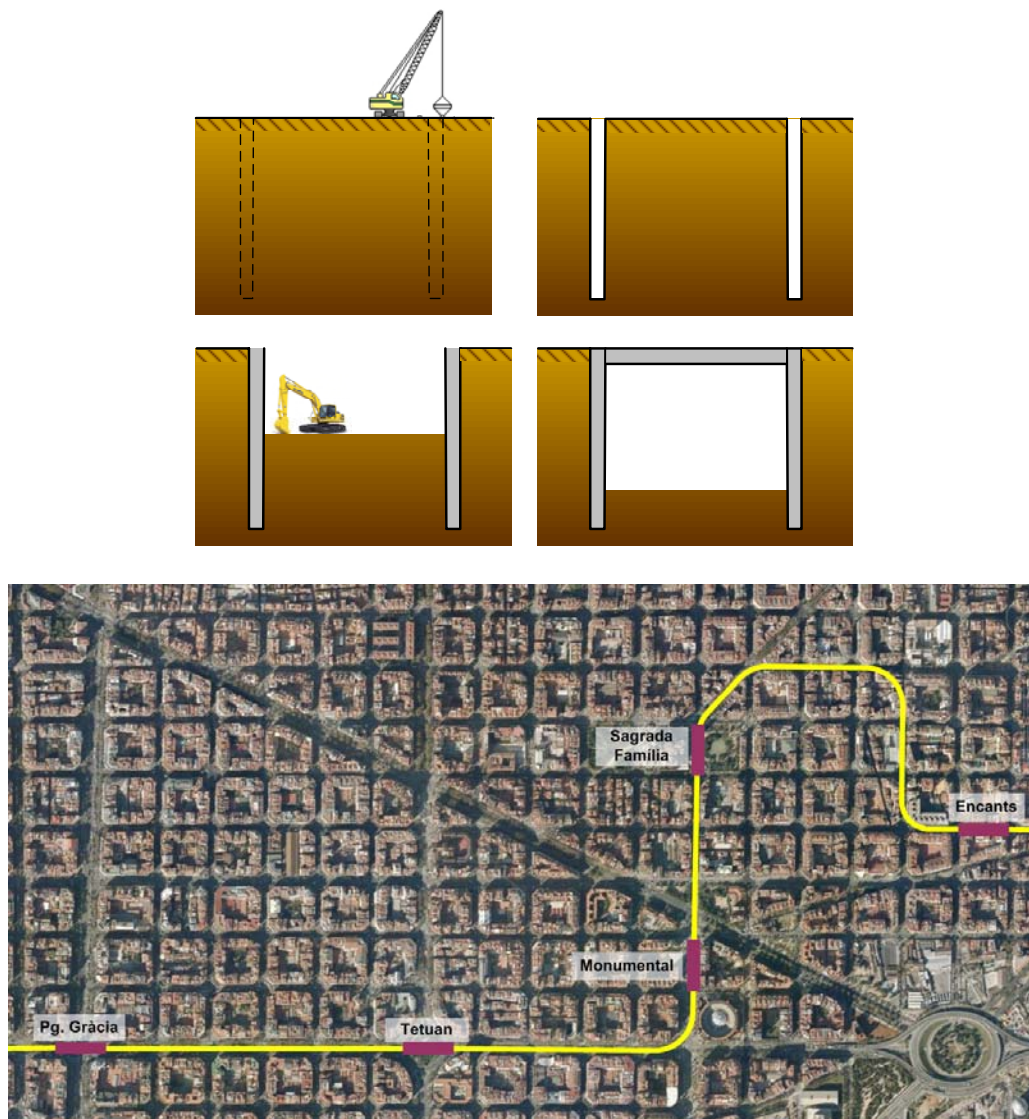


Figura 5 Esquema constructiu mètode cut and cover i el seu condicionament a discórrer per la trama urbana. Cas L2. Font: Elaboració pròpia

b) **Excavació pròpiament subterrània**

L'excavació subterrània permet realitzar l'obra sense afectar en superfície a nivell d'ocupació. Únicament s'afecta a les zona d'abassegament de materials. A més a més, històricament aquests mètodes van permetre passar sota edificis, no essent imprescindible el pas sota carrers com es feia anteriorment, deslligant-se així de la trama urbana i facilitant l'accés a zones d'una manera més directa.

Dins l'excavació subterrània es pot distingir túnels executats amb mètodes tradicionals (màquines puntuals i explosius) i els realitzats amb màquines integrals (TBM¹).

Els primers permeten realitzar túnels sense gaires condicionants geomètrics, donat que el túnel es realitza d'una manera més "artesanal", i alhora de construir són més versàtils.

¹ Túnel Boring Machine

En canvi, els realitzats amb tuneladores, són túnels amb una filosofia molt industrial, on les característiques de la màquina condicionen enormement el traçat que es pot obtenir, tant en planta com en alçat (veure Figura 6).

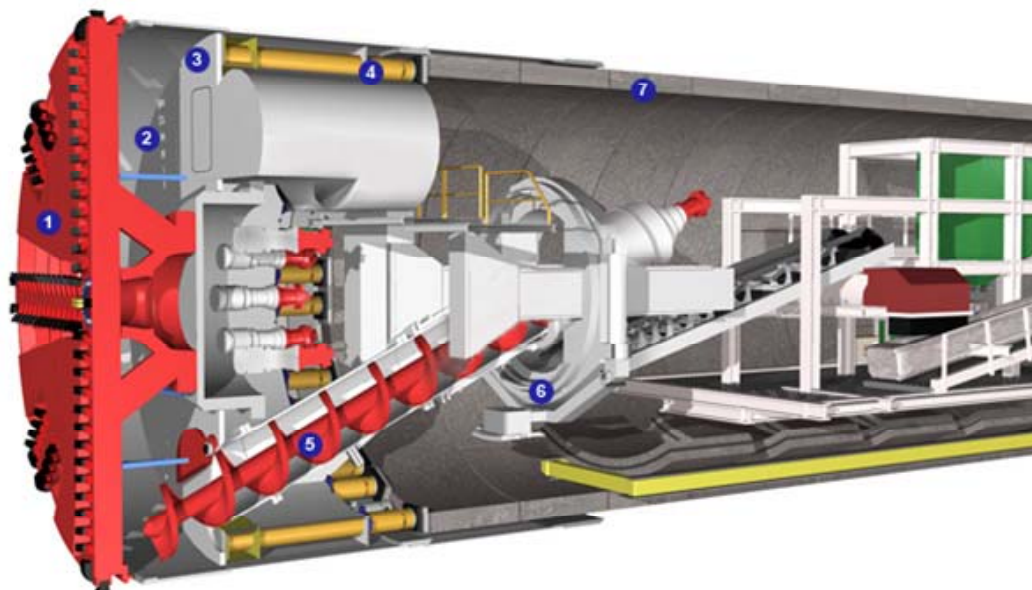


Figura 6 Esquema de tuneladora de la Línia 9. Font: Herrenknecht.

Amb aquests sistemes d'excavació (TBM) els traçats en planta i alçat queden emmarcats en uns radis mínims que venen donats per les característiques pròpies de la màquina, tal i com menciona [2]. Parlem de radis recomanats, no inferiors als 400 metres, en el cas de tuneladores per construir túnels amb diàmetres de l'ordre de 12 m. Radis inferiors a aquest valor produeixen túnels més irregulars a nivell de gàlubs, i d'estanqueïtat del mateix no queda ben resolta tal i com destaca [2].

Estructuralment els túnels efectuats amb tuneladora, si estan executats adequadament, garanteixen un nivell molt baix d'afecció en superfície, permetent realitzar l'avanç amb bons rendiments, sense perjudici de l'estabilitat estructural dels edificis propers, essent aquest mètode, molt emprat en les actuals obres de túnels urbans que s'estan duent a terme a la majoria de països desenvolupats.

Ahora es requereix d'un important treball de documentació i d'inspeccions a nivell de definició del projecte constructiu així com dels serveis que discorren pel subsòl. Això es deu a que es impossible veure el front d'atac que roman pressuritzat contra la roda de tall de la màquina.

Veiem doncs, que a nivell de disseny, les obres subterrànies presenten innumbrables condicionants, que fan que no hi hagi una única solució, i que la tria sigui molt complexa.

2.3.3 Criteris de seguretat

L'afecció a obres exteriors existents és un dels condicionants més importants a nivell de seguretat així com la pròpia garantia d'estabilitat de l'obra subterrània.

El fenomen de la subsidència del terreny superficial, deguda a l'execució del túnel, existeix sempre, tot i que, naturalment depèn molt essencialment de les

característiques del terreny i del mètode constructiu emprat. Així doncs, sistemes fonamentats en mètodes d'excavació no integrals com serien mitjançant explosius o màquines puntuals, tals i com per exemple el Mètode Austríac, produeixen assentaments en superfície més elevats que l'ús de tuneladores. En aquest darrer cas els assentaments són pràcticament imperceptibles, donat que el propi mètode és autoestable.

2.3.4 Criteris d'exploració

A nivell d'exploració, l'ús final que es vulgui fer de la obra subterrània, marcarà inequívocament les característiques tècniques que cal considerar durant la fase de disseny. Es tracta de paràmetres de traçat en planta i alçat, així com el gàlib i la secció necessària.

a) Paràmetres de traçat

En funció del sistema d'exploració previst (trens metropolitans, trens d'alta velocitat, trens de rodalies, trens de mercaderies,...) es poden establir diferents condicionants de traçat. Així, cada tipologia de tren exigeix uns paràmetres de traçat en planta i alçat que cal tenir en compte en la pròpia fase de disseny de la línia.

Per exemple, la circulació de trens de mercaderies resulta molt exigent a nivell de rampes màximes, que no han de superar valors de l'ordre de 15 mm/m. En canvi, l'experiència posa de manifest, que el disseny de línies d'altas prestacions destinades únicament al trànsit de viatgers permet assolir rampes de fins a 40 mm/m (cas de la línia Köln-Frankfurt).

Pel que fa als radis en planta, venen condicionats, principalment, per la velocitat màxima prevista del tren, en el cas de circulació exclusiva de viatgers. Així, la línia Madrid – Barcelona, amb una velocitat de disseny de fins a 350 km/h està projectada amb uns radis mínims normals de 7.000 m.

En canvi, la Línia 9 de metro, amb una velocitat de disseny de 90 km/h presenta radis mínims de 200 m i rampes màximes de 40 mm/m.

b) La secció tipus

Per a la definició de la secció tipus, cal considerar, per una banda, els gàlibs requerits funcionalment, i d'una altra banda l'aproximació a la forma desitjable des de el punt de vista geotècnic, que és la circular.

Les condicions de gàlib resulten de la funcionalitat requerida de la obra finalitzada. Resulten oportuns els següents comentaris:

En el cas més complex d'un túnel de carretera o de ferrocarril, cal tenir en compte els gàlibs requerits pel trànsit (generalment obligats per una Instrucció a complir, per els espais per a conduccions de serveis, drenatges, ventilacions, etc). Aquesta secció tipus determina a nivell geotècnic uns condicionants de recobriments del túnel en qüestió per tal de garantir a nivell estructural l'estabilitat del terreny adjacent i consegüentment de les estructures sensibles que hi hagi.

2.4 MARC NORMATIU A NIVELL DE SEGURETAT.

L'objecte del present apartat és la recopilació i síntesi de la Normativa existent més rellevant en matèria de seguretat de túnels, d'aplicació en l'àmbit ferroviari.

A nivell estatal, en l'àmbit ferroviari, no existeix una normativa d'obligat compliment en matèria de seguretat, fet pel qual les administracions competents s'acullen a normes o recomanacions d'altres àmbits per tal de garantir uns mínims de seguretat a les seves instal·lacions. A nivell nacional, l'Adif, pren com a referència la ISTF-2006, un esborrany del que serà una normativa d'obligat compliment. A nivell català, la Generalitat va editar un recull de recomanacions anomenades "Normes tècniques sobre seguretat contra incendis a la xarxa ferroviària soterrada de Catalunya [4], fonamentades en la NFPA-130 i la norma espanyola NBE-CPI/9.

A més a més, es consideren altres normes, recomanacions i prescripcions d'altres àmbits, que per similitud ajuden a complementar un marc normatiu que garanteixi la seguretat en aquestes infraestructures soterrades.

2.4.1 Normativa Existent

Pel que fa a la normativa existent en l'àmbit de la seguretat en túnels cal distingir entre la normativa aplicable a la pròpia infraestructura i la relativa a les instal·lacions.

a) Normativa sobre seguretat aplicable a túnels

Àmbit estatal

- Recomendaciones para dimensionar los túneles por efectos aerodinámicos. Ministerio de Fomento. 2001.
- R.D. 1627/1997: disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.
- Código Técnico de la Edificación. Març 2006
- REAL DECRETO 393/2007 de 23 de Març pel que s'aprova la Norma Bàsica d'Autoprotecció dels centres, establiments i dependències dedicades a activitats que puguin donar origen a situacions d'emergència.
- Esborrany de la "Instrucció sobre medidas de seguridad en túneles ferroviarios (ISTF 2006)". Normativa en fase de redacció.

Generalitat de Catalunya

- Normes Tècniques sobre seguretat contra incendis a la xarxa ferroviària soterrada a Catalunya. Direcció General d'Emergències i Seguretat Civil. Barcelona. 1997.
- Pla de Protecció Civil de Catalunya (PROCICAT). 1995.
- Instrucció sobre locals pública concurrència.1990.
- Per a més reforçament, la Generalitat de Catalunya, va aprovar el 30.05.1990 una Instrucció (D.G. de Seguretat industrial, Departament d'Indústria i Energia) per la qual es defineix el concepte d'ascensors instal·lats en edificis i llocs de pública concurrència. Concretament els edificis i andanes d'estacions de metro, porten la referència

Administració local

- Ordenança municipal de protecció contra incendis 96 (Ajuntament de Barcelona).

- Pla d'emergències Barcelona.
- Norma Tècnica per a la construcció de túnels viaris al Municipi de Barcelona.

RENFE

- Ventilación de seguridad en túneles. RENFE. 2000.

NFPA (National Fire Protection Association)

- NFPA 130. Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. 2003 edition.
- NFPA 750. Standard on water mist fire protection systems

UIC (Unió Internacional de Ferrocarrils)

- Safety in railway tunnels. UIC. 2002.
- Report IF 4/91. UIC. 1991.

Alemanya

- Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes and den Bau und Betrieb von Eisenbahntunnel, Richtlinie, Eisenbahn Bundesamt, 1997. Actualització en febra 2001. Aquest document, editat l'1 de novembre de 2001, és una actualització de l'editat l'1 de juliol de 1997 i va ser redactat per experts de diversos Lander Alemanys, dels Bombers professionals d'Alemanya, de la companyia ferroviària Deutsche Bahn i del Consell General de Ferrocarrils (Eisenbahn-Bundesamt). Aquesta disposició (coneguda per les sigles EBA) és l'adoptada per RENFE per a distàncies entre sortides de túnel (máx.1000 m) però fa referència a ferrocarrils no-metropolitans.

França

- La sécurité dans les tunnels ferroviaires. S.N.C.F. PARÍS. Junio 1996.
- Instruction Technique (Nº 98-300) Interministerielle (Intérieur et Équipement) relative a la sécurité dans les tunnels ferroviaires, du 8 juillet 1998.
- Circulaire Nº 99-539 Interministerielle (Intérieur et Équipement) établissant un diagnostic de la sécurité dans les tunnels ferroviaires, du 20 octobre 1999.

AENOR – CENELEC

- EN 50126: Railway Applications – the specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (rams). 1999.

b) Normativa sobre seguretat aplicable a instal·lacions

Administració Estatal

- RD 1942 / 1993: Reglamento de instalaciones de protección contra incendios.
- REBT (Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión) pel que fa a les estacions, no als túnels. Les estacions de viatgers tenen consideració

de locals de pública concurrència (arts.14-15); ITC-MIE-BT 025, punt 1.2.

AENOR

- UNE-EN 12 101-3. Sistemas de control de humos y calor. Parte 3: Especificaciones para aireadores extractores de humos y calor mecánicos.
- UNE-EN 20 460-3. Instalaciones eléctricas en edificios. Parte 3: Determinación de las características principales.
- UNE-EN 50 265, UNE-EN 50 266, UNE-EN 50 200, UNE-EN 50 258, UNE-EN 50 267, UNE-EN 50 268, UNE-EN 20 432.

3 EL TRANSPORT FERROVIARI URBÀ. GENERALITATS

En aquest apartat tractarem el Transport Ferroviari Urbà. Aquest contempla totes les infraestructures de transport ferroviari que operen en l'àmbit de les ciutats. Parlem de línies de metro i línies de rodalies de les que farem una descripció funcional des del punt de vista de l'usuari, i finalment analitzarem amb l'objecte d'observar les solucions a nivell de gestió dels usuaris a nivell de transport i de seguretat.

Es tracta d'un tipus de ferrocarril destinat al transport ràpid de viatgers per l'interior d'una ciutat. Ha estat un mitjà de transport molt característic de les grans ciutats i conurbacions, on la seva implantació era competitiva vers altres modes de transport amb menys requeriments d'infraestructura i en conseqüència, econòmics.

El seu recorregut és generalment subterrani, o elevat mitjançant viaducte, per tal de no interferir amb el trànsit urbà. Les estacions es troben situades generalment a poca distància les unes de les altres (la pràctica estableix que separades uns 600 m), tot i que no necessàriament quedant aquesta característica, sotmesa a criteris de superfície de captació i demanda.

Els vehicles de transport presenten una configuració diferent als tradicionals trens de llarga distància per tal de afavorir la càrrega i descàrrega, disposant de més capacitat per a viatjar de peu en detriment de les places de seient. Això es deu a la alta rotació de viatgers que és característica d'aquest mitjà de transport.

Darrerament s'estan generalitzant els sistemes de conducció automàtics mitjançant avançats sistemes de control que garanteixen elevades prestacions de servei i les màximes garanties en matèria de seguretat.

Les característiques geomètriques són pròpies de cada línia i de la data de la seva creació. Els amples han vingut imposats per criteris del moment del seu disseny i és per això que trobem diferents amples de carril, radis mínims, i seccions de túnel entre moltes altres característiques.

Habitualment s'integren amb altres mitjans de transport públic, l'anomenada intermodalitat, tals com tramvies, autobusos o altres mitjans de transport. El metro és un sistema de transport més ràpid i amb major capacitat que el tramvia o el tren lleuger, però no és tan ràpid ni avarca llargues distàncies com el tren suburbà. La seva capacitat de transport de grans quantitats de passatgers en distàncies curtes amb rapidesa i ús mínim d'espai és indiscutible.

Malgrat la tendència expansiva de les xarxes de metro de les grans ciutats, que les ha portat a connectar amb altres nuclis de població, el tipus de servei prestat continua essent independent i distingible del que efectuen altres sistemes de transport ferroviari.

El primer metropolità fou el de Londres, construït el 1863, amb 6 quilòmetres de longitud. En els anys successius, es va anar ampliant de forma que en 1884 formava un anell d'aproximadament 20 quilòmetres. A continuació se li van afegir línies radials, en part a cel obert i en part en túnel, per constituir l'anomenat Metropolitan District Railway. Les locomotores llavors eren de vapor. Posteriorment es va iniciar la excavació de túnels en forma de tub i es va procedir a electrificar les línies. D'aquesta iniciativa neix la denominació anglesa Tube, nom amb el que s'identificava aquest mitjà de transport. La següent ciutat en tenir metro fou la de New York, que disposava també d'una línia totalment separada del tràfic, la West End de BMT. Cronològicament,

el tercer metro més antic del món (i el més curt) és el de Istanbul. El tram conegut com Tünel fou inaugurat en 1876 i comunica el barri de Karaköy amb la Torre Gàlata. Es va construir entre 1871 i 1876 per una empresa anglesa amb un projecte d'un enginyer francès: Eugene Henry Gavand. Té 570 metres de distància i el trajecte dura només dos minuts (veure Figura 7)



Figura 7 Imatges del metro d'Istanbul. Font: [11]

En 1896, Budapest (amb la inauguració de la línia de Vörösmarty Tér a Széchenyi Fűrdő, de cinc quilòmetres) i Glasgow (amb un circuit tancat de 10 quilòmetres) foren les següents ciutats europees en disposar de metro. A partir del segle XX comença la expansió per Amèrica Llatina, Oceania, Àfrica i Àsia, on el creixement ha estat més gran en els últims anys. Més de 160 ciutats tenen sistemes de transport ràpid, amb un total de més de 8.000 quilòmetres de vies i 7.000 estacions [2]. Unes altres 25 ciutats tenen nous sistemes en fase de construcció a data de 2009.

El metropolità de Londres té la xarxa més extensa d'Europa (388 km), només superada pel de Nova York (396 km). El de París, inaugurat el 1900, té 180 km. El metropolità de Budapest (10 km), construït el 1896, fou el primer de l'Europa continental com ja s'ha comentat anteriorment. El primer metropolità de l'estat espanyol fou inaugurat, a Madrid, el 1919.

El metropolità de Moscou (146 km), inaugurat el 1935, és notable per la sumptuosa ornamentació de les estacions. Filadèlfia (74 km), Chicago (145 km) i Nova York foren cèlebres per llurs ferrocarrils elevats. El de Nova York fou construït el 1870. Des del 1904 té també línies subterrànies, algunes de les quals amb quatre vies, recorregudes per trens ordinaris i per trens expressos, amb servei ininterromput durant vint-i-quatre hores.



Figura 8 Imatges del metro Moscou i Londres d'esquerra a dreta. Font: [12]

El 1924 s'inaugurà a Barcelona la primera línia del Gran Metropolità de Barcelona SA, Lesseps-Catalunya, ampliada el 1934 fins a Correus i el Liceu, d'ample internacional (1435 mm) i amb alimentació per mitjà de catenària de corrent continu a 1200 V. L'any 1926 fou inaugurada la línia anomenada Transversal, del Ferrocarril Metropolità de Barcelona SA, amb un ample de 1 674 mm i alimentació per mitjà de tercer carril de corrent continu a 1 500 V. Ambdues companyies formen actualment una sola empresa de propietat municipal (Ferrocarril Metropolità de Barcelona SA / SPM) que explota (2009) sis línies que sumen un total de 167 km i 115 estacions. El Ferrocarril de Sarrià a Barcelona SA, que des del 1979 forma part dels Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, explota dues línies, que des del 1905 tenen caràcter de metropolità, amb un total de 7,6 km.

Barcelona, Madrid i sobretot, París tenen una xarxa densa i concentrada al centre urbà, i sense ramals excessivament llargs. Londres, Nova York i Tòquio tenen també una densa xarxa al centre, però les seves línies es prolonguen fins els suburbis (veure Figura 9)

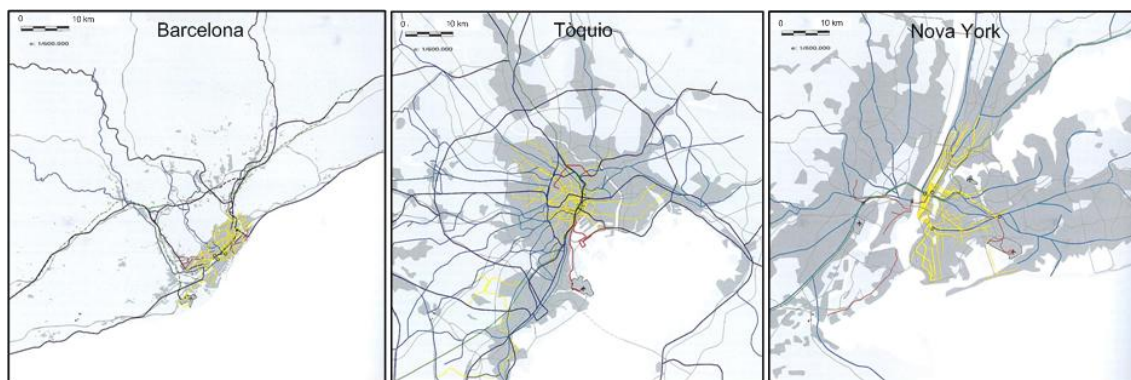


Figura 9 Exemple de xarxes metropolitanes de ferrocarril urbà Barcelona, Tòquio i Nova York. Font:[3]

3.1 LA CADENA DE TRANSPORT.

El metro, com a sistema de transport, està format per una xarxa d'elements que, funcionant conjuntament, formen el que anomenem la cadena de transport.

La cadena de transport del ferrocarril urbà està formada a nivell d'infraestructura per estacions i sistema de transport, és a dir, uns nodes de captació de viatgers i un vehicle que connecta els diferents nodes, ja sigui en superfície, elevat o sota terra.

Seguidament procedirem a explicar quins són els elements que integren la cadena de transport i com és el seu funcionament. Posteriorment farem un estudi de capacitats d'acord amb la normativa actual, analitzarem els conceptes de temps d'evacuació i finalment estudiarem el cas concret del transport vertical en estacions convencionals.

3.1.1 Elements de la cadena de transport

a) Estacions

El sistema metro, està format per una xarxa de nodes anomenats estacions que es troben distribuïts per una unitat geogràfica (Figura 10)



Figura 10 Exemple de xarxes de nodes de les ciutats de Nova York i Madrid. Font: MTA New York City Subway i Metro de Madrid

Aquests nodes, presenten característiques molt diferents en funció de la ubicació del mitjà motor de transport, d'ara en endavant anomenat ferrocarril. Aquestes poden ser:

- Elevades
- Superficials
- Subterrànies

La primera tipologia respon a estacions on el ferrocarril discorre elevat per sobre d'una infraestructura que el segrega de la resta de mitjans de transport. Aquesta infraestructura acostuma a ser un viaducte o algun tipus d'edificació que el sosté.



Figura 11 Exemple d'estació elevada al Metro de Santiago de Chile. Font: Ariel Cruz

La segona tipologia, respon a estacions on l'accés al ferrocarril esdevé a peu pla. En aquest cas trobem que el tren circula al mateix nivell que la resta de vehicles compartint en alguns casos plataforma de trànsit. És el cas d'estacions de ferrocarril antigues que amb el creixement de les ciutats han fet que aquestes estacions s'integressin dins de l'urbanisme de l'entorn. És molt freqüent fora de l'àmbit del metro, en Tramvies o Ferrocarrils de mitjana o llarga distància. Tot i així el creixement de les ciutats ha portat, tal i com esmentàvem anteriorment a reconvertir aquests mitjans i integrar-los dins del sistema metro (Veure Figura 12).



Figura 12 Exemple d'estació superficial. Metro de Minnesota. Font: Metrotransit

La tercera tipologia d'estacions, és la que presenta un impacte menor sobre l'urbanisme (veure Figura 13). El ferrocarril discorre pel subsòl a través d'un túnel. Les estacions, presenten elements en superfície que donen accés a un nivell inferior que distribueix els fluxes i condueix als passatgers a la cota on es trobi el ferrocarril. És la tipologia predominant per excel·lència a les ciutats donat que no interfereix amb l'urbanisme de la ciutat, limitant-se el seu impacte als edificis d'accés. Constructivament, l'impacte si que és considerable durant les obres, degut a la ocupació que en major o menor mesura, porta associada la seva construcció a cel obert.



Figura 13 Estació de Metro de Bilbao. Estació subterrània. Font: Metro de Bilbao

Amb aquestes tres tipologies queden definides les estacions en matèria d'ocupació en superfície.

En un altre àmbit de conceptes, però sense deixar de banda les estacions, en una línia de metro, trobem dos tipus d'estacions.

- Estacions d'extrem
- Estacions passants

Les primeres estacions corresponen a aquelles estacions situades a les puntes de la línia. També s'anomenen estacions terminals. El tren, un cop arriba a elles, s'atura i emprèn el sentit contrari, si el model d'exploatació així ho requereix. Les segones son estacions intermèdies.

Un altre concepte molt important dins de l'estudi de les estacions com a elements d'interrelació és la **intermodalitat** o correspondència.

Es tracta d'un concepte molt propi del metro, i es tracta d'estacions que presenten correspondència amb estacions d'altres línies de ferrocarril o que comparteixen la mateixa estació. Així doncs podem classificar-les en:

- Estacions simples
- Estacions intercanviadores

Les primeres corresponen a aquelles estacions que només permeten l'accés a una única línia de metro. La majoria de les estacions presenten aquesta tipologia.

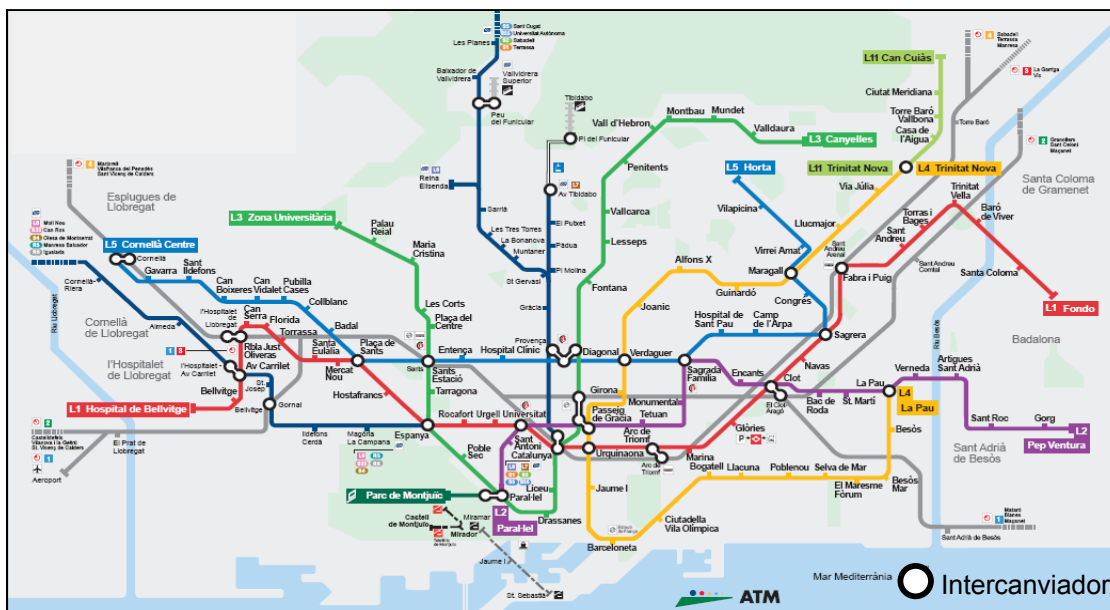


Figura 14 Estacions intercanviador a la xarxa de FMB. Font: ATM.

Les segones (veure Figura 14), són estacions que poden permetre l'accés a dos o més línies de ferrocarril, ja sigui metro, mitja o llarga distància, o fins i tot amb altres modes de transport com l'autobús, tramvia, etc. La característica principal és la vocació que generalment presenten alhora de realitzar l'intercanvi, afavorint la rapidesa, agilitat i facilitat². L'intercanvi pot realitzar-se o no al mateix nivell, condició que pot generar una gran complexitat logística i constructiva d'aquestes estacions.

² Tot i així es fàcil trobar estacions on l'intercanvi es un veritable calvari per a l'usuari.

Com hem comentat, aquests serveis poden compartir una única estació, o tenir-ne una cada servei, però molt properes, que mitjançant galeries o vials en superfície les connecten i faciliten l'intercanvi entre els diferents transports que hi disposen.

b) Material mòbil

S'anomena material mòbil ferroviari a una gran diversitat de vehicles. Aquests vehicles són els encarregats de realitzar el transport entre les estacions de la línia que serveixen. El desplaçament el realitzen per sobre de perfils d'acer anomenats carrils que conformen el sistema via (veure Figura 15)



Figura 15 Material mòbil de Metro de Madrid. Font: CAF.

En els inicis, aquests vehicles eren propulsats per motors de combustió, generalment vapor, però el soterrament d'aquests i la gran contaminació de l'aire que provocaven, van conduir a la implementació dels motors elèctrics. Aquests requereixen d'una infraestructura de subministrament continu d'electricitat (catenària, tercer carril, etc). L'ús de motors elèctrics fou també un dels catalitzadors pel soterrament d'aquelles línies que recorrien a cel obert.

Generalment, la capacitat del material rodant vé associada a característiques geomètriques i de composició que determinen quants passatgers poden viatjar. Així mateix, la longitud de les andanes de les estacions on dona servei també determina la longitud de la composició de vehicles, entre molts altres factors.

3.1.2 Cadena de Transport

Inicialment, s'abordarà una descripció molt general de la cadena de transport, descrivint un funcionament tipus que és força representatiu del conjunt de metros del món. Posteriorment es realitzarà un anàlisi en detall de cada etapa, analitzant si s'escau, tipologies d'elements que puguin aparèixer (per exemple escales mecàniques o ascensors) i un estudi de capacitats dels mateixos.

Per analitzar la cadena de transport del sistema metro s'analitzarà el camí recorregut per un individu que vol viatjar d'un punt a un altre d'una ciutat. Es descriurà quin recorregut realitza i quin és el procediment que fa servir mentre es troba dins del sistema. D'aquesta manera, es posarà en evidència quina és la cadena de transport.

L'individu es dirigeix des de la seva ubicació fins al punt d'accés més proper al mitjà de transport. En aquest cas, es tractaria d'accedir a l'estació més propera del metro.

Un cop arriba al punt d'accés de l'estació de metro, ja sigui a peu, bicicleta o un altre mitjà de transport, accedeix a l'estació a través d'algun dels punts de captació, també anomenades "boques de metro" que es troben al voltant de l'estació. Aquests punts poden ser de diferent tipus, ja s'especificarà amb més detall, però a tall d'exemple podríem trobar escales fixes o mecàniques o fins i tot edicles amb ascensor, elements que ens permeten l'accés a l'estació.



Figura 16 Accés estació Bagatza de Metro de Bilbao. Font: Metro de Bilbao

A través dels elements anteriors s'accedeix al vestíbul un espai on l'usuari trobaria una discontinuïtat entre l'espai públic i l'espai purament restringit als passatgers. Aquesta divisió és present mitjançant les línies de validació de bitllet presents a la majoria d'estacions, on l'usuari valida el seu títol de transport i accedeix en ple dret al sistema de transport (veure Figura 17)



Figura 17 Línia de validació i màquines de venda de títols de transport. Font: [13]

Els títols de transport es poden adquirir als punts de venda que l'autoritat competent, posi a disposició del ciutadà. Aquests poden ser botigues de la ciutat, punts de venda electrònica, espais amb atenció personalitzada de venda exclusiva de títols, etc... (veure Figura 17)

Cal dir que no a tot arreu es disposa de barrera validadora. És bastant comú a infraestructures antigues o a d'altres sistemes de transport com per exemple els tramvies, que l'accés és lliure però d'obligada validació, ja sigui per mitjans electrònics

o amb la presència de personal autoritzat amb tasques de revisió, validació i venda in-situ.

Un cop es superada la zona de peatge (si n'hi ha) apareix un trànsit fins a la zona d'espera, L'andana (veure Figura 18) . Aquesta zona de trànsit previ a l'andana serà objecte d'estudi posterior al present document, donada la seva complexitat, dins la cadena de transport. Aquest trànsit depèn de la distància, fondària o alçada a la que es trobi l'andana fet que condicionarà el flux de passatgers.



Figura 18 Andana Metro de Madrid. Font: [13]

Un cop el passatger arriba a l'andana, una plataforma longitudinal que discorre paral·lela a la zona d'aturada del vehicle ferroviari, l'usuari accedeix a través de les portes del vehicle, i un cop tancades aquestes, s'inicia la marxa.

El tren s'atura en les parades que tingui programades en el servei que hagi de donar, i l'usuari baixa a la parada que li sigui més adient per arribar al seu destí.

Un cop a l'andana de l'estació de destí, l'usuari pren la sortida, que acostuma a ser la mateixa que faria si volgués accedir, però en sentit contrari. No obstant, hi ha certes infraestructures que disposen de vies alternatives de sortida per a què els fluxes d'entrada no interfereixin amb els de sortida.

Arribat a la zona de peatge, l'usuari pot trobar-se amb una sortida lliure o amb elements de d'obertura única pel sentit de sortida, o que requereixi d'una segona validació del títol de transport per sortir a l'exterior. Aquests elements a grans trets tenen la seva raó de ser per tal de reduir el frau en el transport.

Arribat a la zona pública, fora de l'àmbit de l'estació, l'usuari pren direcció fins al seu punt de destí amb el mitjà de transport que consideri (peu, bicicleta, vehicle privat,...)

És doncs d'utilitat el gràfic de la Figura 19, on s'identifiquen les diferents etapes de la cadena de transport. Com es pot observar, aquesta figura distingeix dos regions corresponents a les estació d'inici i destí, connectades mitjançant el tren. Identifiquem dues zones de trànsit a cada estació, la **zona de trànsit A** i la **zona de trànsit B** que seran objecte d'un anàlisi exhaustiu en el present document.

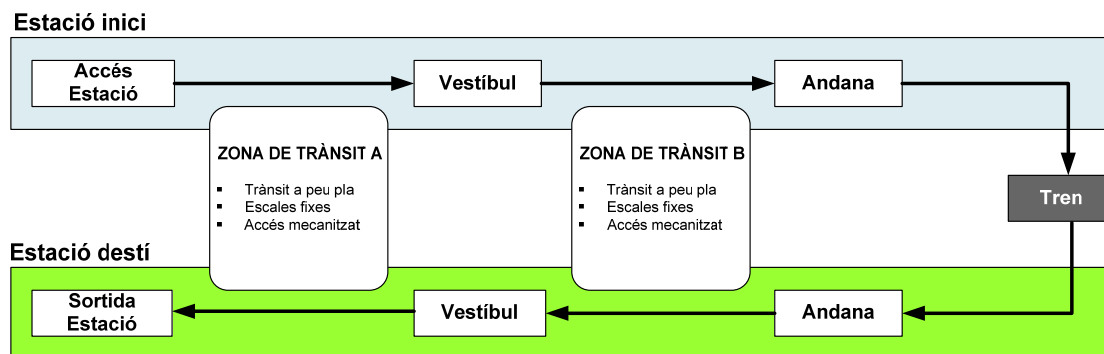


Figura 19 Cadena de transport Metro

Cal aclarir, que el model descrit és el que més similitud té amb la xarxa de metro del nostre país i que ha servit de referència per la descripció. Malgrat això, al llarg del món la disposició dels elements d'aquesta cadena pot diferir o simplement no existir certs elements o tenir-ne d'altres no contemplats en el present anàlisi.

Si es secciona la cadena de transport en els elements que hem comentat anteriorment, identifiquem 6 etapes des del moment que l'usuari es troba a la porta d'accés del metro, fins que accedeix al material mòbil.

Seguidament es detallaran les característiques d'aquests elements, especificant les particularitats que presenten, previ a l'anàlisi de capacitats, que es realitzarà en apartats posteriors.

a) Accés estació

L'accés a l'estació, independentment de la tipologia d'estació que tinguem (citades a 3.1.1), es tracta d'un punt singular dins de l'urbanisme, destacat habitualment per elements que en publiciten la seva presència (veure Figura 16).

Es tracta d'un element que ocupa una porció de superfície de l'espai públic, i que dona accés a l'interior del recinte de servei públic.

En el cas d'estacions subterrànies, que són les majoritàries a les ciutats modernes, i per altra banda, l'objecte d'estudi de la present document, acostumen a presentar uns accessos a l'estació per mitjà d'elements anomenats boques de metro, que ocupen relativament poc espai en superfície i que per mitjà d'escales fixes, escales mecàniques o ascensors, condueixen l'usuari a l'interior de l'estació.

Els elements de transport vertical (escales fixes, escales mecàniques i ascensors), seran tractats en un apartat a banda, on rebran especial atenció a nivell tècnic i de capacitat.

Una estació pot disposar de diversos accessos. Tots porten a un lloc comú, el vestíbul, a través de la zona de transició (si n'hi ha). D'aquesta manera, es pot accedir a l'estació des de diferents punts de l'entramat urbà. Com a tall d'exemple es pot observar la Figura 20:

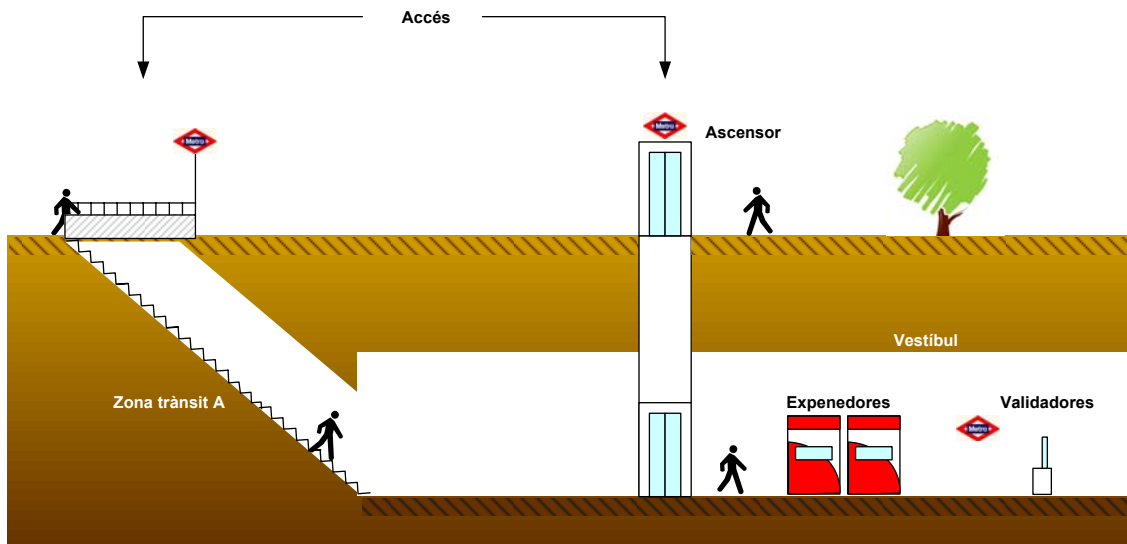


Figura 20 Accés estació subterrània. Font: Elaboració pròpia

b) Zona de transició A

Les zones de transició, són els espais que connecten l'accés de l'estació amb el vestíbul. No obstant hi ha estacions on no hi ha aquesta transició, i el propi accés deixa l'usuari al vestíbul. Únicament destacar que com el seu nom indica, es tracta de zones destinades únicament al trànsit dels usuaris que accedeixen o surten del metro.

En certes estacions, on la distància fins el vestíbul, o fins la sortida és molt gran, es disposen cintes mecàniques que acceleren i faciliten el trànsit de passatgers. Es un recurs molt habitual als grans aeroports, a fi i efecte de reduir les grans distàncies existents. (veure Figura 21).



Figura 21 Cintes mecàniques. Font: [14]

c) Vestíbul

El vestíbul és una zona polivalent. Aquí trobem tots els equipaments que permeten a l'usuari comprar els títols de transport, validar-los i rebre informació relativa al servei de metro.

Es tracta d'una zona de creuament de fluxos. La gent que vol accedir al servei adquireix el títol de transport (si no en té), i valida a les màquines previstes per a tal efecte. Aquest procediment, tal i com s'ha esmentat en apartats anteriors, és variable. Això vol dir que a cada ciutat s'adopta una metodologia, més o menys estesa alhora de processar els viatgers i cobrar-ne el servei. Cal recordar al lector, que s'ha pres com a exemple el model implantat a les grans ciutats europees i a importants ciutats del món.



Figura 22 Vestíbul i línia de peatge. Font: Ifercat 2009

La definició dels equipaments de venda no és objecte de la present document, però si cal destacar els equips de validació emprats, on en cada cas, condicionen l'explotació tant a nivell de processament de passatgers com alhora de garantir-ne l'evacuació en cas d'emergència.

Antigament, la validació del bitllet s'efectuava dins del propi tren, on un agent autoritzat validava el títol. Al sistema metro, aquest procediment s'ha demostrat ineficaç si es pretén controlar el frau, donada la curta i ràpida estada mitja dels passatgers, fent que fos impossible controlar-ne el 100%. Aquesta premissa va portar als sistemes de validació previ a l'entrada al tren, establint-se unes barreres que, prèvia validació del títol, permetien l'accés individualitzat del client. Igualment, es pot disposar d'una barrera de sortida, que teòricament impedeix l'accés de la gent sense títol, però garanteix la sortida de qui surt de la estació (veure Figura 17 de la pàgina 32).

La picaresca i l'evolució de la tècnica, van anar donant forma aquests dispositius, cada cop més avançats, conceptualment i tecnològicament, disposant de barreres amb sensors de pas, barreres més altes per impedir-ne el seu sobrepassament, i ja en els últims temps, la incorporació de la validació de sortida, que crea un circuit tancat, a fi i efecte de reduir-ne el frau.

d) Zona de trànsit B. El transport vertical.

L'usuari, un cop ha deixat enrere el procés de validació, es dirigeix fins al punt d'aturada del tren, l'andana. Aquesta etapa, que nosaltres hem anomenat Zona de Trànsit B, és una zona, on l'usuari viatja, i a la vegada tria quina direcció de transport vol agafar. Independentment de l'ordre dels factors que presenti l'estructura de l'estació, si l'andana desitjada no es troba al mateix nivell, és a dir, encara s'ha de baixar a més profunditat, apareix un factor important que és el transport vertical. En aquest cas, històricament les escales fixes han estat les predominants. L'avenç de la tècnica, la millora d'accessibilitats i l'augment de la fondària de les estacions, ha portat a mecanitzar aquests desnivells amb equipaments per a tal fi. És doncs important considerar aquests equips en tant que a capacitat, donat que esdevenen peces fonamentals dins de la cadena de transport (veure Figura 23)

Aquests desnivells s'han equipat habitualment amb ascensors i escales mecàniques. Sistemes amb la mateixa finalitat, però amb prestacions funcionals molt diferents.

A l'apartat següent s'analitzarà amb detall ambdós sistemes, tal i com s'ha comentat a la part introductòria del present capítol. De l'estudi que es farà a posteriori d'aquests equipaments, podem avançar al lector, que juguen un paper important en el concepte dels temps de trasllat de l'usuari, així com en les capacitats netes que en casos de grans evacuacions condicionen l'estratègia prevista de sortida pels passatgers.

També cal destacar, que en funció de la demanda puntual que hi hagi d'aquest transport i de la capacitat en servei, es poden generar acumulacions de passatgers. Aquest fet és cabdal alhora de dissenyar els espais que permetin gestionar la generació de cues quan la demanda de transport superi la capacitat del sistema. Per aquest motiu acostumen a aparèixer petits vestíbuls que serveixen d'interfase amb el transport vertical.

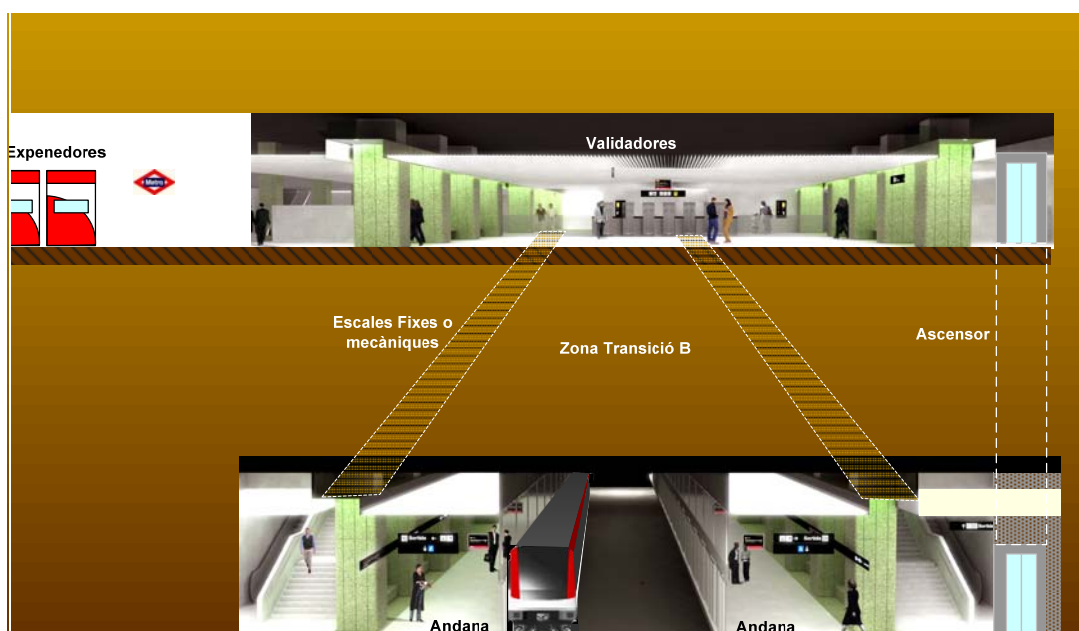


Figura 23 Esquema Zona de Transició B. Font: Elaboració pròpia

e) **Andana**

Finalment, l'usuari arriba a l'andana. Aquest espai es destina com a zona d'espera previ a l'embarcament al vehicle. El disseny d'aquests espais ha de permetre la coexistència del flux de sortida del tren amb el flux d'entrada de passatgers, fet pel qual la disponibilitat d'espais i la correcta senyalització és cabdal per la gestió d'aquests fluxos (veure Figura 24)

Habitualment trobem en aquest espai mobiliari per fer l'espera dels passatgers més còmoda. Parlem de bancs, recolzaments varis, i tot un seguit d'equipaments a nivell d'ajuda a l'usuari, mapes, papereres, interfonia i altres. Com s'ha indicat, és una zona d'espera. Tot i així l'austeritat és la nota predominant, donat que el temps d'espera del passatger en condicions normals no acostuma a ser gaire elevat. Com a tall d'exemple, a la xarxa urbana de FGC a la línia del Vallès és de 3 minuts. Actualment

s'està complementant aquest espai amb equipament multimèdia, generant un espai explotable a nivell comercial mitjançant publicitat i altres serveis.



Figura 24 Zona de transició B i andana. Font: Ifercat 2009

f) Transport entre estacions

Un cop arriba el tren a l'àmbit de l'estació, s'atura davant l'andana. Hi ha passatgers de l'interior del tren que baixen i els que esperen a l'andana que volen accedir al tren.

Una vegada han accedit al tren, aquest tanca les portes i emprèn la marxa cap a la propera estació. L'interior dels vehicles es troba adaptat al tipus de transport que es realitza, disposant de seients, però amb una gran superfície destinada als passatgers que van de peu. Això és fonamental per la gran rotació de passatgers que s'origina en aquest tipus de transport, fet pel qual, la disponibilitat de places destinades a anar assegut són més reduïdes, afavorint el moviment dels passatgers (veure Figura 25)



Figura 25 Interior vehicle Alstom Metropolis C830. Font: GNU Free Documentation License

Arribats a aquest punt, l'anàlisi de la cadena de transport reproduïx l'esquema inicial dins de l'estació però en sentit contrari, fet pel qual no caldrà desenvolupar-la de forma extensiva.

3.1.3 Estudi de capacitats

En aquest apartat, s'anitzaran les capacitats dels elements que integren la cadena de transport.

Per realitzar aquest anàlisi, es parteix de la base de què les capacitats dels elements, han estat calculades per a casos d'evacuació. Això es fonamenta en que al tractar-se

d'espais amb alta ocupació, cal garantir a l'usuari que en cas d'emergència el sistema li permetrà sortir de la estació o accedir a un lloc segur, fet pel qual en les etapes de disseny, el criteri fonamental serà el de la seguretat.

Les capacitats mínimes venen marcades per una banda per les normatives que són d'aplicació a l'àmbit estudiat, i per altra banda, per les prestacions que ofereixin els equipaments. Així doncs es poden prendre com a valors de referència els següents que es corresponen amb els que marca la Norma Tècnica sobre seguretat contra incendis a la xarxa ferroviària soterrada de Catalunya [4]. Igualment es prendrà en consideració els criteris adoptats per Ferrocarril Metropolità de Barcelona (FMB). Tot i així com hem vist en apartats anteriors, existeixen altres normatives, també d'aplicació que aportarien més criteris alhora de dissenyar.

Així doncs els criteris d'anàlisi per avaluar les capacitats d'evacuació de les estacions són els següents:

1. Totes les estacions disposen, almenys de dues sortides diferents, alternatives i accessibles.
2. El temps d'evacuació des del lloc més allunyat de l'andana fins a un lloc segur ha de ser inferior a 6 minuts.
3. Hi ha d'haver prou passos de sortida per evacuar des de les andanes tota la càrrega d'ocupació de l'estació en 4 minuts o menys.
4. La capacitat de les sortides de les andanes, passadissos i rampes fins a un 4% pren com a base passos de sortida de 60 cm d'ample. Aquesta amplada es mesura en el punt més estret sense obstacles. La capacitat per pas de sortida és de 50 pax/minut i la velocitat de marxa és de 60 metres/minut.
5. La capacitat de les sortides de les escales fixes, escales mecàniques, passadissos mòbils, replans i rampes amb un pendent superior al 4 % pren com a base, passos de sortida de 60 cm d'ample (1.5 passos si són de 80 cm, i 1 pas si tenen menys de 80 cm). Aquesta amplada es mesura en el punt més estret sense obstacles. La capacitat per pas de sortida és de 35 pax/minut en direcció de pujada, i 45 pax/minut en direcció de baixada; les velocitats de marxa són 15 metres/minut i 20 metres/minut respectivament.
6. La capacitat de les barreres tarifàries és de 50 pax/minut en les de tipus PAR³ i de 25 pax/minut en les de tipus torniquet. En la situació d'emergència totes les barreres són practicables per tal de garantir el flux continu en evacuació.

ELEMENTS	CAPACITAT DE PAS ⁴	VELOCITAT DE RECORREGUT
Passadissos ⁵	50pax/minut	60 metres/minut
Escales ⁶	35 pax/minut ⁷ 45 pax/minut ⁸	15 metres/minut 20 metres /minut
Barreres tarifàries	50 pax/minut les PAR 25 pax/minut les de torniquet	60 metres/minut

Taula 1 Dades de capacitats de pas i velocitat d'elements d'evacuació. Font: [4]
7. Les càrregues d'ocupació de les andanes es detallaran seguidament.

³ Pas automàtic reversible

⁴ Prenent com a base passos de sortida de 60 cm d'ample

⁵ Passadissos i rampes fins a un 4% de pendent

⁶ Escales fixes i mecàniques, passadissos mòbils i rampes amb un pendent superior al 4%.

⁷ Direcció de pujada

⁸ Direcció de baixada.

8. L'últim passatger que abandona l'estació tria, de tots els camins de sortida, el camí amb un temps de recorregut més llarg. Excepte, en aquelles estacions, sobretot en les que hi ha correspondència entre línies de la xarxa, en les quals hi ha diverses sortides i algunes són molt llargues per arribar a un lloc segur; aleshores, s'indicarà, si és necessari, amb cartells quines són les sortides que han d'utilitzar els passatgers en cas d'emergència.
9. En emergència, per al càlcul d'evacuacions, no es té en compte l'aportació dels ascensors. Es considera la capacitat que aportin les escales fixes d'emergència, així com en cas de tenir escales mecàniques, aquestes últimes es tindran en compte con si es tractessin d'escales fixes.

3.1.4 Càlcul dels temps d'evacuació.

El càlcul del temps d'evacuació de les estacions s'examina sota un determinat escenari d'emergència que determina la càrrega d'ocupació de cada estació de la xarxa.

a) Escenaris d'emergència.

L'emergència es produeix en un tren d'una andana qualsevol en un dia mig de l'any durant el quart d'hora punta. El tren té totes les portes obertes, al igual que les corresponents portes de vora l'andana.

Es tracta d'una evacuació ascendent, a diferència de la clàssica d'un edifici que és descendent (excepte si ens trobem en un soterrani).

b) Càrregues d'ocupació.

La càrrega d'ocupació de l'estació és la suma de tots els passatgers que es troben a l'andana i al tren que s'ha avariat, en una estació qualsevol de la xarxa.

Hi ha dos criteris possibles per la càrrega d'ocupació.

- **Demanda.** Cada estació és diferent. S'aplica sobretot en sistemes de transport on es disposa d'informació de demanda, matrius origen/destí, etc.
- **Infraestructura.** Totes les estacions són iguals. Normalment en sistemes de transport nous o dels quals no es disposa d'informació d'ús.

c) Ocupació de les andanes.

La càrrega d'ocupació de l'andana és la suma de viatgers que han accedit a l'andana durant els 15 minuts de màxima afluència⁹ en una estació qualsevol de la xarxa. Aquesta es calcula en base a la metodologia descrita a [7] a partir de les següents dades disponibles:

- Distribució horària del nombre de validacions de cada estació de la xarxa de en un dia mig de l'any actual.
- Nombre de passatgers que realitzen correspondència entre les diferents línies de metro si hi ha correspondències.

⁹ Es tracta del temps necessari que es considera per activar el Pla d'Emergència segons TMB

- Nombre de passatgers estimat de les noves estacions de la xarxa de que estaran operatives a l'any horitzó.
- Nombre de passatgers estimat que realitzaran correspondència en les noves estacions de la xarxa que estaran operatives en l'any horitzó.

Amb les dades anteriors i aplicant la següent metodologia s'obté l'ocupació de les andanes de les estacions de la xarxa de l'any horitzó.

1. Primer es projecten les validacions i les correspondències del present any fins a l'any horitzó amb un increment anual del 2,5%¹⁰.
2. S'aplica un percentatge de frau representatiu de la realitat. Com a exemple tenim una dada de l'ATM del 2%.
3. A partir de les dades anteriors, es selecciona el volum horari de cada estació corresponent a l'hora punta de la línia, i es suma amb el volum de correspondències d'hora punta (en el cas de que hi hagi correspondència), i s'aplica el factor de frau. D'aquest volum s'obté el ¼ d'hora punta de cada estació dividint-lo per quatre i aplicant un coeficient d'hora punta del 25% al resultat anterior:

$$V_{1/4} = \left(\frac{(V_i + C_i) * FF}{4} \right) * FHP_{11}$$

4. El quart pas consisteix en establir un criteri de distribució del V¼ i a cada andana, segons la situació de l'estació "i" a línia. Principalment, en estacions centrals el repartiment dels passatgers és del 50% a cada andana, i en estacions extrems s'utilitza una distribució segons la qual dona majors volums de passatgers a les andanes de principi de línia i menors a les andanes de final de línia.

La distribució establerta (CDi,j) en les andanes de les estacions finals de línia segueix la forma d'una equació polinòmica de grau dos; simètricament la distribució en les andanes de les estacions inici de línia obtenen el volum restant, o sigui, el més gran.

Aleshores, la càrrega d'ocupació de les andanes resultant és igual a:

$$COAi,j = V_{1/4} i * CDi,j^{12}$$

d) Ocupació dels trens

¹⁰ Font TMB

¹¹ V¼ i és igual al volum de passatgers que accedeixen a les andanes de l'estació "i" durant el ¼ d'hora punta, en pax / ¼ d'hora.

Vi és el volum de validacions de l'estació "i" durant l'hora punta de la línia, en pax / hora.

Ci és el volum de correspondències de l'estació "i" durant l'hora punta, en pax / hora.

FHP és el factor hora punta, del 25% (1,25).

FF és el factor de frau, del 2% (1,02)

¹² COAi,j és la càrrega d'ocupació de l'estació "i" en l'andana "j"

La càrrega d'ocupació dels trens és igual a la gent que hi ha dins del tren quan arriba a l'andana de l'estació objecte d'estudi de la xarxa; aquest és el valor més desfavorable que es pot produir, i es calcula a partir de les següents dades disponibles (és important remarcar que no s'acostuma a disposar mai de matriu origen – destinació, donada l'elevada dificultat que suposa a nivell de comptatge).

- Nombre de passatgers en els trens (diagrama de càrrega) de cada estació de la xarxa en un dia mig d'un any de referència.
- Distribució horària del nombre de validacions de cada estació de la xarxa en un dia mig de l'any de referència¹³
- Estimació del nombre de passatgers en un dia mig de l'any horitzó en les noves estacions que entraran en funcionament abans de l'esmentada data.
- Estimació del nombre de passatgers de correspondència en un dia mig de l'any horitzó en les noves estacions que entraran en funcionament abans de l'esmentada data.

Amb les dades anteriors i aplicant la metodologia de [7] (tres passos) s'obté l'ocupació dels trens en les estacions, l'any horitzó.

FASE 1

La primera etapa consisteix en projectar el nombre de passatgers en els trens (diagrama de càrrega) en el seu pas per cada estació de la xarxa de metro en un dia mig de l'any horitzó, aplicant un increment anual del 3%¹⁴ fins a l'any actual des de l'any de referència, i un increment anual del 2,5%¹⁵ fins a l'any horitzó.

Els volums diaris anteriors es converteixen a volums horaris aplicant sobre els mateixos pesos que representen les validacions durant l'hora punta de les validacions totals (Distribució horària del nombre de validacions de cada estació de la xarxa de metro en un dia mig de l'any actual); i posteriorment es converteixen a volums de ¼ d'hora punta, dividint per quatre i aplicant el coeficient d'hora punta (1,25); i també el coeficient de frau (1,02).

Aleshores, el volum de passatgers en els trens en el seu pas per cada estació (sense sumar els passatgers que generaran i/o atrauran les noves estacions que entraran en servei abans de l'any horitzó), durant el ¼ d'hora punta de l'any horitzó resulta de:

$$\boxed{VT_{1/4i,j}(\text{sense noves estacions}) = VT_{1/4i-2,j}(\text{sense noves estacions}) + Pax_{\text{pugen } i-1,j} - Pax_{\text{baixen } i-1,j}}^{16}$$

A l'hora de calcular aquests volums de passatgers s'han de tenir en compte les següents observacions:

¹³ Font TMB

¹⁴ Font ATM

¹⁵ Font ATM

¹⁶ $VT_{1/4i,j}$ (sense noves estacions) és igual al volum de passatgers en els trens (en les estacions actuals i sense considerar els passatgers que generaran i/o atrauran les noves estacions) durant el ¼ d'hora punta de l'any horitzó en l'estació "i" i andana "j", en pax / ¼ d' hora punta;

Pax _{Pugen i-1,j} és igual al volum de passatgers que pugen al tren durant el ¼ d'hora punta de l'any horitzó en l'estació "i-1" andana "j", en pax / ¼ d'hora punta;

Pax _{Baixen i-1,j} és igual al volum de passatgers que baixen del tren durant el ¼ d'hora punta de 2010 en l'estació "i-1" andana "j", en pax / ¼ d'hora punta;

- A les connexions amb altres línies poden existir plans d'actuació que les mantinguin fora de servei durant llargs períodes de temps, i que condicionin els hàbits dels passatgers (canvis de mode de transport), afectant així al creixement del volum de passatgers.
- L'aparició d'altres línies de transport que poden captar passatgers i reduir-ne el creixement estudiat

FASE 2

La segona etapa consisteix en sumar al volum de passatgers anterior, el volum de passatgers que suposa l'entrada en funcionament de les estacions que s'incorporin a l'explotació entre els anys de referència i l'actual, i el volum de passatgers que suposarà l'entrada en funcionament de les que entraran en servei entre l'any actual i l'horitzó.

Aleshores, per obtenir el volum total de passatgers en el tren es considera:

1. El nombre de passatgers en els trens (diagrama de càrrega) en el seu pas per cada estació de la xarxa de metro en un dia mig de l'any horitzó considerant la xarxa actual.
2. Els tràfics en els trens que suposaran les noves estacions que entraran en funcionament fins a l'any horitzó, suposant que els passatgers estimats en les noves estacions recorren un nombre d'estacions que s'ajusta a la Distribució χ^2 de Pearson segons ATM (veure Figura 26)

$$VT_{1/4i,j}(\text{totes les estacions}) = VT_{1/4i-2,j}(\text{sense noves estacions}) + \sum_{p=1}^{i-1} Pax_{pugen_{i-1,j}} - \sum_{p=1}^{i-1} Pax_{baixeni-1,j} \quad 17$$

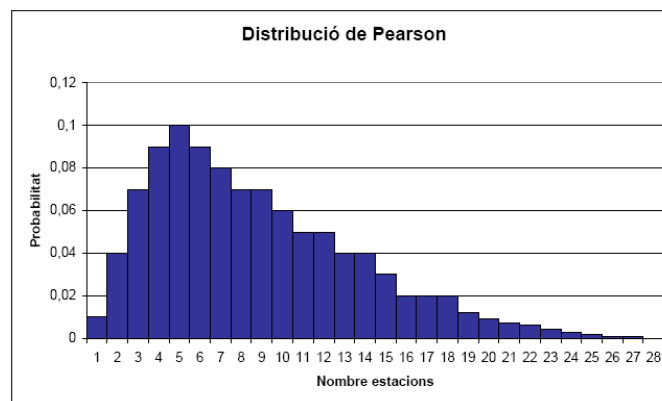


Figura 26 Distribució χ^2 de Pearson de la probabilitat referent al nombre d'estacions que recorren els passatgers. Font: Elaboració pròpia i ATM
La càrrega d'ocupació dels trens en les estacions de la xarxa resultant és igual a:

¹⁷ $VT_{1/4i,j}$ (totes les estacions) és igual al volum de passatgers en els trens (considerant també els passatgers que generaran i/o atrauran les noves estacions) durant el 1/4 d'hora punta de l'any horitzó en l'estació "i" i andana "j", en pax / 1/4 d' hora punta;

$Pax_{pugen_{p,j}}$ és igual al volum de passatgers que pugen al tren en les estacions noves durant el 1/4 d'hora punta de 2010 en l'estació "p" andana "j", en pax / 1/4 d' hora punta;

$Pax_{baixen_{p,j}}$ és igual al volum de passatgers procedents d'estacions noves que baixen del tren durant el 1/4 d'hora punta de 2010 en l'estació "p" andana "j", en pax / 1/4 d' hora punta.

$$COT_{i,j,k} = \text{Min}\{OMT_k, VT_{1/4,i,j}(\text{totes les estacions})\}^{18}$$

e) Temps d'evacuació

De cara a avaluar, és necessari calcular els temps d'evacuació de les estacions tenint en compte els condicionants geomètrics i les càrregues d'ocupació obtingudes en l'apartat anterior.

A continuació s'explica la metodologia emprada a partir de [7] per calcular el temps d'evacuació de l'andana a un lloc segur.

El temps d'evacuació de l'andana és igual al temps que transcorre des de que s'activa el procés d'emergència fins que l'últim passatger ha abandonat l'àrea de les andanes. Per calcular-lo es considera el símil hidràulic, corresponent a: el temps necessari per traspasar els colls d'ampolla (de cada sortida, normalment cada andana té dues sortides, alguna en té tres) amb menys capacitat que condicionen la sortida dels passatgers de l'andana (principalment els més pròxims a l'andana), amb les següents consideracions:

- S'ha de sumar el temps de recorregut que va des de l'andana fins al coll d'ampolla més llunyà de l'andana (és el recorregut que realitza el primer passatger fins arribar al coll d'ampolla)
- S'ha de restar el temps de franquejar el coll d'ampolla dels individus que estan en cua i que es situen entre l'andana i el coll d'ampolla. Es considera que l'espai que hi ha entre l'andana i el coll d'ampolla permet una cabuda de 4 passatgers/m².

Aleshores, la formulació per al càlcul del temps d'evacuació dels passatgers de l'andana és la següent:

$$T_{EAi,j} = \left(\frac{COA_{i,j} + COT_{i,j}}{\sum_{s=1}^n C_{CA1_{i,j,s}}} \right) - \sum_{s=1}^n \left(\frac{S_{i,j,s} \cdot 4}{C_{CA1_{i,j,s}}} \right) + \left(\max_s \left\{ \frac{R1_{i,j,s}}{V1} + \frac{R2_{i,j,s}}{V2} \right\} \right)^{19}$$

¹⁸ $COT_{i,j,k}$ és la càrrega d'ocupació del tren en l'estació "i" en el sentit "j" que pertany a la línia "k"

OMT_k és l'ocupació màxima del tren que pertany a la línia "k" deduïda d'aplicar a la superfície útil del tren una densitat de 8 pax/m².

$VT_{1/4,i,j}$ (totes les estacions) és la càrrega del tren en el quart d'hora punta prevista per l'any 2010 en l'estació "i" en el sentit "j", en pax / ¼ d'hora.

¹⁹ $T_{EAi,j}$ és igual al temps d'evacuació en l'estació "i" en l'andana "j" (temps de sortida de tots els passatgers de l'andana), en unitat de temps (minuts);

$COA_{i,j}$ és la càrrega d'ocupació de l'estació "i" en l'andana "j", en nombre de passatgers;

$COT_{i,j}$ és la càrrega d'ocupació del tren en l'estació "i" en l'andana "j", en nombre de passatgers;

$C_{CA1_{i,j,s}}$ és la capacitat del coll d'ampolla amb menys capacitat que condiciona la sortida dels passatgers de l'andana de l'estació "i" en l'andana "j" i en la sortida "s", en nombre de passatgers/unitat de temps (pax/minut);

$S_{i,j,s}$ és la superfície que hi ha des de l'andana fins al coll d'ampolla amb menys capacitat que condiciona la sortida dels passatgers de l'andana de l'estació "i" en l'andana "j" i en la sortida "s", en metres quadrats.

Com a exemple, aportem la Taula 2 on podem veure el resultat d'aplicar la metodologia de [4], a les estacions de L2 (veure Figura 27) del FMB, a fi i efecte d'obtenir les càrregues d'ocupació, i els temps d'evacuació a andana i a lloc segur.



Figura 27 Termòmetre d'estacions L2 del FMB. Font: Elaboració pròpia

Estació (Línia 2)	Càrrega ocupació COA (pax)		Càrrega Ocupació Tren COT (pax)		Temps evacuació			
					Temps sortida andana T_{EA} (minuts)		Temps sortida lloc segur T_{ES} (minuts)	
	Direcció Pep Ventura	Direcció Paral·lel	Direcció Pep Ventura	Direcció Paral·lel	Direcció Pep Ventura	Direcció Paral·lel	Direcció Pep Ventura	Direcció Paral·lel
Pep Ventura	41	475	273	499	0.87	3.11	3.14	5.49
Gorg	23	192	361	745	0.58	1.41	3.21	4.22
Sant Roc	31	197	463	832	1.64	3.39	3.14	4.76
Sant Adrià	119	587	706	914	3.18	5.74	4.92	7.18
Verreda	9	34	740	1105	2.76	4.42	5.47	7.72
La pau	86	266	675	1105	2.73	5.14	5.89	8.07
Sant Martí	164	403	932	825	2.78	3.19	5.05	5.45
Bac de Roda	158	311	1105	1044	3.44	3.61	5.65	5.82
Clot	231	366	1105	1105	4.15	4.07	7.08	7.09
Encants	169	213	1105	1105	3.98	4.67	7.37	7.17
Sagrada Família	329	329	1105	1105	3.56	3.50	6.80	6.90
Monumental	131	131	1105	1105	5.42	5.22	9.25	7.9
Tetuan	97	97	1105	1105	2.97	2.97	6.36	6.36
Passeig de Gràcia	201	201	1056	1105	1.61	1.67	4.33	4.63
Universitat	252	154	931	1105	3.99	3.99	8.57	8.57
Sant Antoni	267	102	777	1105	3.01	3.01	5.22	5.22
Paral·lel	0	41	279	899	2.88	2.88	4.21	4.21

Taula 2 Exemple de càrregues d'ocupació i temps d'evacuació a estacions de la Línia 2 del FMB. Font: Elaboració pròpia i FMB

3.1.5 El transport vertical. Criteris de disseny en relació a les variables demanda i profunditat.

$R1_{i,j,s}$ és el recorregut horitzontal (rampa inferior al 4% de pendent) que hi ha des de l'andana "j" fins al coll d'ampolla de menor capacitat que condiciona la sortida dels passatgers de la sortida "s" de l'estació "i", en metres;

$R2_{i,j,s}$ és el recorregut vertical (rampa superior al 4% de pendent) que hi ha des de l'andana "j" fins al coll d'ampolla de menor capacitat que condiciona la sortida dels passatgers de la sortida "s" de l'estació "i", en metres;

$V1$ és la velocitat mitjana dels passatgers en recorreguts horitzontals, en metres/minut;

$V2$ és la velocitat mitjana dels passatgers en recorreguts verticals, en metres/minut (aquesta velocitat s'ha de discriminar en funció de si la rampa és de baixada o de pujada).

Noteu, que amb la formulació anterior, el nombre de passatgers que surt per cadascuna de les sortides de l'andana és proporcional a la seva capacitat. A la pràctica, en la majoria de casos, la capacitat de totes les sortides és semblant, aleshores el repartiment dels fluxos de passatgers també ho és.

Per motius d'accessibilitat, per salvar les alçades que puguin existir s'empren sistemes elevadors, que permeten traslladar persones i càrregues a diferents nivells.

Entre les solucions més esteses dins d'aquest sector tenim els ascensors i les escales mecàniques. Es tracta de dos sistemes completament diferents, on l'única afinitat és el transport de persones i/o càrregues.

Donat que en aquest punt no s'està tractant cap situació real alhora de dimensionar, s'abordarà l'apartat algebraicament i s'establiran els temps que defineixen els cicles de cada sistema elevador i les capacitats d'evacuació corresponents.

a) **Ascensors**

Cada cop es fan servir amb major freqüència sistemes d'ascensors en ferrocarrils urbans quan apareix un diferencial d'alçades entre la cota carrer i la cota de l'andana, sobretot per motius d'accessibilitat de persones de mobilitat reduïda (PMR).

Les característiques generals dels tipus d'ascensors emprats al ferrocarril són similars als públics, però de gran capacitat (5-50 pax). Són robustos i per disseny estan concebuts amb el màxim de materials antivandàlics.

Normalment en el ferrocarril s'empren dos tipologies d'ascensors:

- Ascensors elèctrics
- Ascensors hidràulics

Els ascensors elèctrics tenen al seu favor, com veurem, l'alt grau de normalització a nivell normatiu, la major velocitat i menor consum energètic, i en principi menor cost de manteniment a mig i llarg plaç. Per contra, exigeixen que les cambres de màquines es situïn a la zona superior o en línia amb l'eix del forat dels mateixos. És important també remarcar la capacitat de "rescat" de viatgers en cas d'una incidència que origini un atrapament; capacitat que en principi és més fàcil en ascensors hidràulics, descarregant el seu pistó hidràulic, facilitant que la cabina baixi per gravetat al nivell inferior. En canvi en els elèctrics aquesta operació s'efectua mitjançant sistemes mecànics elèctrics, gràcies a mòduls d'emmagatzemament elèctric, comercialment anomenats "Rescatamatic", que permeten la maniobra de l'ascensor amb un tall del subministre elèctric exterior.

Els elements bàsics d'un ascensor elèctric es poden observar a la Figura 28.

Els ascensors hidràulics solen ser (encara que depèn del fabricant), més costosos en la seva primera implantació que els ascensors elèctrics, però tenen a favor la possible ubicació de la cambra de màquines a una certa distància (15-20 metres del forat de l'ascensor), el que facilita el disseny estructural de les estacions. Els ascensors hidràulics, no produeixen càrregues sobre l'estructura de l'estació, però, per contra tenen normalment consums majors d'energia, amb escomeses d'energia 2 o 3 vegades superiors als elèctrics. Les seves alçades no solen superar els 20 metres.

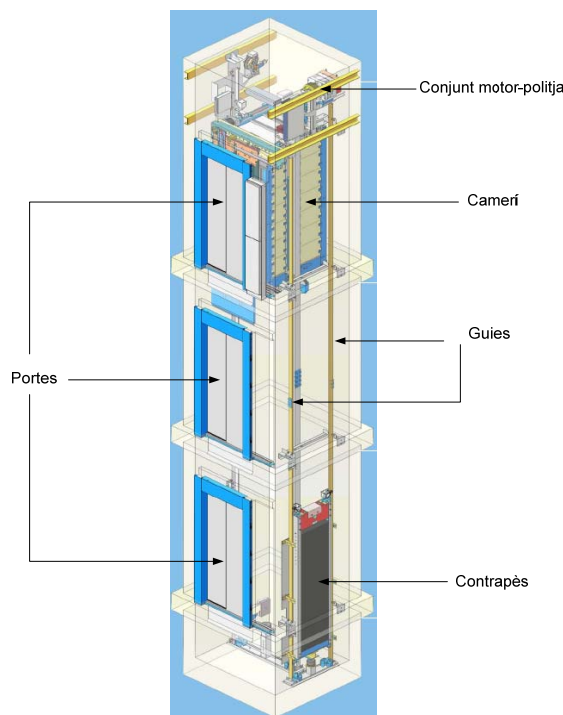


Figura 28 Exemple ascensor elèctric. Font: ThyssenKrupp Elevadores i elaboració pròpia

Els paràmetres bàsics de disseny d'un ascensor ferroviari solen ser:

Q = Capacitat de la cabina (6 pax/m² habitualment)

V = Velocitat en m/s (1-6 m/s segons el desnivell a salvar i la potència instal·lada)

H = Desnivell en metres

T_p = Temps d'obertura i tancament de portes

a = Acceleració (normalment al voltant de 1 m/s²)

Els components d'un ascensor són coneguts, destacant el següents: camerí (habitable destinat a donar cabuda a les persones), accionament (elèctric o hidràulic com hem dit), sistemes de transmissió o empenta (politjes, cables, èmbols, pistons, cremalleres etc.) i per últim, elements diversos com panells de polsadors, interfons, sistemes d'extinció d'incendis, càmeres de televisió, etc.

La majoria de característiques a complir pels ascensors es troben recollides a la Norma Europea EN-81-1 i EN-81-2. Addicionalment als Reglaments de cada país, hi ha diverses normatives amb requisits específics, com els relatius a la reducció de soroll i a la pròpia construcció (DIN 4109 i VDI 2566), així com la construcció específica per a persones de mobilitat reduïda (PMR) (DIN 18024/18025). A Espanya va entrar en vigor en 1992 el Tercer "Reglamento de Aparatos Elevadores Eléctricos e Hidráulicos". En 1997 es va transposar la nova Directiva d'ascensors 95/16/CE (R.D. 1314/97) i per últim, en 1999 van entrar en vigor les Normes Europees Armonitzades EN 81-1/98 i EN 81-2/98.

Les normatives exposades tracten entre altres aspectes a tenir en compte per a estacions ferroviàries profundes, el fet d'incorporar una porta d'emergència intermèdia si hi ha més de 11 m de distància entre dos pisos o parades consecutives. Les dimensions mínimes d'aquestes portes seran de 1,8x0,35m.

Els criteris juntament amb la voluntat de les administracions per facilitar cada cop més l'accés als mitjans de transport de totes les persones amb mobilitat reduïda (PMR) anima a les explotacions ferroviàries a incorporar ascensors a les noves estacions i línies. De fet, a molts països són aspectes d'obligat compliment com és el cas d'Espanya. No obstant, l'adaptació de línies i estacions ja existents no sempre és fàcil per raons tècniques.

Per aquests casos, s'adopten solucions particulars mitjançant sistemes de plataformes adaptades a les escales existents.

▪ Capacitat

La capacitat de l'ascensor ve donada per les seves dimensions en planta, determinant així el màxim nombre de persones que poden viatjar al mateix temps en el mateix ascensors.

▪ Temps d'evacuació

El temps d'evacuació (t_{evac}) és la suma de diferents temps parcials, de diferents accions, que són necessàries per al transport de passatgers des de el nivell inferior al nivell superior o viceversa sense comptar el temps d'espera – es el temps d'evacuació mínim-.

- Temps de viatge amb velocitat constant (t_{vconst})

És el temps durant el qual l'ascensor viatja sense modificar la seva velocitat. Actualment en el mercat es disposa d'ascensors capaços d'assolir velocitats properes als 16 m/s (60 km/h) com per exemple els ascensors instal·lats a l'edifici Taipéi 101 de 529 metres d'alçada. Tot i així en l'àmbit que ens pertoca del transport ferroviari, les velocitats emprades pels ascensors no acostumen a superar el 1 m/s, per diferents motius. Les profunditats no acostumen a ser molt elevades a les estacions convencionals, rarament superen els 20 metres de desnivell, per la qual cosa la curta distància, juntament amb els costos de temps que tenen altres factors que seguidament descriurem, fa que la forta inversió que suposa una maquinària d'altres prestacions pel guany que se'n pot treure faci que es depreciï la seva instal·lació, i es triï la instal·lació de maquinària amb velocitats més lentes.

- Temps d'acceleració i desacceleració (t_{accel} , t_{fren})

Temps necessari per assolir velocitat objectiu o aturar l'ascensor. En l'àmbit general, el valor considerat es troba al voltant dels 2 m/s², per motius de confort de l'usuari

- Temps de tancament/apertura de portes (t_{tanc} , t_{ap})

Aquest temps es fix, però depèn dels mecanismes d'obertura i tancament. Com a terme mig es pot considerar 3 s per obrir o tancar.

- Temps d'entrada i sortida (t_e , t_s)

L'ocupació de l'ascensor pot ser determinant per estimar el temps d'evacuació. Estimem que una persona necessita 1 segon per entrar o sortir de l'ascensor.

A un nivell de detall cal analitzar els processos de càrrega i descàrrega. L'experiència demostra que es triga menys en sortir que en entrar per raons diverses. Les persones

que entren es veuen sotmeses al procés de distribució a l'interior de la cabina ocupant els espais lliures, per la qual cosa la velocitat de càrrega és més lenta, aspecte que fa que el procés de tancament de portes es realitzi amb més demora. Altra vegada, en el procés de descàrrega, l'únic objectiu dels ocupants és sortir, per la qual cosa l'evacuació és normalment àgil (excepte si hi ha persones discapacitades, càrregues o altres factors).

Cal considerar també la possibilitat de, en casos de disposar de dos vies de sortida enfrontades 180°, una obertura simultània o decalada, fet pel qual als càlculs s'hauria de tenir en compte.

- Temps de marxa d'ascensors

Admeten que l'acceleració i desacceleració es produeix de manera constant des de la parada fins a aconseguir la velocitat de règim, el temps de marxa (t_m) d'un ascensor ve definit per l'expressió:

$$t_r = 2 \cdot t_a + t_u$$

On el temps d'acceleració (desacceleració) ve definit per:

$$t_a = \frac{v_u}{a}$$

Per a salvar un desnivell H , el temps total empleat a la velocitat de règim és:

$$t_u = \frac{H - a \cdot t_a^2}{v_u} = \frac{H \cdot a - v_u^2}{a \cdot v_u}$$

i el temps total de marxa val:

$$t_m = \frac{2 \cdot v_u}{a} + \frac{H \cdot a - v_u^2}{a \cdot v_u}$$

Substituint en l'expressió anterior v_u i a pels valors 2 m/s i 1 m/s², respectivament, s'arriba a:

$$t_m = 4 + \frac{H - 2^2}{2} = \frac{H + 4}{2} \quad (\text{en segons})$$

- Temps de recorregut d'ascensors (t_r)

La duració d'un recorregut complet d l'ascensor és la corresponent al temps d'obertura, sortida, accés, tancament i marxa.

El seu valor és:

$$t_r = (t_{obertura} + t_{sortida} + t_{acces} + t_{tan c} + t_{marxa})$$

Per el càlcul es considera que s'aprofita plenament la capacitat efectiva de càrrega, en el sentit dominant de desplaçament, mentre que se suposa que en el sentit secundari es transporta un 30 % de la càrrega del sentit dominant.

Normalment considerarem que el sentit dominant és el que porta els passatgers des del tren fins a l'exterior, donat que l'arribada de passatgers sempre estarà més laminada en el sentit invers, fet pel qual el volum de passatgers per unitat de temps que facin el sentit exterior-tren no tindrà les mateixes puntes que en el sentit de descàrrega del tren²⁰

Aplicant els anteriors paràmetres dels ascensors a la fórmula s'obté que:

$$\begin{aligned} t_r &= (t_{obertura} + t_{sortida} + t_{accés} + t_{tan\ cament} + t_{marxa}) = \\ &= 2 \cdot t_{obertura} / tan\ cament + Cap \cdot Efectiva (1 + 0.3) + (H + 4) / 2 = \\ &= 6 + 1.3 \cdot Cap \cdot Efectiva + (H + 4) / 2 \end{aligned}$$

- Temps d'espera de l'ascensor

Al temps de recorregut, a efectes d'avaluar el sistema cal afegir-li el temps mig d'espera dels ascensors.

El temps mig d'espera val la duració complerta d'un cycle d'ascensors dividit pel número (n) d'ascensors i per 2, és a dir:

$$t_{espera} = \frac{d_c}{2n}$$

Essent n el nombre d'ascensors de la bateria, en el cas de que no existeixin cues.

La duració d'un cycle complet de l'ascensor (d_c) és la corresponent als dos itineraris de pujada i baixada més la dels temps d'obertura, sortida, accés i tancament a cada nivell.

El seu valor és:

$$d_c = 2 \cdot (2 \cdot t_{obertura} + t_{sortida} + t_{accés} + 2 \cdot t_{tan\ cament} + t_{marxa})$$

Llavors, el temps mig d'espera serà:

$$\begin{aligned} d_c &= 2 \cdot (2 \cdot t_{obertura} + t_{sortida} + t_{accés} + 2 \cdot t_{tan\ cament} + t_{marxa}) = \\ &= (12 + 1.3 \cdot Cap \cdot Efectiva + \frac{H + 4}{2}) / 2 \end{aligned}$$

No obstant, aquest càlcul del temps d'espera no té en compte l'ocupació de les andanes. Per aquest motiu, es calcula el temps mig d'espera a partir d'una simulació gràfica que té en compte l'ocupació de les andanes en el quart d'hora punta.

Com que es tracta d'un element d'evacuació discontinu i la duració del cycle dels ascensors és elevada en termes generals, habitualment es considera que la seva capacitat és factor limitant en la capacitat de sortida que ofereix el sistema.

²⁰ Això serà cert sempre i quan l'estació no sigui intercanviadora (volum elevat d'usuaris que vulguin canviar de transport, o en el cas d'actes culturals o esdeveniments esportius puntuals).

b) Escales mecàniques

Igual que els ascensors, les escales mecàniques permeten el transport de persones i equipatges entre diferents nivells, tant en sentit ascendent com descendent.

Habitualment, les escales es defineixen per paràmetres com la seva longitud, l'angle d'inclinació α i la velocitat. L'angle acostuma a prendre com a valors $27,3^\circ$ o 30° , i excepcionalment 35° . Les velocitats acostumen a ser entre 0,50 i 0,75 m/s i l'amplada de graó entre 600 mm i 1000 mm. Totes aquestes dades són els estàndards que els fabricants subministren. Això sí, sempre podríem demanar productes més específics amb el seu conseqüent increment de preu .

Les escales mecàniques estan constituïdes per una cadena sense fi de graons com es veu a la Figura 29. Aquests, van accionats per un grup motoritzat amb potència adequada al desnivell i càrrega a transportar, que actua sobre la cadena de graons mitjançant un sistema de transmissió. El conjunt disposa de baranes laterals a mitja alçada amb passamans, i altres dispositius per facilitar la transició de viatgers.

A nivell de disseny, no es registren escales en transports ferroviaris amb estacions convencionals (recordem que aquestes són a profunditats no molt elevades) a més profunditats majors de 34 m com és el cas del metro de Sant Petersburg.

Les escales emprades als ferrocarrils metropolitans són similars a les emprades als centres comercials, hotels, oficines etc. tot i que l'alta utilització que es dona en l'àmbit ferroviari, aconsella adoptar durabilitats i graus de protecció denominats de "servei públic" com ja passa amb els ascensors.

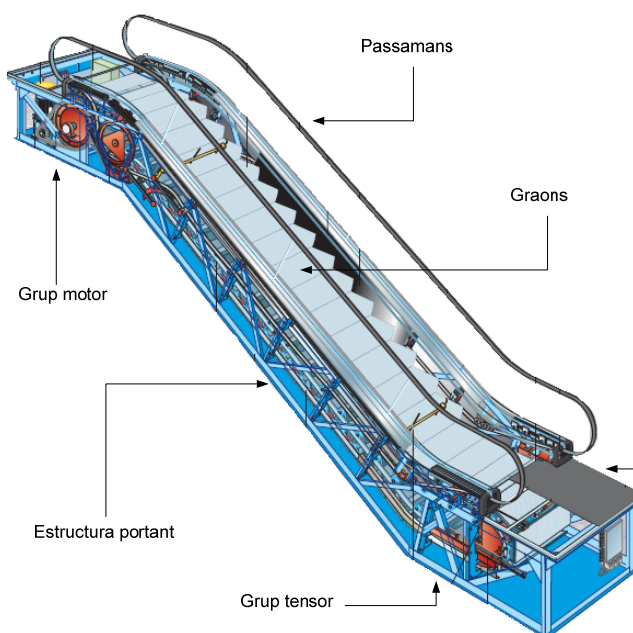


Figura 29 Exemple escala mecànica. Font: ThyssenKrupp Elevadores i elaboració pròpia

Aquestes es dimensionen per capacitats entre 4.500 i 13.500 viatgers/hora, segons l'amplada nominal de l'escala i la velocitat en metres per segon, tal com es reflexa a la següent

Amplada nominal (m)	Velocitat nominal (m/s)		
	0,5	0,65	0,75
0,6	4.500 persones/h	5.850 persones/h	6.750 persones/h
0,8	6.750 persones/h	8.775 persones/h	10.125 persones/h
1,0	9.000 persones/h	11.700 persones/h	13.500 persones/h

Taula 3 Taula comparativa d'amplades nominals i velocitats nominals. Font: Elaboració pròpia a partir de dades facilitades per Thyssenkrupp

Cal indicar que la norma UNE 58-704-86 (EN 115) especifica de forma molt diferenciada, els requisits de disseny, instal·lació, manteniment, etc. d'aquests sistemes electromecànics

- **Capacitat.**

La capacitat de les escales mecàniques depèn del seu ample i la velocitat de transport. Per un ample de 1 metre i una velocitat de 0.50 m/s disposem de capacitat de 2.5 persones per segon i per a velocitat 0.60 m/s de 3 persones per segon. Per calcular la capacitat efectiva la praxis suggereix prendre com a valor efectiu 80% d'aquests; així que tenim 2 persones per segon i 2.4 respectivament.

- **Temps d'evacuació**

Per al temps d'evacuació (t_{evac}) per escales es sumen els temps que una persona dedica per sortir des del nivell inferior al nivell superior que inclou: Temps d'espera per pujar a l'escala i temps de trajecte, compostat pel temps de permanència i el temps de canvi entre trams.

- Temps de permanència per a un tram (t_{perm})

Temps que una persona roman a l'escala mecànica. Depèn de la geometria de l'escala i de la seva velocitat. La longitud de recorregut és la suma de les parts horitzontals de l'escala i la part inclinada. Com més gran sigui el desnivell que salva l'escala, més llarg serà aquest tram. Aquesta longitud també depèn de la inclinació de l'escala; així com més petit és l'angle més llarga és la longitud de recorregut. A efectes de càlcul es considera també que la persona roman immòbil a sobre de l'esgràó.

- Temps de canvi entre trams (t_{cam})

Temps que necessita una persona per passar d'un tram a un altre nivell intermedi.

- Temps d'espera (t_{esp})

Temps que necessita una persona per accedir a l'escala mecànica en cas que hi hagi acumulació de passatgers que volen pujar. La velocitat en que disminueix la cua, és a dir, la velocitat en que avança una persona en cua és igual a la capacitat de l'escala: 2 o 2.4 persones per segon segons la velocitat.

$$t_{evacuació} = t_{perm} \cdot N + t_{cam} \cdot (N - 1) + t_{esp} \quad 21$$

²¹ Essent N el número de trams

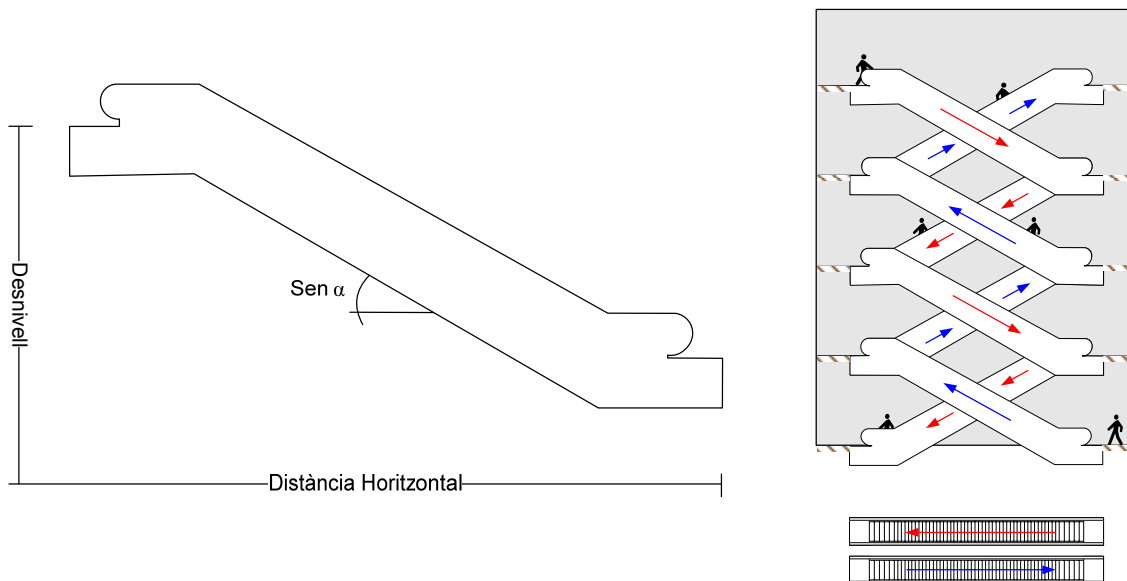


Figura 30 Esquema escala mecànica. Font: Elaboració pròpia

Per obtenir el temps de permanència, considerem que la gent no camina per sobre l'escala i coneixent la velocitat de la mateixa:

$$t_{perm} = \frac{D_{ist.} \cdot (Total - Angle) + Dist. \cdot (Total - Horitzontal)}{V_{escala}} = \frac{\frac{D_{esnivellTotal}}{\text{sen}(\alpha)} + N_{um} \cdot T_{rams} \cdot D_{istància} \cdot H_{oritzontal}}{V_{escala}}$$

c) Conclusions ascensors i escales mecàniques

Com ja s'ha comentat en el decurs de l'apartat de transport vertical, podem arribar a afirmar, que per profunditats petites, la solució òptima és la de dotar les estacions amb escales mecàniques. De fet, la praxis habitual dels operadors ferroviaris, es fonamenta en el treball conjunt entre escales fixes i escales mecàniques. Això és degut a que els temps d'embarcament, desembarcament, obertura i tancament de portes dels ascensors, penalitzen enormement els temps d'evacuació dels usuaris. Tot i així, és important notar que, en el cas de demandes molt petites (això vol dir un cicle d'ascensors), a mesura que augmenta la profunditat la solució d'ascensors es va fent més i més interessant, donat que els avantatges de la major velocitat vertical, redueixen la penalització del procediment d'embarcament i desembarcament.

Donat que estem parlant d'estacions no gaire profundes, les escales mecàniques són competitives quan hi ha un volum de passatgers important. Això es deu a que els ascensors funcionen mitjançant cicles. Això vol dir que els passatgers són processats en paquets d'un nombre determinat de passatgers. En canvi les escales mecàniques funcionen de manera continua, processant passatgers a un ritme determinat. Això implica també un estudi de les cues que es generen per tots dos casos a peu d'equipament com a punt d'espera per pujar.

Tot i així, si augmentem la profunditat i la demanda, llavors les condicions de contorn es modifiquen substancialment, i la velocitat de transport vertical de l'ascensor pren rellevància, fet pel qual, la seva implantació es pot tenir en consideració. En aquests

casos, la solució no és trivial i no es pot establir de forma senzilla, una frontera on decidir quina tipologia de transport vertical fer servir. Influxen factors com les característiques tècniques dels ascensors i les escales mecàniques, el número d'equips instal·lats així com les hipòtesis de demanda que s'estableixin.

És interessant en el moment de dissenyar el sistema de transport vertical, veure quines variables tenim i fer un estudi comparatiu. Donat que l'objecte del present document és analitzar el cas d'estacions en fondària, a l'apartat 3, analitzarem ambdues solucions de transport vertical i veurem com les variables demanda i profunditat es relacionen per crear regions de solució.

Així doncs, a tall d'exemple, analitzant un escenari de 500 passatgers fent cua al nivell inferior, i disposant de 5 ascensors de 16 persones de capacitat, o 2 escales mecàniques, podem observar que les escales mecàniques són competitives en front els ascensors tal i com es pot observar a la Figura 31 fins aproximadament els 40 metres.

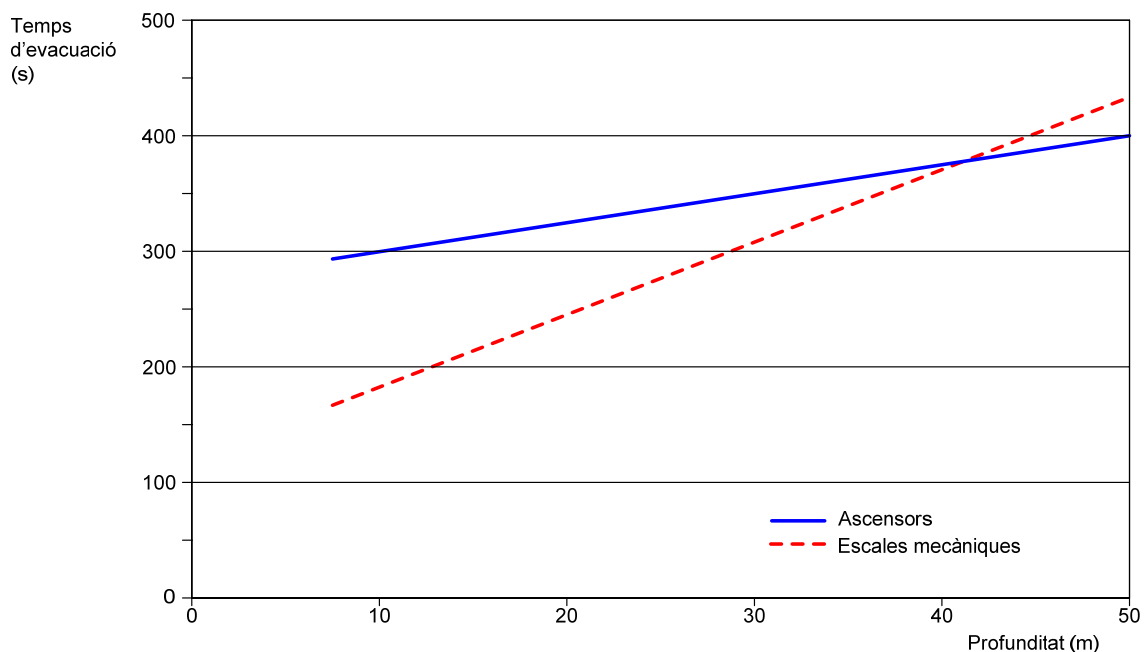


Figura 31 Comparació entre escales mecàniques i ascensors sota un escenari de 500 passatgers i considerant una bateria de 5 ascensors o 2 escales mecàniques.

Això és una simplificació i caldria a més a més tenir en compte la funció distribució de l'arribada de passatgers a la zona d'embarcament del transport vertical, demanda, profunditat, geometria, prestacions dels equips i una llarga llista de condicionants, que portarien a establir per a cada cas concret d'estació, la solució idònia.

3.2 VENTILACIÓ

La ventilació és un dels aspectes fonamentals en tota infraestructura subterrània dedicada al transport de persones. En el present apartat, tractarem les solucions més exteses en matèria de ventilació, així com un càlcul aproximatiu sobre una línia amb estacions convencionals. Ens centrarem en la ventilació en condicions d'explotació

normals, tot i que és molt important també la ventilació en condicions d'emergència. Aquest punt seria objecte d'un altre estudi molt més detallat i que no és objecte del present document.

La renovació de l'aire dels túnels durant la seva explotació, es pot fonamentar en el tir natural, que sempre existeix en menor o major mesura. En altres casos donada la gran longitud del túnel, el tràfic suportat, o la poca entitat de la ventilació natural, s'ha de recórrer a mitjans de ventilació forçada mitjançant equips electromecànics, altrament anomenats ventiladors.

Els túnels d'explotacions ferroviàries metropolitanes han de contemplar, en tant que a instal·lacions, sistemes de ventilació. En uns casos es poden aconseguir les renovacions d'aire associades i nivells de temperatura desitjats mitjançant una ventilació natural (per gradients de temperatura i efecte pistó dels trens) i en altres casos, és necessari incorporar sistemes electromecànics de ventilació que possibilitin aquestes renovacions d'aire i controls de temperatura amb marges acceptables.

Hi ha explotacions que últimament han incorporat sistemes de climatització fred/calor a estacions, però no és objecte del present document.

Segons recomanacions de la UIC, els sistemes de ventilació de túnel s'han de concebre per tal que no es sobrepassin els 30°C, que la humitat no superi el 60% i perquè el contingut de CO₂ sigui inferior al 7%. Igualment, [4] ha establert també els límits de tolerància per a contaminació a túnels. Òbviament els nivells de contaminació en explotacions ferroviàries alimentades elèctricament, com les que ens ocupen en aquest document, són menys preocupants que en túnels ferroviaris de mitjà i llarg recorregut explotats amb vehicles Diesel.

La normativa més significativa en matèria d'especificacions tècniques i estàndards de disseny es troben llistats seguidament:

- Subway Environmental Design Handbook
- Ashrae Journal Febrer 97 – “Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program” per Kelly Giblin president del comitè tècnic 5.9 “Enclosed Vehicular Facilities”
- ASHRAE standards
- Directiva de Màquines 89/392/CE
- AMCA 210, Methods of Testing Fans
- UL 900, Test performance of aire filter units
- SMACNA Low Velocity Duct System
- Reglament General de Soroll

Els sistemes de ventilació de túnels ferroviaris metropolitanos contempnen el número de renovacions d'aire en túnels i estacions, la velocitat i direcció del flux d'aire, la contaminació, la temperatura i la humitat relativa.

Una filosofia molt ben considerada en tant que a ventilació de túnels i estacions es refereix és la que es pot veure a la Figura 32. Es fonamenta en la construcció d'un pou de ventilació (treballant sempre en extracció) en cada interestació, de forma més o menys equidistant de les dos estacions contigües, i un pou de compensació a cada estació (treballant en impulsió). Com es pot observar en Figura 32 els cabals d'impulsió de cada estació, ventilen i renoven l'aire d'aquesta, bifurcant-se en un doble sentit, un forçat per un gran ventilador per estació que incorpora aire fresc del carrer, motiu pel qual convé disposar d'un control de la temperatura d'intempèrie per aturar-lo

en cas que a fora faci més calor que a dins de l'estació (tabulat als límits preestablerts per l'exploador).

Amb això aconseguim la renovació de l'aire viciat de l'interior de les estacions introduint aire fresc de l'exterior, limitar la càrrega tèrmica produïda pels trens, persones i demès elements que aportin calor al sistema i, per últim limitar les corrents d'aire i les variacions de pressió provocades per l'efecte pistó dels túnels.

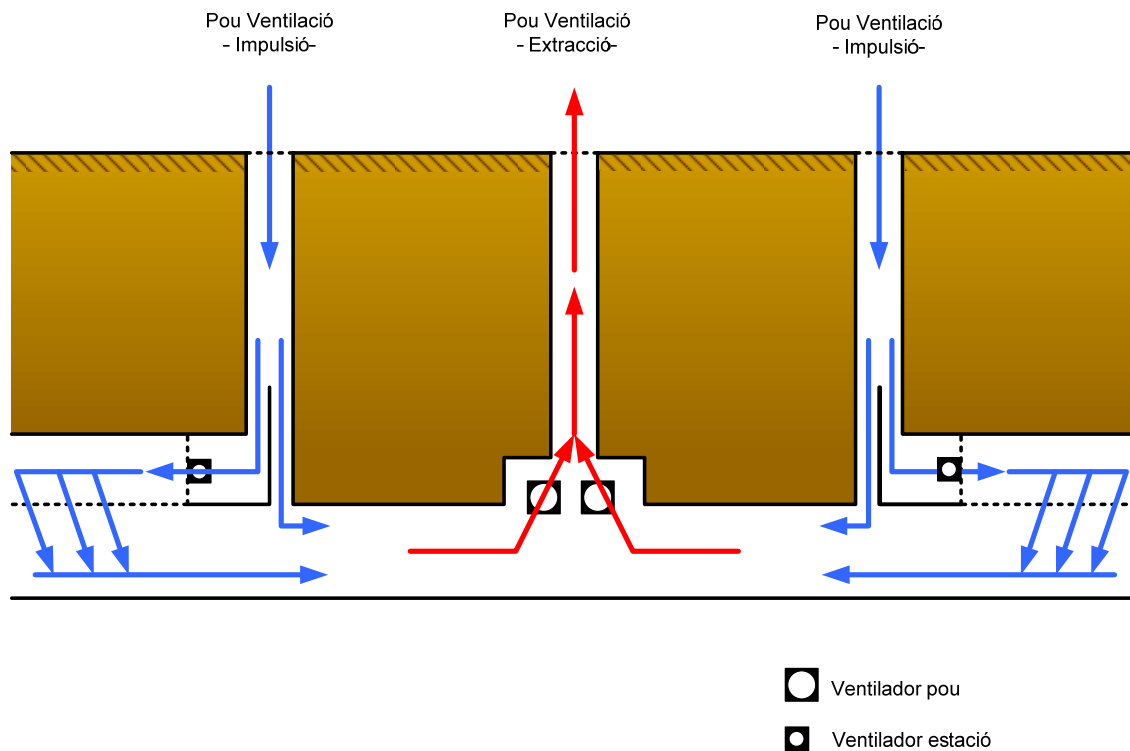


Figura 32 Ventilació mitjançant pous interestació i a extrem d'estació. Font: Elaboració pròpia

Pel que fa a les renovacions hora, un criteri comunament acceptat i validat per la pràctica, és el d'aconseguir almenys **4 renovacions** de tot el volum d'aire d'una estació en una hora. Amb aquest criteri el càlcul de cabals mínims unitaris de cada ventilador és relativament senzill de fer i dimensionar així la infraestructura de ventilació. Per exemple el sistema implantat al túnel anglès de Severn es va dissenyar amb cabals de 14.150 m³ hora i els ventiladors implantats a Metro de Madrid, per exemple es van dissenyar per cabals unitaris de 180.000 m³ hora

Els sistemes de ventilació a més a més contempen aspectes de disseny relatius a les velocitats de sortida i entrada d'aire des de l'exterior i els nivells acústics que les normatives estatals o locals exigeixen.

El sistema de ventilació comentat anteriorment, no és l'únic sistema adoptat a les explotacions ferroviàries. Hi ha explotacions que donat que discorren a poca profunditat respecte del nivell de la plataforma de carrer, s'implanten sistemes de ventilació natural mitjançant obertures a la clau del túnel. Això demana disposar de forats de dimensions generoses, que només son instal·lables a les grans avingudes, parcs públics o jardins. Segons estudis de Metro de París, mitjançant aquest sistema es pot arribar a evacuar fins a 2.400 m³ hora/m² de secció; principalment per l'efecte

pistó produït pel pas dels trens. Això equival a evacuar 3.800 calories per hora/m² considerant una temperatura interior de 24°C.

A més d'aquests sistemes de ventilació natural i el de ventilació forçada comentats anteriorment, hi ha explotacions que reforcen aquests sistemes mitjançant ventiladors axials.

En general, la ventilació de túnels és un sistema no unificat en absolut en els sistemes ferroviaris que ens ocupen i cada explotació particularitza la normativa i les recomanacions existents al seu cas concret.

Cal remarcar també que un aspecte funcional és el relatiu als casos d'emergència, concretament incendis i fums, on s'apliquen criteris d'apagada de ventilació per no avivar focs o redefinició dels modes de funcionament dels ventiladors per tal de contenir fums o incrementar els règims de funcionament per extreure els fums.

Els objectius de la ventilació de túnels i estacions de metro, que es persegueix, en condicions normals d'explotació, són bàsicament els següents:

- Limitació de la càrrega tèrmica en el sistema, produïda pels trens, persones i altres càrregues calorífiques (il·luminació, centres de transformació, motors, equips de climatització, etc.)
- Limitacions de les corrents d'aire i variacions de pressió provocades per l'efecte pistó que efectua el tren al seu pas.
- Renovació de l'ambient interior del sistema, evacuant l'aire viciat (monòxid de carbó, olors, etc.) i introduint aire fresc de l'exterior

Al mateix temps els pous de ventilació tenen altres objectius complementaris en situacions d'emergència; sigui per extracció de fums en cas d'incendis o bé d'accessibilitat als túnels i estacions a través dels pous.

Per al càlcul dels cabals de ventilació es tenen en compte les premisses següents, que estableixen les necessitats d'aire fresc segons [4]

- Per persona ≥ 40 m³/hora
- Estacions ≥ 15 renovacions/hora
- Túnels ≥ 4 renovacions/hora

Les velocitats mínimes a considerar amb els equips de ventilació funcionant a cabal màxim seran els següents segons [4]:

- En zona de permanència de viatgers $\leq 0,25$ m/seg
- Als túnels en general ≤ 1 m/seg

Exemple L1 Metro de Barcelona

Com a tall d'exemple, prendrem el sistema de ventilació instal·lat actualment a L1 del Metro de Barcelona (veure Figura 33), per analitzar quina solució s'adopta en aquests casos, a nivell de disseny i càlcul.



Figura 33 Termòmetre d'estacions a L1. Font: Elaboració pròpia

Aquesta línia presenta una configuració bàsica semblant a la tipologia d'infraestructures subterrànies que tractem a l'apartat 2. És a dir, estacions no gaire profundes, i en general, estacions força antigues; algunes estacions amb més de 80 anys, com és el cas de les estacions compreses entre Mercat Nou i Catalunya.

El sistema de ventilació emprat és el clàssic mitjançant ventilació d'estació i pous interestacions.

- La L1 disposa d'equipament amb les següents dades de la Taula 4 :

Impulsió m ³ /h		Extracció m ³ /h	
Valor teòric	Valor Real	Valor teòric	Valor real
1.184.000	878.461	2.366.000	1.672.970

Taula 4 Dades equipaments de ventilació L1. Font: TMB

La mitjana de temperatura exterior és suficientment alta durant l'estiu, de l'ordre d'uns 30° C i 70% d'humitat relativa, podent arribar a 35 °C i 90% d'humitat en situacions extremes.

Tenint en compte que els paràmetres de confort de temperatura i humitat, haurien d'estar entre 20 °C i 70 % respectivament, s'està lluny d'aquest objectiu.

Tenint en compte que l'absorció de calor generat al Metro es realitza mitjançant l'aire intercanviat amb l'exterior, amb el seu escalfament i també amb l'increment de la humitat fins saturar-lo a vegades, així com l'escalfament global de les masses estructurals de la línia que actuen inercialment i distorsionen els balanços a curt termini, cal establir doncs, unes cotes màximes de temperatura de l'aire a l'interior, sempre relatius a temperatura exterior, per tal de fer el més confortable possible l'estada dels usuaris del Metro a les estacions.

Els càlculs dels cabals d'aire necessaris d'extracció/impulsió es realitzen partint del balanç energètic que s'ha condicionant pel nombre de passatgers/any i dels consums d'energia elèctrica (tracció i estacions) estimats. També s'ha de comptar en aquest balanç energètic l'aire condicionat dels vagons.

A partir de les dades facilitades per TMB, podem remarcar els següents punts destacats:

- Per a la obtenció de les següents dades, s'ha partit del nombre de passatgers de l'any 1996, que van ésser 83.634.495 a la línia 1 actual de 30 estacions.
- S'ha considerat una mitjana de passatgers que per hora ocupa l'andana de 517 suposant un funcionament de 365 dies i 17 hores/dia de servei. Tot i així com

aquesta ocupació no és uniforme, s'ha considerat que a l'hora punta pot arribar a ser 6 vegades superior, obtenint doncs 3.102 persones/hora.

- El temps de permanència de cada persona a l'estació s'estableix en 5 minuts per una freqüència objectiu de 180 segons i una capacitat màxima del tren de 696 persones/tren.
- Amb l'anterior espera mitja, es genera una ocupació de 258 persones/andana, representant una ocupació mitja de 0,71 persones/m², xifra raonable.
- L'energia dissipada per una persona s'estima en 125 kcal/hora, sense considerar la gent que va dins dels trens, perquè considerem que es compensa amb l'aire condicionat de l'interior.
- L'aportació tèrmica degut al moviment dels trens es comptabilitza segons dades de fabricant en 238.220 kcal/hora per una freqüència de pas de 180 segons per 23 trens que hi ha circulant a la línia.
- Les instal·lacions fixes de la línia, és a dir enllumenat, centres de transformació, escales mecàniques, ascensors, es pot considerar 63.295 kcal/hora
- Finalment es pot tenir en compte la compensació que prové del sistema d'aire condicionat, essent aquesta una aportació negativa al produir-se un intercanvi d'aire a les obertures de portes dels trens a les estacions que segons dades facilitades per TMB ascendeix a 18.096 kcal/hora.

Resumint, podem avaluar el balanç tèrmic del conjunt del sistema, és a dir, la càrrega tèrmica total a evacuar:

Càrregues tèrmiques	
Càrregues tèrmiques degudes als usuaris	32.959 Kcal/hora
Càrrega deguda al moviment de trens	238.220 Kcal/hora
Càrrega deguda a les instal·lacions	63.295 Kcal /hora
Càrrega aire condicionat dels trens	- 18.096 Kcal/hora
Càrrega tèrmica total	316.378 Kcal/hora/estació

Taula 5 Taula comparativa de càrregues tèrmiques. Font: Elaboració pròpia

Per a calcular la distribució de la càrrega tèrmica entre les estacions i el tram interestació, cal tenir en compte que:

- L'aportació dels usuaris és totalment a l'estació
- L'aportació de les instal·lacions fixes a túnel es poden xifrar en 3.500 kcal/hora, la resta pertany a estació.
- La compensació de l'aire condicionat també fa referència a l'estació.
- L'aportació dels trens en moviment és difícil de precisar, si bé una bona aproximació es considerar la mitja del temps que el tren roman a l'estació i la mitja d'entrada i sortida respecte el temps real. Estudis recents per part de TMB xifren en un 33 % el temps d'estada dels seus trens a les estacions.

Resumint, les aportacions tèrmiques totals serien:

Aportació tèrmica	
Aportació tèrmica a les estacions	153.270 Kcal/hora
Aportació tèrmica al tram interestació	163.107 Kcal/hora

Taula 6 Aportacions tèrmiques. Font: Elaboració pròpia

Amb aquestes dades obtenim aproximadament les Kcal/hora generades al sistema túnel, que amb els requeriments exposats en punts anteriors, encaminen al càlcul dels cabals necessaris.

La generació total de calor a tota la Línia 1 a partir de les dades anteriors i considerant un total de 30 estacions ens porta a obtenir **9.491.340 kcal/hora**.

Sota el punt de vista de la dosificació de la càrrega tèrmica, la fórmula a aplicar seria:

$$C = \frac{Q}{e} \cdot \Delta t$$

Per tota la línia el cabal mínim necessari per a la dissipació de la càrrega tèrmica seria:

$$C_1 = 9.491.340/0.29 \cdot 5 = \mathbf{6.545.752 \text{ m}^3/\text{hora}}$$

El cabal mínim d'aire necessari per a la dissipació de la càrrega tèrmica a l'estació mitjana de la línia seria:

$$C_2 = 153.270/0.29 \cdot 5 = 105.703,3 \text{ m}^3/\text{hora},$$

Que per a totes les estacions representarà : **3.171.103 m³/hora**.

A la vista dels resultats teòrics necessaris i els cabals d'impulsió i extracció actuals, es dedueix un dèficit de cabals de ventilació elevats i en conseqüència, un nombre elevat de pous a construir. De fet per part FMB s'està procedint actualment a millorar les instal·lacions de ventilació a fi i efecte de millorar aquestes xifres.

Aquestes xifres, evidentment son molt orientatives i s'haurien d'ajustar exactament per al cas particular de cada estació, però ens demostra que les necessitats de ventilació d'un sistema ferroviari són exigents, i requereixen en molts casos, com per exemple el que hem tractat en aquest petit apartat, de sistemes de ventilació competents i que garanteixin els requisits mínims establerts per la normativa.

Aquestes mancances són molt freqüents a les xarxes de metro actuals, on gran part de la infraestructura té edats molt avançades. Certament, en l'actualitat les empreses gestores i explotadores de les infraestructures ferroviàries estan realitzant estudis de gran complexitat tècnica i rigor científic per avaluar les necessitats de ventilació i procedir a la seva millora, mitjançant grans inversions en obra civil instal·lacions. Això es materialitza en la construcció de nous pous de ventilació i la instal·lació de equipaments de ventilació de grans prestacions.

22 Q = calor sensible a absorbir (kcal/hora)

e = calor específica de l'aire 0,29 Kcal/m³ · °C

C = cabal d'aire m³/hora

Δt ° = increment de temperatura (°C) entre l'aire d'entrada i el de sortida = 5°C

4 ESTACIONS A GRAN PROFUNDITAT. EL CAS DE LA L9 DEL METRO DE BARCELONA

S'ha vist en els anteriors apartats la motivació de les infraestructures subterrànies, els seus condicionants i s'ha vist les diferents tipologies d'infraestructures que ocupen el subsòl de casa nostra. A partir d'aquí s'ha centrat l'estudi sobre una tipologia d'infraestructura subterrània molt estesa per les grans ciutats del món, que és el sistema de metro.

D'aquest sistema, s'ha realitzat un estudi genèric del seu funcionament, elements que el componen a grans trets, i s'ha realitzat especial èmfasi en els elements que componen la cadena de transport. D'aquí s'ha analitzat els elements del transport vertical, que es consideren punts crítics en la gestió dels passatgers, donades les implicacions que té en els modes d'operació, i en els temps d'evacuació en mode d'explotació normal.

De la mateixa manera, s'ha analitzat la ventilació, que igualment és fonamental per a tota explotació ferroviària.

Certament, l'objecte de l'estudi del transport vertical i el de la ventilació han estat motivats per la voluntat d'estudiar a nivell d'explotació, quina implicació comporta construir estacions a gran profunditat.

És doncs important remarcar que el present document no entra en el detall dels infinits sistemes que conflueixen en un sistema de transport ferroviari, sinó que l'objecte del mateix és analitzar, com l'efecte de la profunditat altera la cadena de transport, i porta a reformular com es gestiona el flux de passatgers, i com a causa de la profunditat, la ventilació rep un tractament com no havia estat considerat abans, excepte en les explotacions mineres, on el model emprat presenta força similituds conceptuals. És important la revolució que això ha comportat.

A nivell teòric, s'ha impulsat per part de l'Administració l'estudi i la recerca de nous models físics, simulacions numèriques i la redacció de recomanacions i noves normatives que regulin i reglamentin aquest nou espai dins del món ferroviari soterrat.

A nivell físic, és un fet la sinèrgia que s'està produint entre fabricants de tecnologia i les pròpies administracions, que cada cop estableixen uns requeriments més exigents a la vegada que els fabricants milloren els seus productes assolint prestacions que temps enrere semblaven impensables.

No és comú disposar d'estacions a profunditats molt elevades, donat que la majoria de traçats són força antics, però actualment, la densificació de les ciutats a nivell infraestructural, ha portat a assolir cotes més profundes per poder foradar sense interceptar serveis existents. Gràficament es tracta d'una graella en planta que ha quedat saturada, i requereix de la incorporació de més nivells, per poder seguir construint transports i serveis (veure Figura 34)

Es tracta d'un fenomen que poc a poc s'anirà repetint a les grans ciutats i conurbacions d'arreu del món; **tenir el subsòl saturat.**

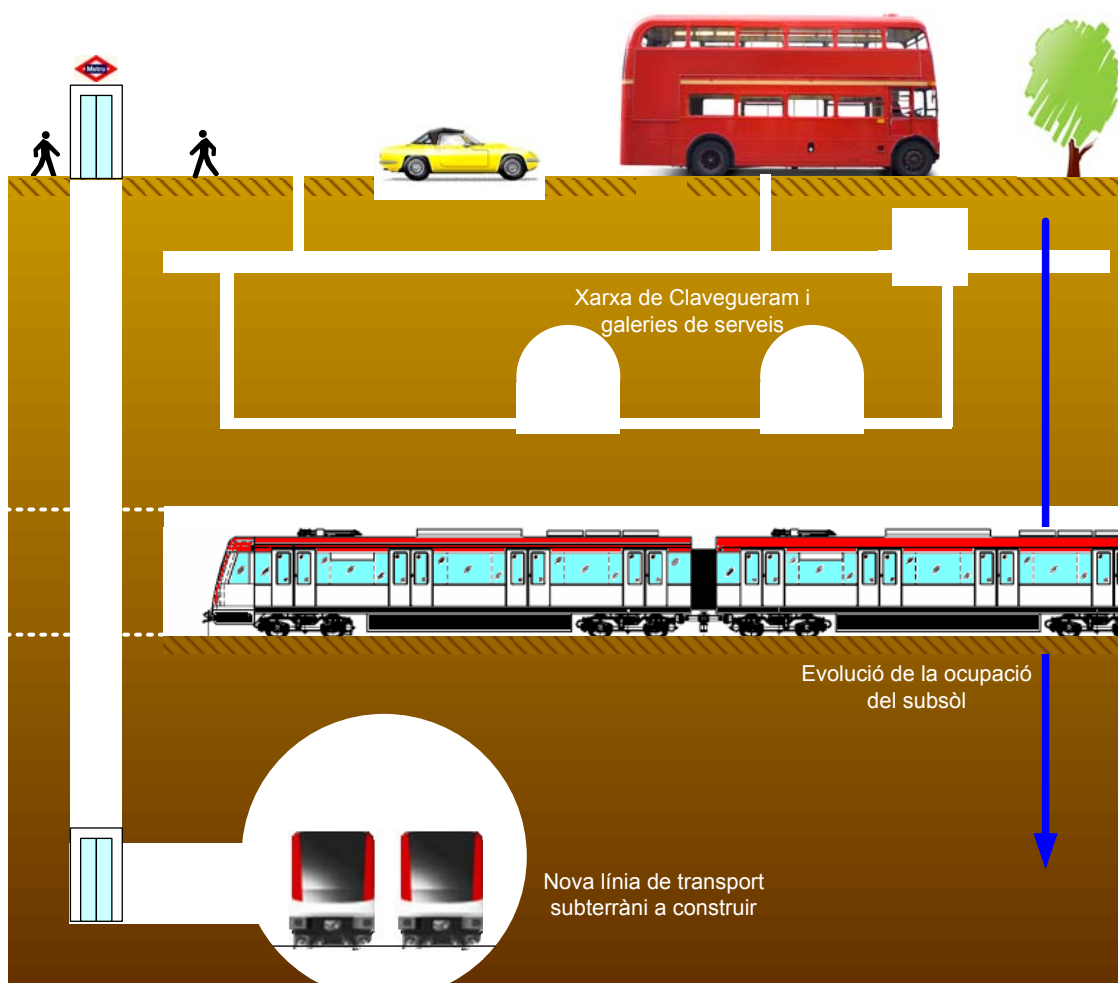


Figura 34 Esquema d'ocupació del subsòl. Font: Elaboració pròpia

A Barcelona, donada la seva configuració orogràfica, emmarcada per la serra de Collserola principalment, i les conques del Llobregat i del Besòs, han condicionat una ciutat amb una superfície de 101,4 km² i una població de 1.615.908 a data de 2008. La ciutat a la vegada es troba immersa en el que seria la Regió Metropolitana, que inclou 36 municipis, amb una població a data de 2008 de 3.186.461 habitants, fet que comporta una densitat de població de 1.523 hab/km²

4.1 DEFINICIÓ, CARACTERÍSTIQUES I UBICACIÓ DEL PROJECTE

L'execució de la nova línia L9 és l'actuació principal del Pla Director d'Infraestructures 2001- 2010 de l'Autoritat del Transport Metropolità, i suposa dotar a la Regió Metropolitana de Barcelona de la línia de metro convencional més llarga de Barcelona, amb més de 52 km de recorregut connectant els municipis de Badalona, Santa Coloma de Gramanet, Barcelona, L'Hospitalet de Llobregat i El Prat de Llobregat, enllaçant amb totes les línies de TMB, FGC i RENFE (Rodalies i AVE) mitjançant 20 nous punts d'intercanvi.

Un dels objectius de la línia és el de millorar l'accessibilitat i la connectivitat de la resta de la xarxa de transports públics col·lectius i equipaments actuals o futurs del territori com són l'Aeroport del Prat, la Zona Franca de Barcelona, la futura Ciutat Judicial de l'Hospitalet, la Fira de Barcelona, els Campus Universitaris o el Tren d'Alta

Velocitat, així com als barris de la part alta de Barcelona (Les Corts, Sarrià-Sant Gervasi, Gràcia, Horta-Guinardó, Nou Barris, Sant Andreu). Es donarà servei a barris que no disposen de connexió en transport públic ferroviari, com Singuerlín, Llefià, Santa Rosa, Bon Pastor, Can Peixauet, Zona Franca o El Prat.

El recorregut de la L9 inclou un tram central i dos ramals per cada extrem, formant una figura de dues Y unides per la base com es pot veure a la Figura 35 i a la Taula 7 .



Figura 35 Esquema general de la L9. Font: Elaboració pròpia

Estacions:							
Terminal entre pistes	TME	Campus Sud	SUD	Maragall	MGL	Can Zam	CZM
Ciutat aeroportuària	CAP	Collblanc	CLB	Guinardó	GND	Singuerlín	SNG
Terminal actual	TMA	Torrassa	TRS	Sanllehy	SNH	Església Major	ESG
Mas Blau	MBL	Gornal	GRN	Muntanya	MNT	Fondo	FND
Sant Cosme	SCM	Provençana	PRN	Lesseps	LSP	Santa Rosa	SRS
Plaça Catalunya	PCT	Ildefons Cerdà	ICD	Putxet	PTX	Can Peixauet	CPX
Prat de Llobregat	PLL	Foneria	FNR	Mandri	MND	Gorg	GRG
Eixample Nord	EXN	Foc Cisell	FOC	Sarrià	SRA	La Salut	LST
Verge de Montserrat	VMT	Motors	MTR	Prat de la Riba	PTR	Llefià	LFA
Mercabarna	MCB	Zona Franca Litoral	ZFL	Manel Girona	MGR	Bon Pastor	BPT
		Zona Franca Port	ZFP	Campus Nord	NOR	Onze de Setembre	ONZ
		Zona Franca ZAL	ZFZ	Zona Universitària	ZUT	Sagrera TAV	STA
		Ports d'Europa	PTE			Sagrera Meridiana	SME
		Amadeu Torner	ATR				
		Fira	FIR				
		Parc Logístic	PLG				

Taula 7 Noms i abreviatures de les estacions de la L9. Font: Elaboració pròpia

La L9 s'integra dins l'esquema de Metro actual enllaçant amb 20 estacions actuals, millorant l'efecte xarxa i creant sinèrgies en el transport públic de Barcelona com es pot veure a la Figura 36.



Figura 36 Esquema general de la L9. Font: Elaboració pròpia

Sobre aquesta infraestructura s'han definit dos serveis de metro diferenciats:

- Línia 9: Can Zam – Aeroport
- Línia 10: Gorg – Zona Franca

Fet pel qual al tram central s'aconsegueix una freqüència doble respecte als ramals dels extrems (veure Figura 37) en confluir els dos serveis per un tronc comú.



Figura 37 Termòmetre de la L9 i intercanviadors. Font: Elaboració pròpia

El projecte ha estat un repte per la enginyeria actual pel fet de conjugar innovació constructiva i d'exploració. Es poden identificar aportacions innovadores tant des del punt de vista del seu disseny avançat i de les noves tècniques constructives emprades així com la contribució al sistema de transport mitjançant les últimes tecnologies desenvolupades.

Alguns fets innovadors i singulars d'aquesta línia són:

- L'efecte generador de xarxa d'alta capacitat a la Regió Metropolitana de Barcelona mitjançant els 20 intercanviadors de que disposa.
- L'arribada d'un transport públic col·lectiu d'altres prestacions a zones històricament desatenses i a nuclis residencials i equipaments de nova generació.
- Trenca l'actual radialitat de la xarxa de transport metropolità.
- Els mètodes constructius i l'elevada fondària de la majoria del projecte, minimitza les afectacions en superfície.
- L'accessibilitat està garantitzada en un 100% per a Persones amb Mobilitat Reduïda (PMR).
- La línia està equipada amb els sistemes més avançats de gestió de trànsit ferroviari, destacant la conducció automàtica.

Com veurem més endavant, pels condicionants que han confluït en aquest projecte, la L9 ha estat executada en la seva major part mitjançant tuneladores i una petita part mitjançant túnels entre pantalles o en mina. A més a més, la L9 disposa d'un tram de la seva infraestructura s'aire lliure mitjançant un viaducte que recorre el carrer A de la Zona Franca.

En la següent Figura 38 esquema es pot observar quines solucions han estat utilitzades per resoldre diferents trams de la infraestructura.

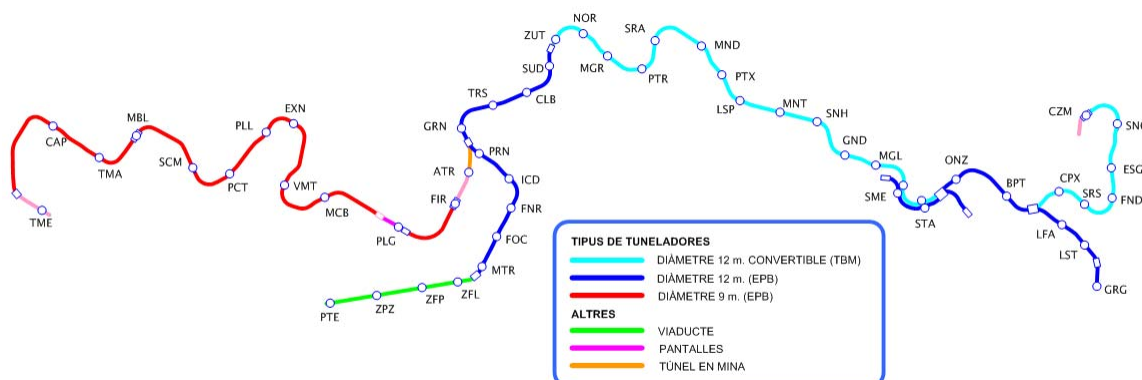


Figura 38 Tipologies constructives de la L9. Font: Elaboració pròpia

L'estudi centrarà la seva atenció en els trams executats mitjançant tuneladores i més concretament els executats amb la tuneladora de 12 metres, donat que és la tipologia emprada per als trams que recorren a més profunditat de la línia.

Això és degut a la fondària que s'assoleix en aquests punts, que moltes vegades supera els **60 metres**, i fa molt difícil executar els clàssics calaixos amb que estan resoltes la majoria d'estacions de les xarxes de metro. Amb aquesta secció de túnel es podien encabir les andanes dins el mateix túnel i permetre l'accés dels usuaris mitjançant els pous verticals.

Tot això es desenvoluparà amb major profunditat seguidament, primer analitzant amb més detall quins han estat els condicionants més importants, que finalment han conduït a adoptar la solució constructiva final.

4.1.1 Condicionants del projecte.

El projecte, ha estat subjecte a una quantitat enorme de condicionants, tècnics, econòmics i humans com es pot veure a la Figura 39 i que han portat a redefinir els mètodes clàssics de construcció de xarxes de metro, així com els criteris d'exploració.

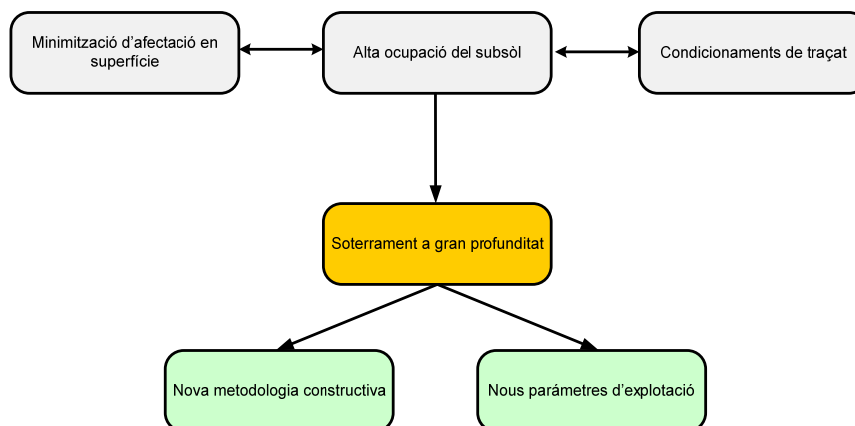


Figura 39 Esquema dels condicionaments del projecte de la L9. Font: Elaboració pròpia

Certament, la voluntat d'aquest treball és destacar per sobre dels altres els condicionants de traçat i de minimització dels efectes en superfície, que han portat a L9 a ser una de les línies fèrries que recorren pel subsòl urbà més profundes del món.

Aquest fet, ha conduït a construir la línia mitjançant l'ús de màquines de perforació integral, altrament anomenades tuneladores.

Com es va fer esment en els primers capítols del present document, aquesta tècnica permet la mecanització i industrialització de procediments constructius, creant condicions de molta seguretat tant pels treballadors, habitants i construccions en superfície, així com infraestructures soterrades tals com serveis urbans.

La construcció mitjançant tuneladores determina uns condicionants geomètrics inherents a la pròpia màquina i la qualitat final de la obra. Això es tradueix en radis mínims tant en planta com en vertical.

Les màquines emprades a L9 han estat de dos tipus:

- Tuneladores de 12 m
- Tuneladores de 9.4 m

Els treballs han estat previstos amb una estratègia de tuneladores que queda resumida a l'esquema de la Figura 40.

Com s'ha esmentat a l'apartat anterior, el treball es centra ens els trams de més fondària, que són els que han estat executats amb la tuneladora de 12 metres.

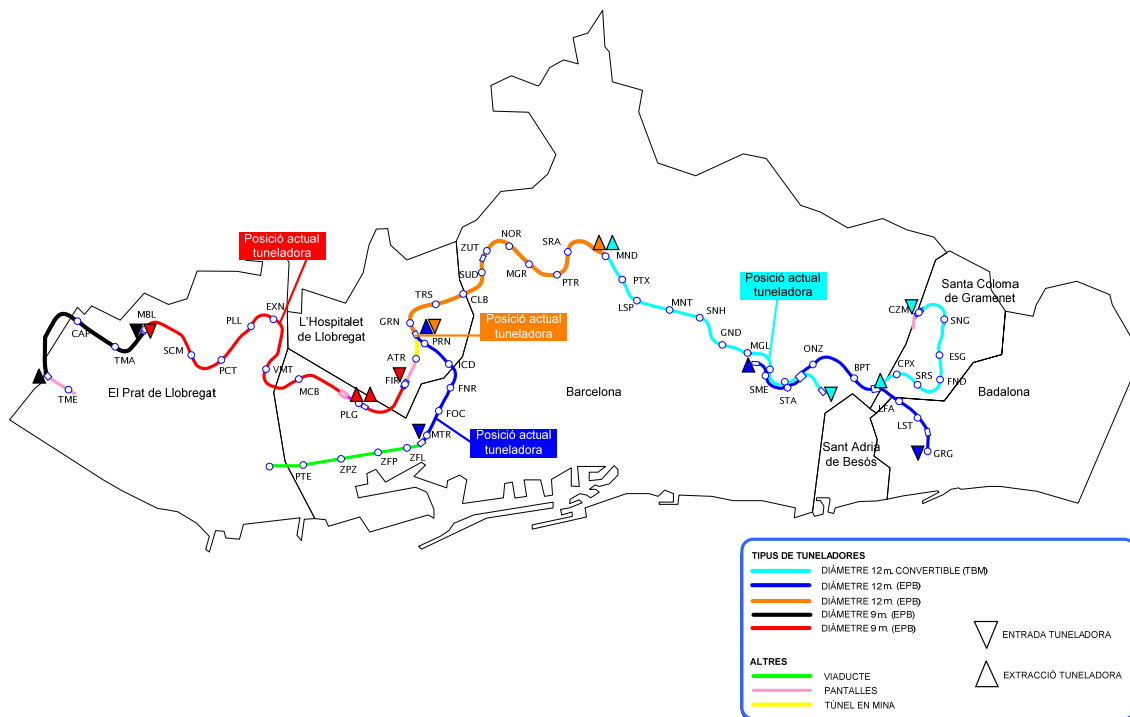


Figura 40 Esquema estratègia de tuneladores a L9. Font: Elaboració pròpia

4.1.2 Traçat

El traçat de L9 ha estat condicionat d'origen per la voluntat de minimitzar les afectacions en superfície a causa de l'excavació del subsòl, arran de desagradables i greus aconeteiximents com l'esfondrament d'un conjunt residencial al barri del Carmel a Barcelona. Aquest fet va alertar a la societat, que va exigir als responsables polítics i tècnics més garanties sobre la seguretat en les obres subterrànies, més encara si aquestes discorrien per nuclis urbans, com va ser el cas.

Com es pot veure a la Figura 41, la cubeta d'assentaments en superfície a causa d'obres subterrànies disminueix a mesura que assolim cotes més profundes, i aconseguint assentaments pràcticament nuls si s'incorpora tecnologia de màquines de perforació integral, les tuneladores.

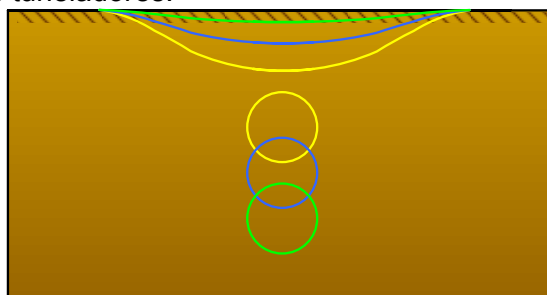


Figura 41 Esquema de la cubeta d'assentaments d'un túnel. Font: Elaboració pròpia

A més a més, l'alta densificació de la superfície per on es pretenia donar el servei, condicionava els llocs on es podien executar les estacions, alhora que la optimització

dels nodes de captació de viatgers reduïa les possibilitats de traçat, establint unes condicions de contorn molt rígides.

I finalment, ha estat un factor decisiu i no menys important la saturació del subsòl de Barcelona. Com a moltes grans ciutats del món, el subsòl està ocupat per milers de quilòmetres de serveis d'abastament, col·lectors, túnels de transport urbà i ferroviari, així com antigues infraestructures ara en desús o fins i tot soterranis de grans edificacions. Aquest fenomen ha portat a que cada cop les infraestructures que s'han anat construint, haguessin de passar forçosament per sota de les ja existents, creant un entramat molt dens al subsòl de la ciutat, que ha portat a tenir infraestructures més i més profundes com es pot veure a la Figura 34 de la pàgina 66.

Com ja s'ha comentat, la profunditat i la necessitat d'encabir-hi les andantes dins del túnel i totes les instal·lacions associades, així com la minimització del volum de terres excavat, altra vegada molt important per reduir assentaments en superfície i reduir costos derivats del processament de les terres extretes, han portat a triar la solució constructiva mencionada precedentment.

Cal destacar també els condicionants que imposa la construcció mitjançant tuneladores, que determina uns paràmetres geomètrics inherents a la pròpia màquina i la qualitat final de la obra. Això es tradueix en radis mínims tant en planta com en vertical que depenen en gran mesura del diàmetre de secció, fet pel qual, a major diàmetre, el radi de gir de la tuneladora és menor.

Igualment que els condicionants de la màquina, cal ressaltar que també han estat molt importants els condicionants de traçat de via per motius d'exploració, especialment pel que fa als valors màxims de pendent de la pròpia via

Criteris de disseny del traçat	
Velocitat màxima	90 km/h
Radi mínim de corba en via principal	190.00 m
Pendent (rampa màxima)	4%
Corba de transició recta-corba circular (planta)	Clotoide
Radi de corba en estacions	∞
Pendent (rampa) màxima en estacions	0.15%
Corba d'acord vertical	Paràbola
Paràmetre mínim d'acords verticals	Kv=1200
	Kv=600 (a cues de maniobres)
Peralt màxim	140 mm
Rampa de peralt màxima	2.4 mm/m
Longitud andanes estació	100.00m
Acceleració màxima sense compensar	0.65 m/s ²
Acceleració màxima en acord vertical	0.4 m/s ²

Taula 8 Criteris de disseny del traçat. Font: Ifercat 2009

Així mateix, cal destacar que com el relleu de Barcelona és molt accidentat, hi ha punts on no ha quedat més remei que assolir cotes molt profundes perquè tot i disposar els pendents màxims en el traçat no es recuperava prou cota.

4.1.3 Solució constructiva

Ja s'ha vist a l'esquema de l'apartat anterior les tipologies constructives de túnel i viaducte que conformen la L9. En aquest apartat es farà esment de les solucions

constructives de les estacions (veure Figura 42), i es concentrarà en les anomenades d'aquí en endavant tipus L9, que són l'objecte central del present document.

En el següent esquema podem observar les diferents tipologies d'estació en funció de la seva solució constructiva.

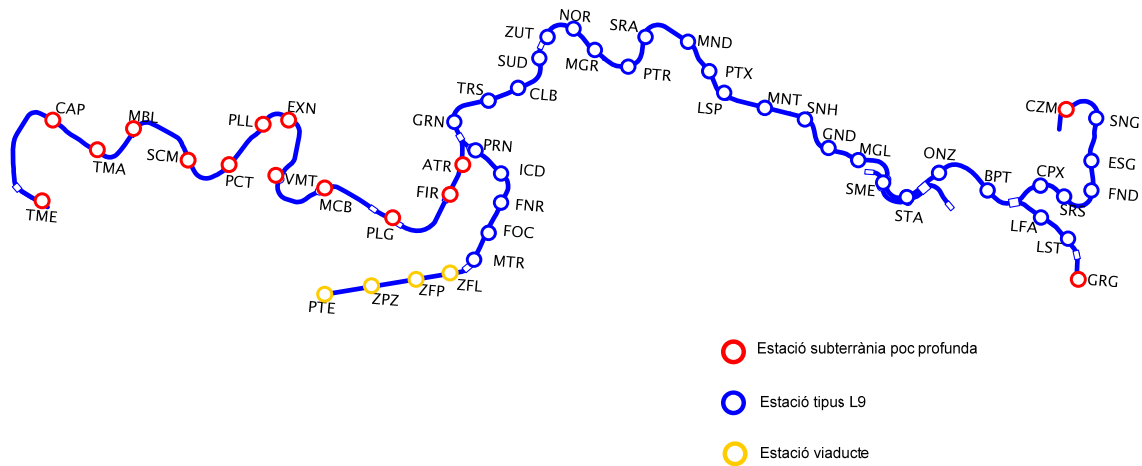


Figura 42 Esquema tipologies d'estació a L9. Font: Elaboració pròpia

En primer lloc hi ha les estacions subterrànies poc profundes (veure Figura 43). És la tipologia més estandaritzada i la que presenta tota la xarxa de metro barcelonina en l'actualitat. Es tracta d'estacions que com el seu nom indica es troben molt a prop de la cota de carrer i per tant la seva estructura fonamental és un calaix de formigó armat que conté l'estació en si mateixa.

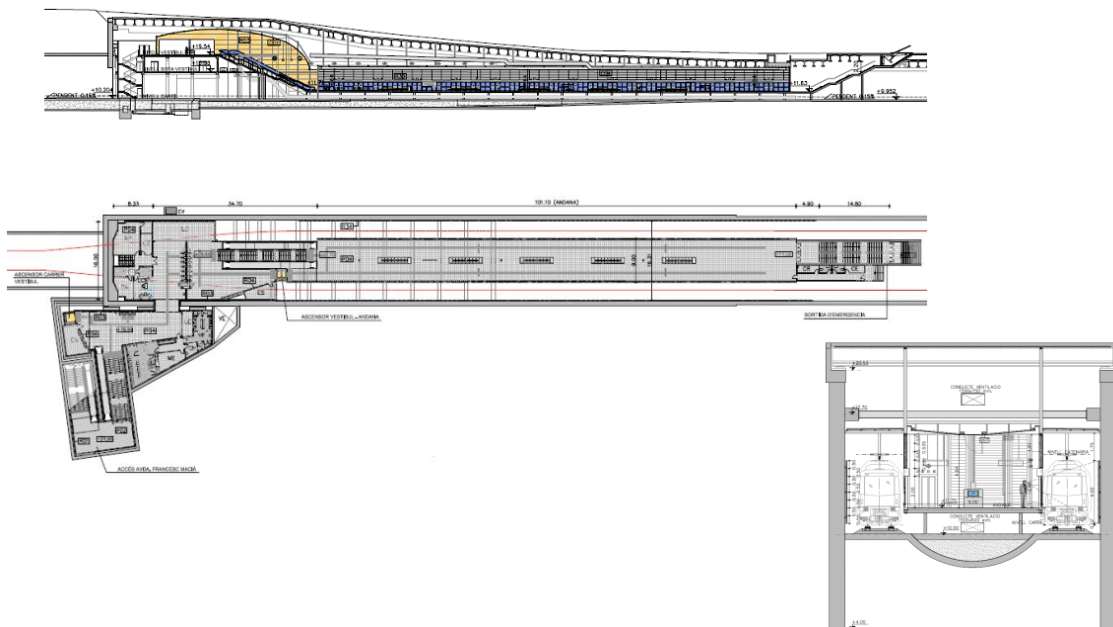


Figura 43 Seccions estació subterrània poc profunda. Font: Ifercat 2009

En segon lloc hi ha les estacions del viaducte. Aquestes es troben a la Zona Franca, concretament les estacions de Zona Franca Litoral, Zona Franca Port, Zona Franca ZAL i Ports d'Europa (veure Figura 44). Aquestes estacions les trobem en aquest tram

donat que la via discorre a cel obert sobre pilars fet que condiciona un tipus d'estació peculiar.

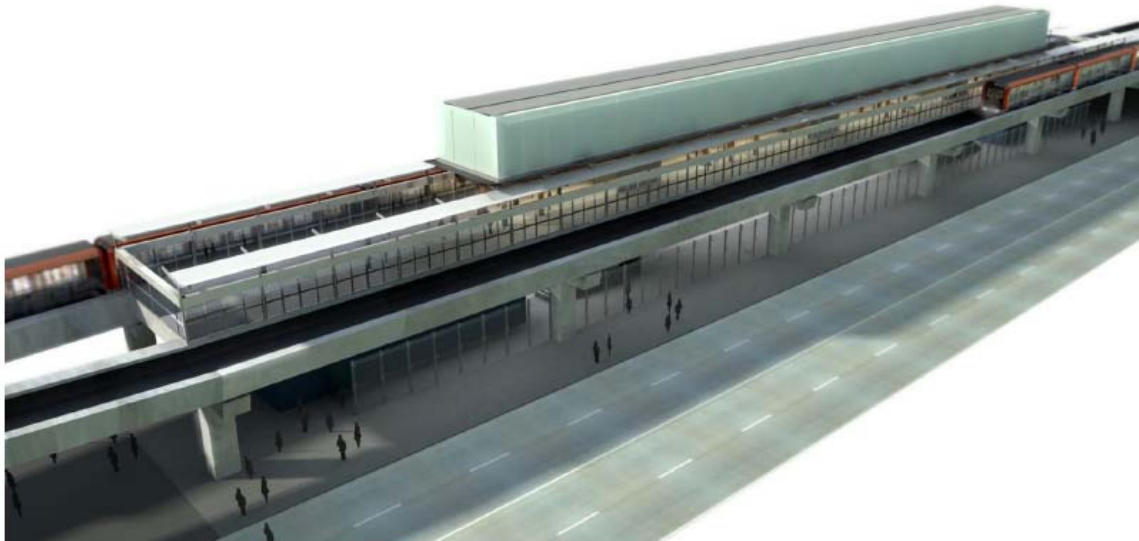


Figura 44 Imatge renderitzada d'una estació tipus viaducte a L9. Font: Ifercat 2009

Finalment trobem les estacions amb tipologia L9. Es troben bàsicament ocupant la part central de la línia, que discorre més propera als peus de la Serra de Collserola, terrenys d'origen plutònic. És una solució idèntica a la emprada pel tram que discorre per Santa Coloma i Badalona, donada la presència d'un relleu important, juntament amb el tipus de subsòl imperant. Aquesta tipologia d'estació és tota una revolució en la concepció en sí d'una línia de metro.

En aquest cas, donada la fondària, es feia impossible poder accedir a les cotes tan profundes a les que es discorria amb el túnel. Això va portar a adoptar una solució de pou vertical de 26 o 32,4 metres (aquest últim per poder extreure el capçal de la tuneladora), que en certs casos supera els 60 metres de fondària, executat mitjançant hidrofressa.

El concepte geomètric es fonamenta en dos cilindres, un vertical i un altre horitzontal tal i com podem veure a la Figura 45

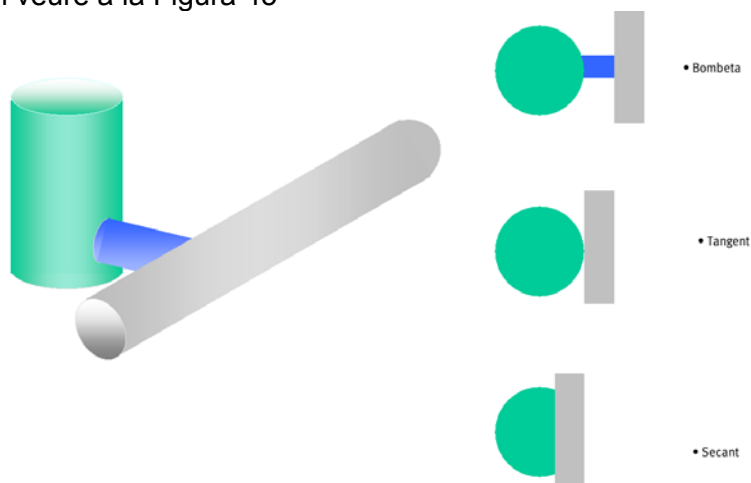


Figura 45 Entroncament pou vertical i túnel a estacions tipus L9. Font: Elaboració pròpia.

El túnel blau que podem apreciar en la figura següent connecta el pou vertical (verd) per on accedeixen els usuaris amb el túnel horitzontal (gris), per on circulen els vehicles. En aquestes estacions el moviment vertical està governat per ascensors de gran capacitat o escales mecàniques. En funció de la posició del túnel gris i de la seva distància vers el pou vertical, apareix un túnel de connexió que genera tres tipologies d'estació concretes, les anomenades "bombeta", on es notori el túnel de connexió entre ambdues geometries, els tangents, on el túnel toca la superfície del cilindre vertical del pou, i on es realitza una petita transició entre ambdós elements i finalment els secants, on el túnel executat amb la tuneladora talla la superfície del pou vertical eliminant el passadís que s'origina en les estacions tipus "bombeta".

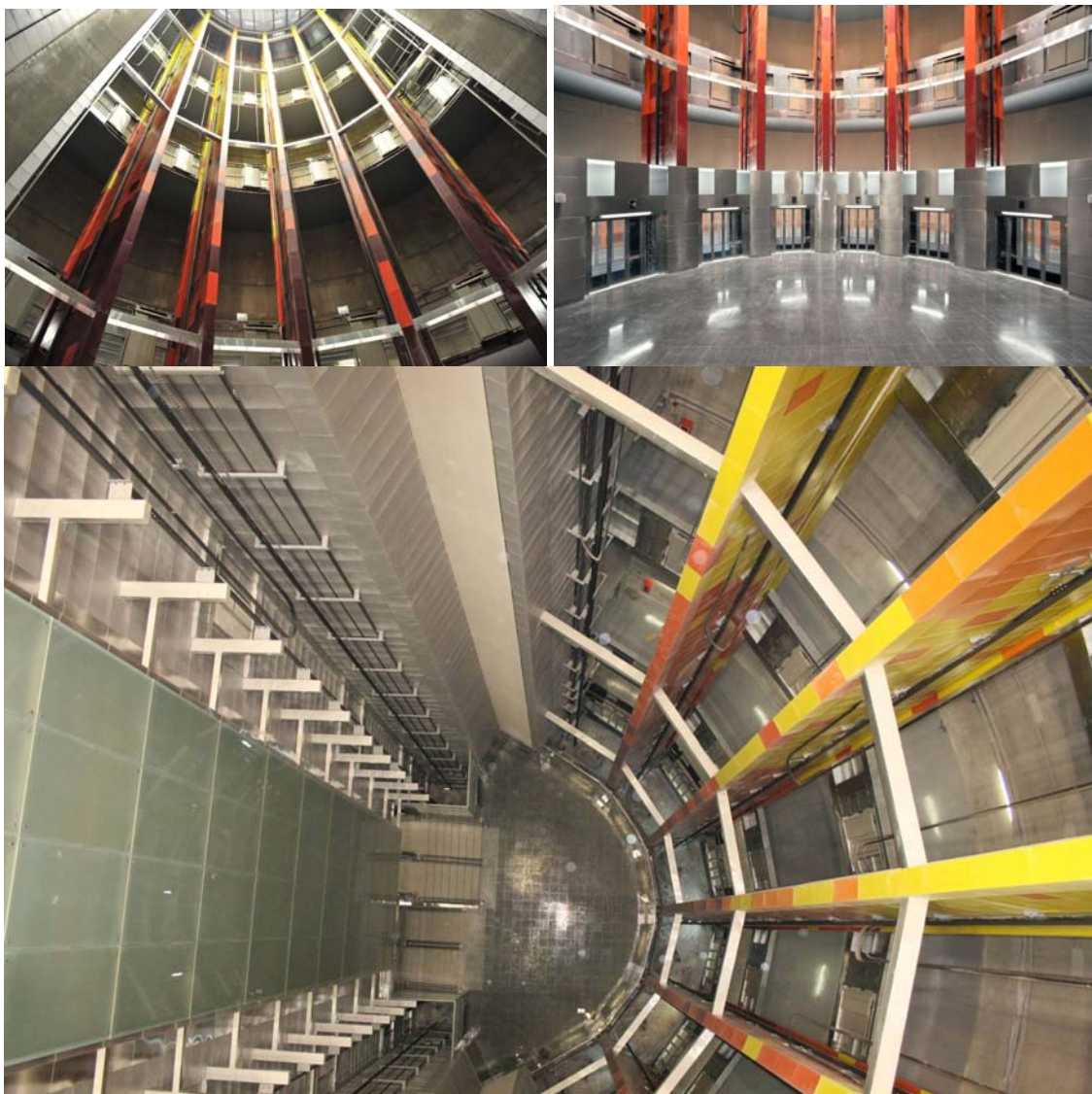


Figura 46 Imatges del pou d'una estació profunda tipus L9. Font: Ifercat 2009

Podem observar els detalls constructius a la Figura 46.

A la Figura 47 podem observar l'esquema constructiu d'una estació tipus L9 amb ascensors de gran capacitat.

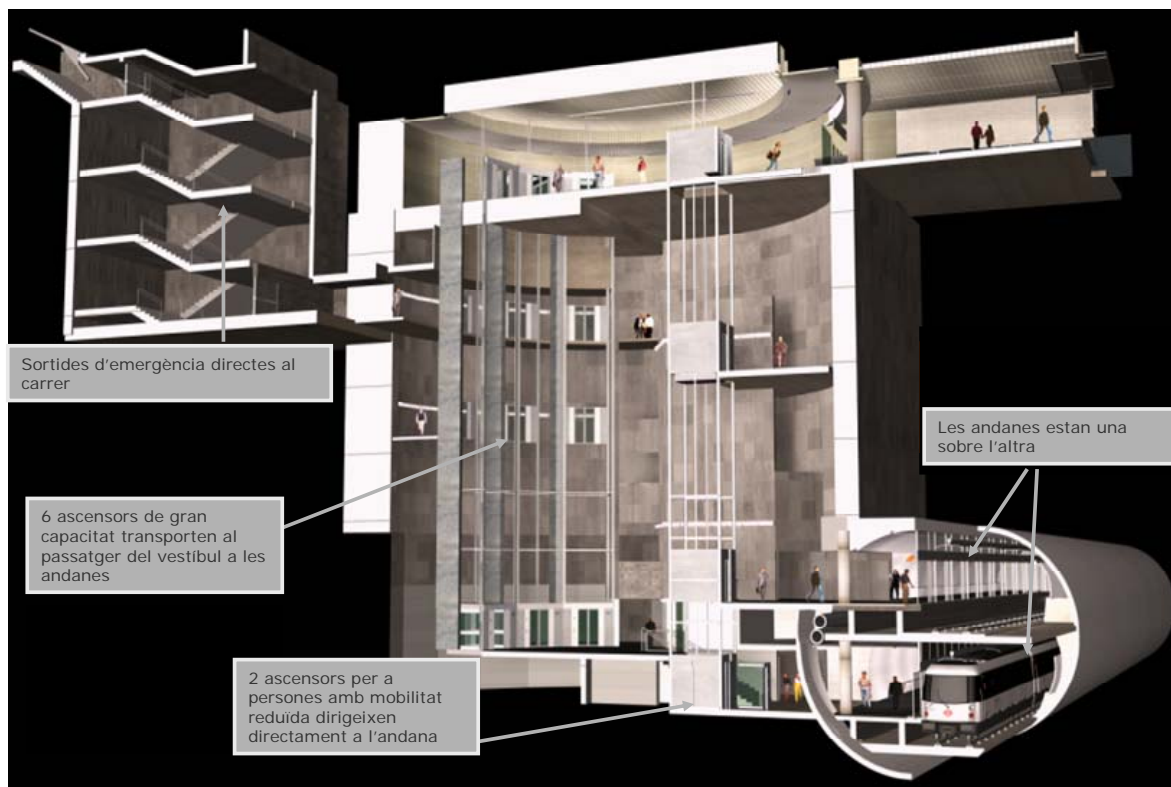


Figura 47 Estació tipus L9 amb ascensors de gran capacitat. Font: Ifercat 2009

Igualment hi ha una altra solució constructiva per aquest tipus d'estació profunda amb escales mecàniques tal i com podem observar a la Figura 48

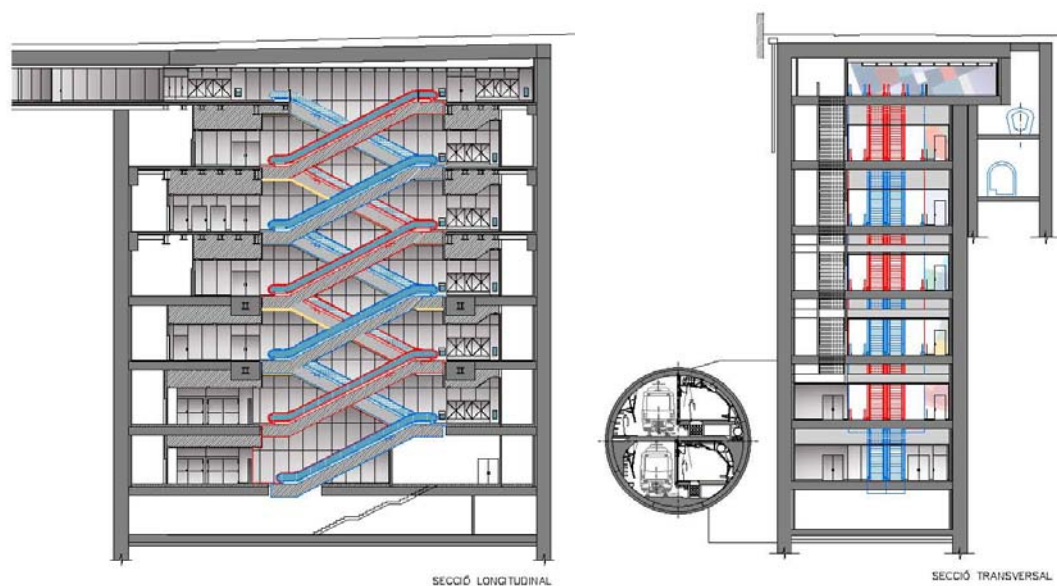


Figura 48 Estació tipus L9 amb escales mecàniques. Font: Ifercat 2009

Finalment, per donar una idea de l'ordre de magnitud d'aquestes estacions podem observar la Figura 49 la comparació d'una estació tipus L9 amb la Torre Agbar de Barcelona.

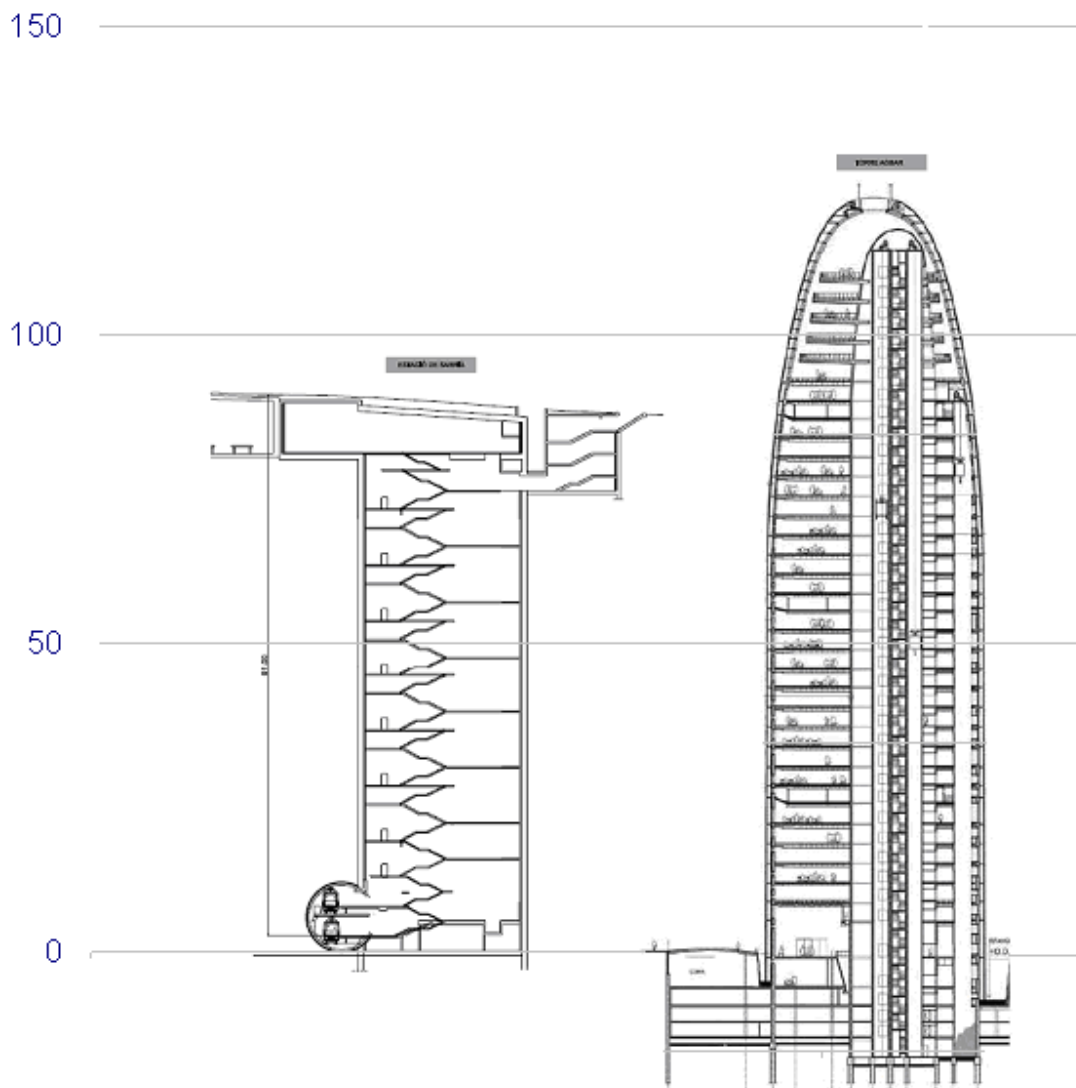


Figura 49 Comparació profunditat estació tipus L9 (estació de Sarrià) amb alçada de la Torre Agbar. Font: Ifercat 2009

Com veurem en el següent apartat, la gestió dels passatgers així com altres aspectes com la ventilació, adquireixen una importància cabdal per tal de garantir l'accessibilitat al sistema, la seguretat i el confort dels usuaris.

4.2 GESTIÓ DE PASSATGERS.

La gestió de passatgers, en el cas de les estacions a gran profunditat és un pilar fonamental per a garantir la seguretat dels usuaris d'aquestes infraestructures.

Com ja s'ha estudiat en apartats anteriors, la diferència entre una estació a profunditat i una estació convencional, a nivell de gestió de passatgers, es troba en el transport vertical. És important fer notar aquest punt, donat que la resta d'elements que configuren la cadena de transport són pràcticament els mateixos.

Alhora de dissenyar els sistemes de transport vertical, el criteri que s'utilitza és el de l'evacuació d'emergència. Això vol dir que alhora de calcular es defineix el sentit cap a fora de l'estació com el sentit dominant i només es considera que els passatgers volen eixir de l'estació. Pel cas d'explotació normal, s'hauria de considerar que hi ha interacció de fluxos, però en el nostre cas, on volem garantir condicions de seguretat en casos d'evacuació, només considerarem que la gent surt des de les andanes cap a zona segura, és a dir, al pou de l'estació.

Com hem pogut veure als apartats anteriors, les solucions predominants són les escales mecàniques i els ascensors. També s'ha de tenir en compte la possibilitat de disposar d'escales fixes. Tot i així, per al dimensionament s'ha de considerar que tot el passatge es processarà a través de les instal·lacions mecanitzades i no pas per les escales fixes. Aquestes queden en un segon pla com a reserva, donat que la elevada profunditat requereix de sistemes mecanitzats per agilitzar l'evacuació.

Per a triar el sistema de transport vertical, cal considerar moltes variables que determinen l'escenari a analitzar. Des de la geometria en alçat i planta, el recorregut, les prestacions de cada dispositiu elevador, la profunditat i la demanda. En el cas de la L9, els factors fonamentals són la geometria, la profunditat i la demanda, donada la configuració de la estació tipus L9.

Finalment els factors fonamentals seran la profunditat i la demanda, donat que la geometria ens marcarà el número màxim d'escales mecàniques així com el número d'ascensors que s'hi poden ubicar.

4.2.1 Comparativa de solucions de transport vertical.

En el present apartat es realitzarà una anàlisi comparativa de l'evacuació per ascensors i escales mecàniques en funció de la profunditat del pou i la seva demanda associada.

Com s'ha explicat anteriorment, els dos factors més importants que influeixen en el temps d'evacuació són:

- La profunditat del pou, que influeix directament en el temps de transport.
- El número de persones esperant (la demanda)
- En el cas dels ascensors el número de persones transportades (la ocupació de l'ascensor).
- La capacitat de les escales mecàniques.

En les estacions tipus L9, la configuració tipus pou permet ubicar 6 ascensors o 2 conjunts d'escales mecàniques, integrant-se en el disseny de la manera més adequada.

A l'apartat 2 del present document s'han definit els diferents conceptes que formen part de la cadena de transport vertical i que permeten establir els temps d'evacuació que s'assoleix amb cada equipament. Seguidament detallarem les dades dels equipaments que per projecte s'han dissenyat per a equipar L9.

Les característiques de cada equipament són les següents (veure Taula 9 i Taula 10):

a) Característiques ascensors

Característiques ascensors		
Número d'ascensors	6	
Número d'ascensors en servei ²³	6	
Velocitat vertical	2	m/s
Acceleració o frenada	1	m/s ²
Capacitat màxima	40	persones
Capacitat efectiva 80% cap. Màx.	32	persones
Distància corresponent a acceleració o frenada	4	m
Temps d'obertura o tancament de portes	3	s
Temps d'entrada/sortida	1	s/persona
Capacitat total 6 ascensors	192	persones
Temps per entrar i sortir necessari	1	s/persona
Número de persones en el sentit dominant	32	
Recorregut total d'ascensor	(-)²⁴	m
Temps d'acceleració o frenada	2	s

Taula 9 Característiques ascensors L9. Font: Elaboració pròpia

L'únic component del temps d'evacuació que depèn de la profunditat del pou (en definitiva – distància que ha de salvar l'ascensor) és el temps de viatge amb velocitat constant. La resta de valors són constants.

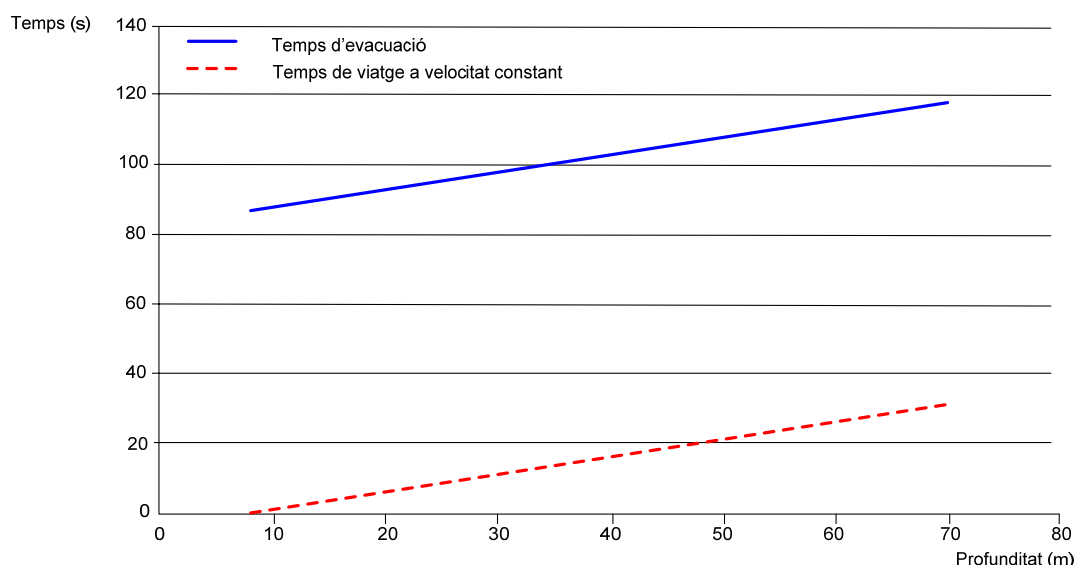


Figura 50 Temps d'evacuació i de viatge en funció de la profunditat del pou. Font: Elaboració pròpia

²³ es considera que no existeix cap ascensor fora de servei per averia o manteniment

²⁴ A determinar en funció de l'estació

Per a les escales mecàniques es presenten les característiques més importants que defineixen les seves capacitats. Per al present estudi, s'analitzaran dos tipologies d'escala mecànica que són les que generalment presenten la majoria de fabricants. Les anomenarem tipus 1 i 2. Ambdues tipologies presenten diferències especialment pel que fa als seus paràmetres geomètrics (angle d'inclinació) i a les seves especificacions dinàmiques, especialment la velocitat. (veure Taula 10).

b) Característiques escales mecàniques tipus 1 i 2

Característiques escales	Tipus 1	Tipus 2	
Desnivell tram	5.50	7.30	m
Angle d'inclinació de l'escala mecànica	27	30	°
Recorregut de l'escala en angle	12.11	14.60	m
Longitud de tram pla de l'escala	0.72	0.72	m
Recorregut total de l'escala	13.55	16.04	m
Número d'escales per tram	2	2	
Capacitat de l'escala	2.50	3	p/s
Capacitat màxima de l'escala	5.00	6	p/s
Capacitat efectiva (80% cap. màx9	4.00	4.80	p/s
Velocitat de l'escala	0.50	0.60	m/s
Temps de permanència per tram	27.11	22.59	s/tram
Distància per canviar d'escala	3.85	3.85	m
Velocitat de pas	1.10	1.10	m/s
Temps de canvi entre escales	3.50	3.50	s/tram

Taula 10 Característiques escales mecàniques. Font: Elaboració pròpia

Per veure aquesta relació es presenta a continuació la Figura 51 amb les gràfiques de temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou i de la tipologia d'escala sense tenir en compte el temps d'espera.

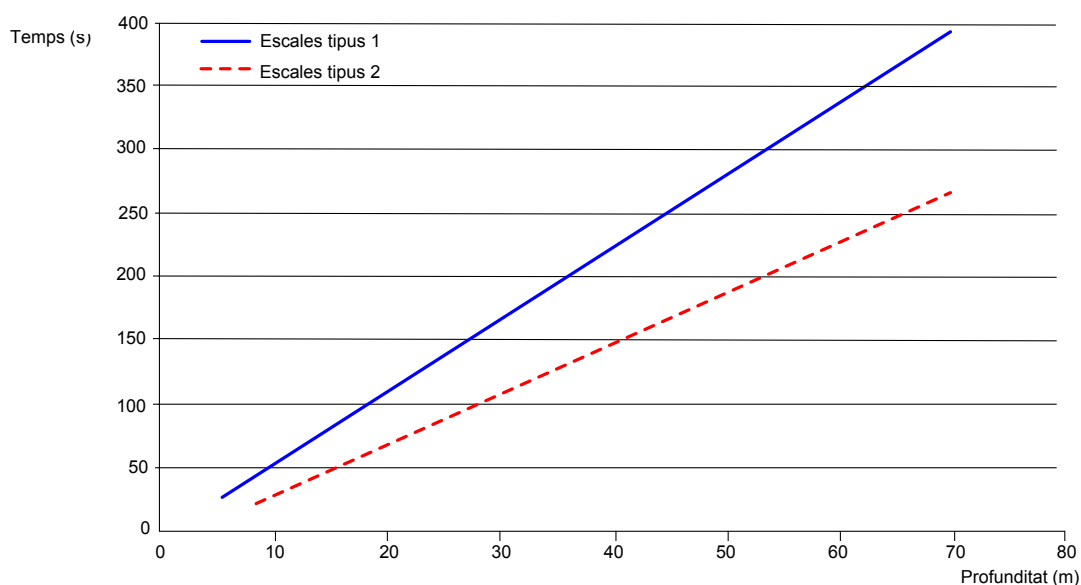


Figura 51 Temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou sense tenir en compte el temps d'espera. Font: Elaboració pròpia

Per veure aquesta relació es presenta a continuació gràfiques del temps de evacuació d'andana en funció de la profunditat del pou per a diferents números de persones.

Compararem tres alternatives d'evacuació:

- Un conjunt de 6 ascensors de gran capacitat que donen una capacitat efectiva de 192 (32 passatgers de capacitat cada ascensor)
- 2 conjunts d'escales tipus 1
- 2 conjunts d'escales tipus 2

Altres consideracions necessàries:

- Els ascensors treballen en paral·lel, els seus cicles comencen i acaben en el mateix instant i la seva ocupació és igual. Si no fos així complicaríem en excés el problema, al necessitar introduir fenòmens probabilístics
- Els ascensors estan al nivell inferior en el moment en que els passatgers del primer tren apareguin. Això implica que inicialment no hi hagi temps d'espera de l'ascensor. Això és gràcies al sistema de control intel·ligent dels ascensors, que permet sincronitzar l'arribada d'un tren amb el fet que estiguin preparats per a carregar.
- Tots els passatgers arriben davant de les escales o ascensors al mateix moment en un instant $t=0$, és a dir no arriben de forma esglaonada.
- Suposem en cada viatge que els ascensors s'utilitzen al 100% de la seva capacitat efectiva, així que el número de persones que arriben és múltiple de 192.

SUPÒSIT A : 192 PERSONES

Es necessita únicament un viatge del conjunt de 6 ascensors per evacuar totes les persones de l'andana (veure Figura 52). Funcionament de les diferents alternatives:

- **ASCENSORS:** Temps d'evacuació per ascensors és mínim, s'allarga d'acord amb la profunditat del pou i és de 0.50 segons per cada metro de profunditat. Als 45 segons no hi ha cap persona esperant.
- **ESCALES TIPUS 1:** Al temps d'evacuació per escales es suma el temps d'espera que té valor de $192 \text{ pers.} / 4.0 \text{ p/s} = 48$ segons i el temps de permanència que augmenta amb la profunditat 30.61 segons per cada tram nou, el que suposa 6.55 segons per cada metro.
- **ESCALES TIPUS 2:** Al temps d'evacuació per escales es suma el temps d'espera que pren com a valor $192 \text{ pers.} / 4.8 \text{ p/s} = 40$ segons i temps de permanència que augmenta amb la profunditat de 26.09 segons per cada tram nou, que suposa 3.57 segons per cada metro.

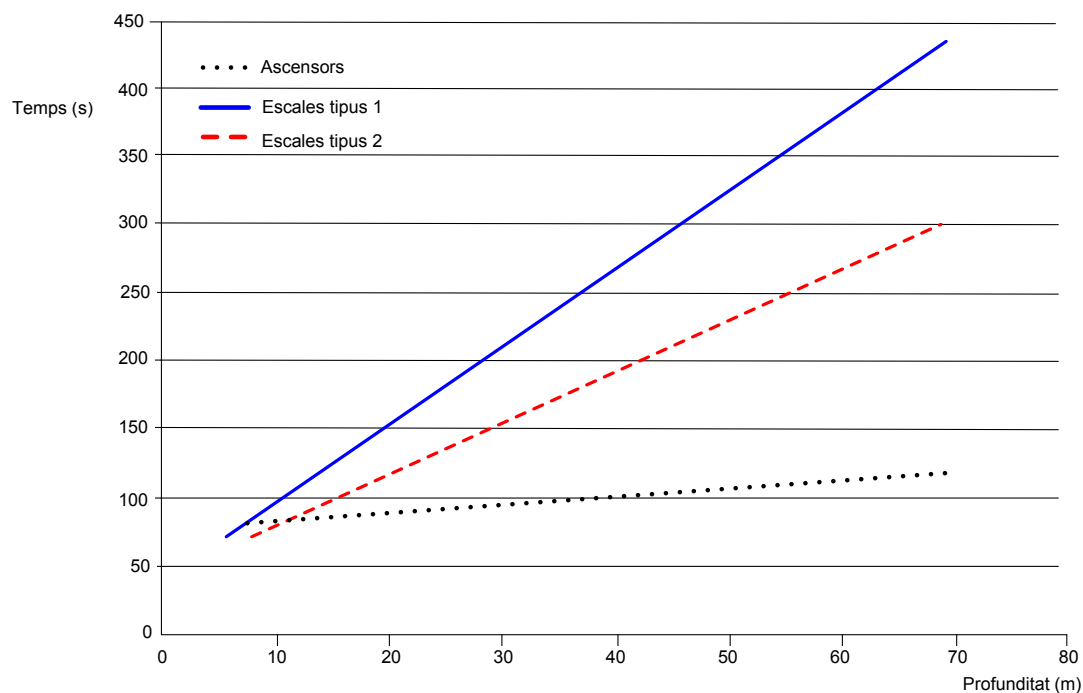


Figura 52 Temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou. Supòsit A 192 persones. Font: Elaboració pròpia

SUPÒSIT B : 384 PERSONES

Es necessiten dos viatges del conjunt de 6 ascensors per evacuar totes les persones de l'andana (veure Figura 53). Funcionament de les diferents alternatives:

- **ASCENSORS:** Temps d'evacuació per ascensors igual al temps d'espera (que és igual a un cicle complet de l'ascensor) més el temps d'evacuació igual que en el cas A, donat que en el següent viatge l'ocupació de l'ascensor és la mateixa (192 persones), temps de viatge a velocitat constant que augmenta d'acord amb la profunditat del pou i és de **1.50 segons per cada metro**, perquè els ascensors han de fer 2 viatges de pujada i un de baixada.
- **ESCALES TIPUS 1:** Al temps d'evacuació per escales se li suma el temps d'espera que té per valor $192 \text{ pers.} / 4.0 \text{ p/s} = 48 \text{ segons}$ i temps de permanència que augmenta amb la profunditat 30.61 segons per cada nou tram, fet que suposa **6.55 segons per cada metro**.
- **ESCALES TIPUS 2:** Al temps d'evacuació per escales cal sumar el temps d'espera que té per valor $192 \text{ pers.} / 4.8 \text{ p/s} = 40 \text{ segons}$ i temps de permanència que augmenta amb la profunditat 26.09 segons per cada nou tram, fet que suposa **3.57 segons per cada metro**.

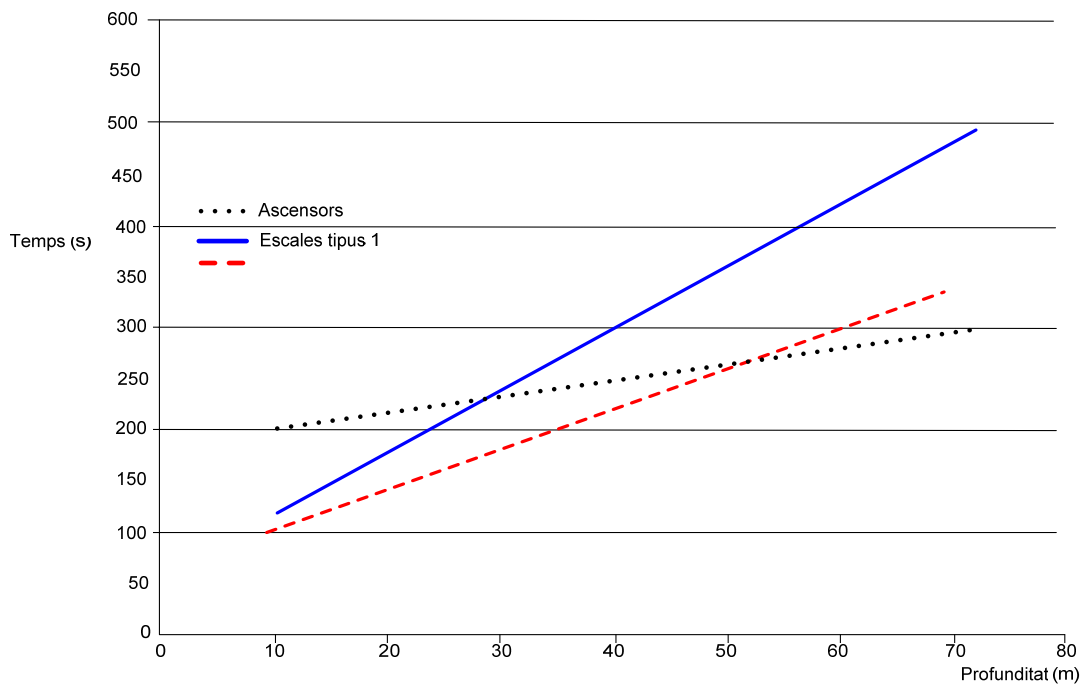


Figura 53 Temps d'evacuació d'andanes en funció de la profunditat del pou. Supòsit B 384 persones. Font: Elaboració pròpia

S'observa que amb aquest model, els ascensors perden competitivitat respecte a les escales en comparació amb el supòsit A, això es deu a que principalment apareix el temps d'espera per a l'ascensor que augmenta considerablement el temps total d'evacuació.

SUPÒSIT C : 576 PERSONES

Es necessiten tres viatges del conjunt de 6 ascensors per evacuar totes les persones. Funcionament de les diferents alternatives:

- **ASCENSORS:** Temps d'evacuació per ascensors igual al temps d'espera (que és igual a 2 cicles complerts de l'ascensor) més el temps d'evacuació igual que en el cas A, en tots els viatges de l'ascensors la ocupació és 100% - 192 persones, temps de viatge a velocitat constant que s'allarga d'acord amb la profunditat del pou i és de 2.50 segons per cada metro, perquè els ascensors han de fer 3 viatges de pujada i 2 de baixada.
- **ESCALES TIPUS 1:** Al temps d'evacuació per escales es suma el temps d'espera que té per valor $192 \text{ pers.} / 4.8 \text{ p/s} = 48$ segons i temps de permanència que augmenta amb la profunditat 30.61 segons per cada tram nou, que suposa 6.55 segons per cada metro.
- **ESCALES TIPUS 2:** Al temps d'evacuació per escales es suma el temps d'espera que té per valor $192 \text{ pers.} / 4.8 \text{ p/s} = 40$ segons i temps de permanència que augmenta amb la profunditat 26.09 segons per cada tram nou, que suposa 3.57 segons per cada metro.

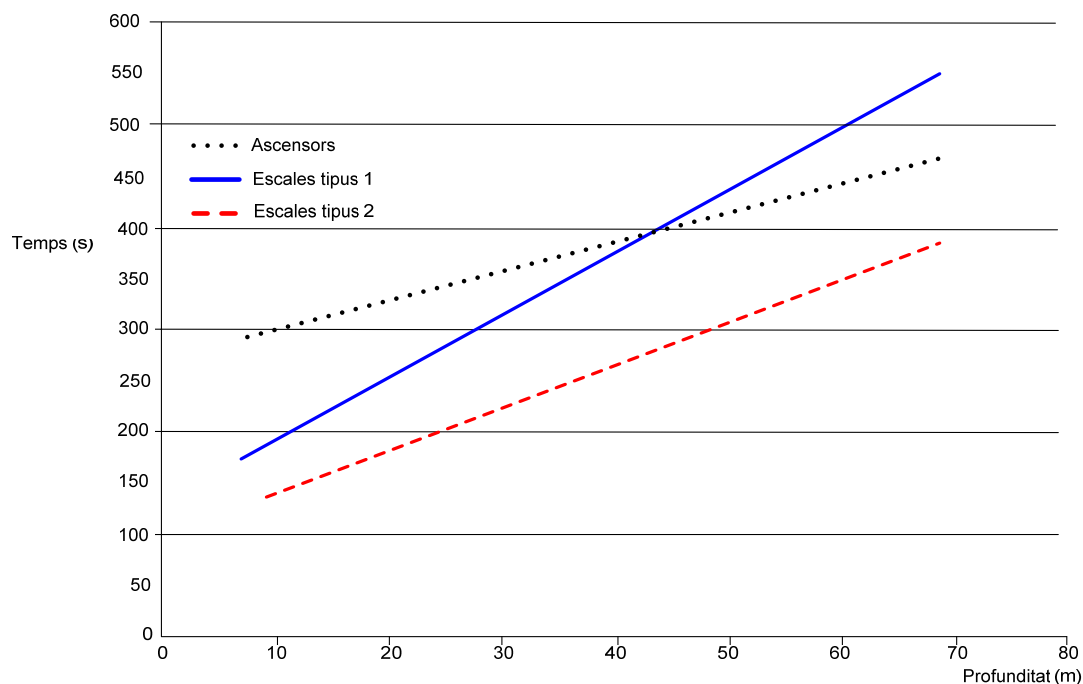


Figura 54 Temps d'evacuació d'andanes en funció de la profunditat del pou. Supòsit 576 persones. Font: Elaboració pròpia

Observem a la Figura 54 que en aquest cas els ascensors perden competitivitat respecte a les escales. Comparant les escales tipus 2 amb el temps d'evacuació per ascensor sempre és superior el de les escales i per al tipus 1 solament per a grans profunditats convé escollir la solució d'ascensors.

Aquests càlculs mostren la tendència general, donat que no tenen en compte que els passatgers arriben de forma esglaonada, en intervals corresponents a la freqüència dels trens.

Aquestes relacions les podem presentar a la Figura 55 de forma conceptual segons [5]

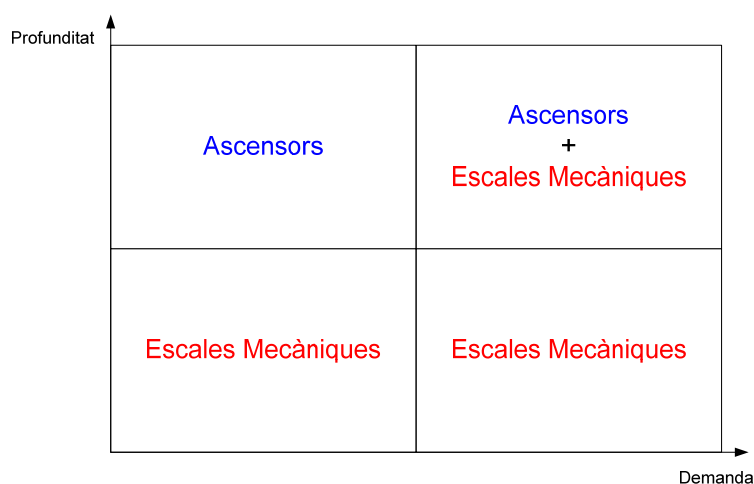


Figura 55 Esquema comparatiu Ascensors-Escales mecàniques, respecte temps d'evacuació. Font: Estudi d'alternatives d'escales i ascensors. Sener 2007

És difícil establir valors límits, donat que les hipòtesis de demanda i de distribució probabilística d'arribades depenen del criteri que s'apliqui a l'anàlisi, fet pel qual, a mode orientatiu la Figura 55 determina 4 escenaris.

- Per profunditats elevades i poca demanda els ascensors són preferibles. Tot i que [5] proposa aquesta solució, optar per una solució mixta és molt interessant des del punt de vista de tenir una demanda inferior o igual a la capacitat dels ascensors. Això és motivat per que s'aprofita la major velocitat vertical de l'ascensor i no haver de tancar el cicle recollint ningú més al nivell inferior.
- Per profunditats petites i poca demanda, les escales són més competitives que els ascensors, donat que els temps associats a les maniobres de càrrega i descàrrega penalitzen molt pel poc trajecte associat.
- Per profunditats petites i gran demanda, les escales mecàniques són millors que els ascensors per la major capacitat associada
- Gran profunditat i gran demanda, la solució millor és la combinació d'escales mecàniques amb ascensors per poder cobrir les hores punta i les hores vall.

No oblidem que aquests valors s'han obtingut a partir de les configuracions proposades en el disseny de una estació tipus pou de L9. Les dimensions de la mateixa (pou circular de 26 m de diàmetre intern) només permeten aquestes distribucions considerant també els espais necessaris per escales d'emergència, instal·lacions i ventilació.

Per tenir una visió més exacta de la idoneïtat de cada solució estudiarem el temps total d'evacuació per diferents valors de demanda menors de 192 persones.

El fet que les persones arribin a l'estació de manera esglaonada en un cert interval de temps, afavoreix l'ús dels ascensors, perquè no sempre treballen al 100 % i d'aquesta manera es redueix el temps d'evacuació i el temps de cicle complet.

Suposem que a la hora punta durant 15 minuts (900 segons) arriben en total a l'estació un total de N_{tot} de persones. Considerant que la freqüència dels trens és de 1.50 minuts, aquest número es redistribueix en el temps en 10 parts iguals, així cada 1.50 minuts (90 segons) arriben un número de persones igual a: $N=1/10*N_{tot}$ persones. Suposant que de les dos direccions dels trens (Tren A) i un altres secundària (Tren B) repartim el número N de la següent manera:

$$N \text{ tren A } = 2/3 * N \text{ i } N \text{ tren B } = 1/3 * N$$

separant en el temps dels trens A i B 45 segons que és la meitat de la freqüència.

A continuació es presenten les gràfiques de temps d'evacuació en funció de la profunditat del pou, que engloba els valors entre 16.0 i 72.0 metres, valors interval de la profunditat de les estacions de la L9.

Els càlculs s'han efectuat per tres valors de número de persones que arriben en un interval cada 90 segons:

- i) 24 persones
- ii) 58 persones
- iii) 109 persones

La tipologia d'escapes considerades són les tipus 2, més ràpides i competents per la major velocitat vertical de què disposen.

- **Escapes Tipus 2:** 2 conjunts de trams verticals de 8.00 m, inclinació de 30°, la velocitat de 0.50 m/s i capacitat efectiva de 4.0 persones/segon.

Per les escapes de tipus 2 i les demandes i) i ii) el límit de profunditat del pou per ús d'escapes és **18.0 m** i **24.0 m** respectivament, i per la demanda de 109 persones aquest límit és de **40 metres** (veure Figura 56)

Un altre factor molt important que s'ha de tenir en compte és l'acumulació dels passatgers a l'andana corresponent del tren A, ón l'afluència és major 2/3N respecte 1/3N de l'andana del tren B.

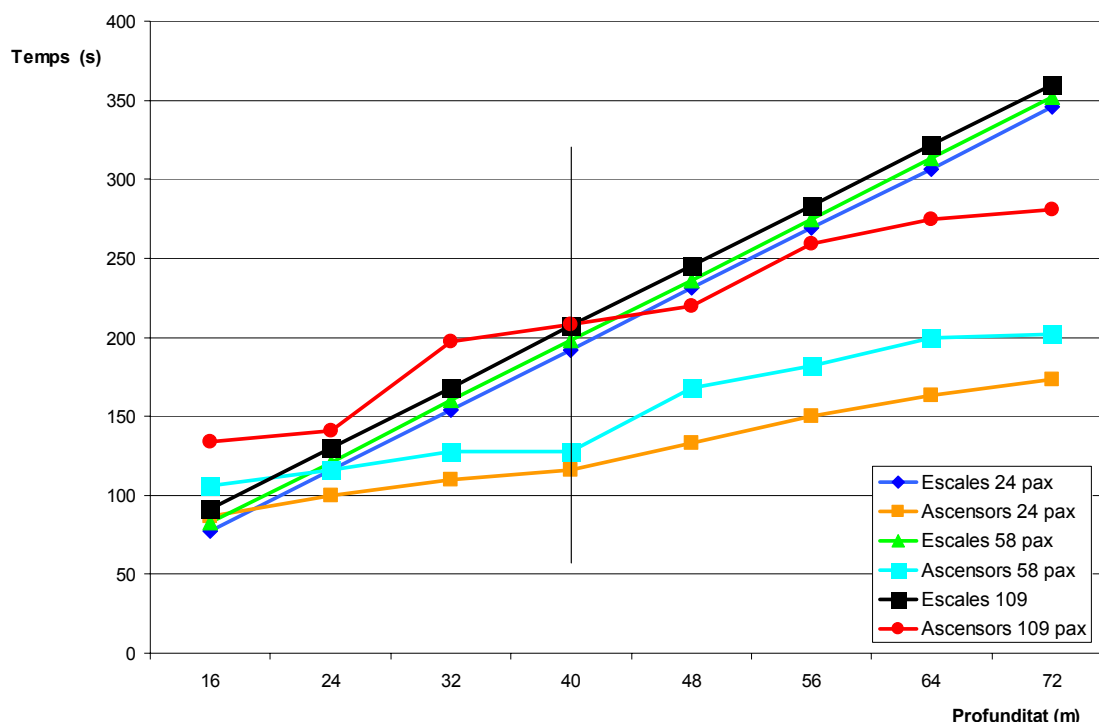


Figura 56 Esquema comparatiu per diferents demandes d'ascensors i escapes mecàniques tipus 2, respecte el temps d'evacuació i la fondària. Font: Elaboració pròpia.

Així doncs, amb els resultats mostrats a la Figura 56 veiem com es comporten tots dos sistemes de transport a mesura que modifiquem dades de profunditat i demanda. Cal indicar que els càlculs anteriors són el resultat de la generalització per a una estació tipus. La correcta utilització de les tècniques emprades anteriorment, que no són més que la utilització de programacions lineals, cal que s'adaptin exactament a les hipòtesis de demanda que es tingui a cada estació i a la configuració geomètrica individual.

Per motius d'alçada, els ascensors són la millor opció. La qüestió és que en cas de tenir molta demanda, les escapes mecàniques proporcionen millors capacitats, fet pel qual, triar una solució o l'altre és complexa.

Només cal imaginar una estació de 80 metres, amb escapes mecàniques, es necessiten de l'ordre de 17 tramades d'escapes mecàniques. Si hi ha poca demanda, aquesta solució, a part de tenir un cost econòmic molt elevat, el seu impacte

mediambiental en relació al consum d'energia és enorme i un inconfort molt elevat per al viatger. Amb aquestes profunditats únicament qüestions de seguretat justifiquen posar escales mecàniques.

Existeixen estacions a qualsevol ciutat del món, on la demanda prevista és molt baixa, donat que habitualment són estacions que donen servei a zones amb baixa densitat d'usuaris potencials, és a dir, zones lluny dels nuclis densament poblats com són les rodalies o zones més deshabitades. Malgrat això, en dies puntuals, aquestes zones s'ocupen per activitats tipus com esdeveniments esportius, concerts de música, activitats culturals, etc, fet pel qual les demandes augmenten enormement.

Això provoca un debat sobre quin criteri s'ha de fer servir per dissenyar les infraestructures. Per a l'esdeveniment puntual o per a la resta de dies on molt poca gent emprà aquella estació.

És un fenomen semblant al de les carreteres de zones d'interès turístic. Les IMD d'aquelles carreteres són molt baixes degut a que s'han realitzat els càlculs fent la mitja de demandes diàries, però sempre ocorre que en un determinat nombre de dies a l'any es col·lapsen.

No és un problema de solució trivial, però en el món ferroviari s'adopten mesures per tal de controlar l'afluència de passatgers a certes estacions, evitant que el tren s'aturi a les estacions que estiguin a punt de col·lapsar les andanes, restringint l'accés a les estacions per tal de garantir que només es pugui evacuar (dies de futbol o concerts) o amb altres mesures, totes encaminades a controlar el volum de públic que hi hagi a l'interior de les mateixes.

Un aspecte a tenir en compte també, és que els fluxos d'entrada a l'estació i de sortida no són simètrics. Les entrades a estació són laminades per l'efecte de les barreres tarifàries i el seu funcionament no té pics tant acusats. En canvi en el sentit de sortida del tren cap a l'exterior, la distribució d'arribades a peu d'ascensor o escala mecànica no és continua, sinó per volums de passatgers.

4.2.2 Evacuació en estacions profundes.

En aquest apartat es defineixen els mitjans d'evacuació existents, en les estacions projectades, per evacuar les persones de les andanes fins a nivell de vestíbul.

S'entén que l'evacuació del vestíbul no és crítica ja que el flux de persones que puja de les andanes fins al vestíbul arriba suficientment laminat per no produir un col·lapse als sistemes d'evacuació existents (passos de les validadores). Un altre punt a tenir en compte és que les andanes disposen de sortides d'emergència als seus extrems, en unes estacions aquesta comunica amb l'altra andana i en altres permet la sortida d'emergència directe a l'exterior, sense passar pel vestíbul de l'estació. Aquestes sortides només s'han tingut en compte en cas de comunicació directa a l'exterior.

a) Elements per l'evacuació

Els elements considerats a l'evacuació són els reflexats a la Figura 57 com 1, 2, 3 i 4

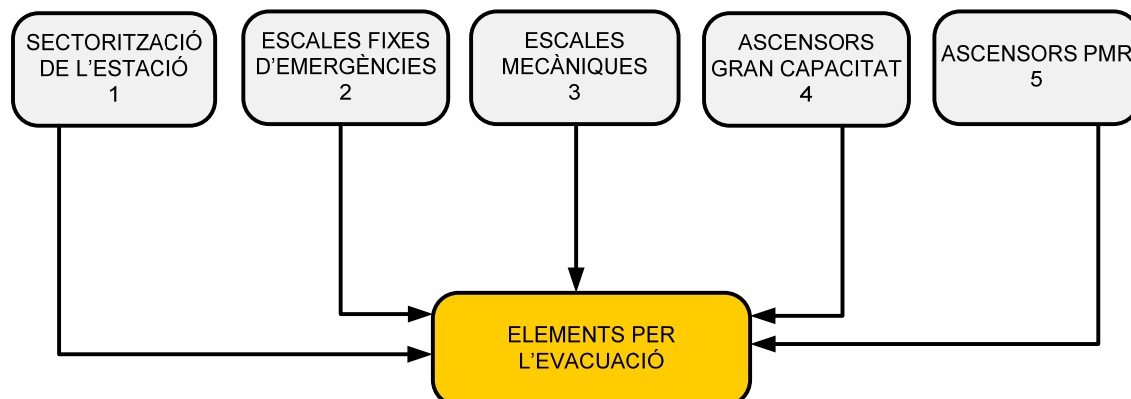


Figura 57 Elements considerats per a la evacuació desde l'andana fins al vestíbul d'una estació tipus L9. Font: Elaboració pròpia.

1) Sectorització de les estacions

Criteris de sectorització

L'objecte de la sectorització és crear zones segures en els recorreguts d'evacuació, mitjançant portes i tancaments adients tant en la seva funcionalitat com en la seva resistència al foc, la qual cosa permet reduir el temps d'exposició de les persones a les condicions de incendi, (fums, elevada temperatura, etc).

En general segons [4], existeixen un seguit de conceptes que s'han de complir per tal de garantir la seguretat en un cas d'evacuació, com per exemple:

- Tots els accessos de les àrees públiques de l'estació cap els llocs que no siguin de trànsit, s'han de protegir amb dispositius contra incendis amb una resistència al foc adequada per al lloc on s'instal·lin i que compleixin les especificacions que siguin exigides.
- S'han de sectoritzar els recintes que disposin de la característica de locals de risc especial, que puguin ser origen d'incendi o facilitin la seva propagació, com les sales de maniobres elèctriques, les sales de bateries, els magatzems d'escombreries i recintes similars. Igualment s'han de sectoritzar els recintes que per la seva necessitat de funcionament durant un incendi, es requereixi que continuïn operatius.
- La direcció d'obertura de les portes de sectorització ha de ser en el sentit de evacuació, per no interferir negativament en el flux d'evacuació.

Sectorització dels recorreguts d'evacuació

La forma de sectoritzar, en el cas de L9 (veure Figura 58), les diferents parts de l'estació, per tal de permetre l'evacuació de les persones en condicions segures, s'indica a continuació, segons l'origen d'evacuació:

- Evacuació des d'un tren parat al túnel, inferior o superior. Aquests nivells s'han de sectoritzar entre ells, ja que el passatge del túnel afectat, s'ha de portar al túnel sense afectació per tal de realitzar el recorregut d'evacuació sense els condicionants del incendi, que afecten l'evacuació. (Aquest cas no afecta al nostre estudi per no trobar-se a l'estació)
- Evacuació des d'un tren parat a l'andana. Les portes d'andana compartimenten el sector del túnel respecte de la resta de l'estació impedit el pas de fums del tren a l'estació.
- Evacuació des de l'andana (veure Figura 58) . L'espai de l'andana es sectoritzarà respecte del túnel mitjançant les portes d'andana, i respecte de la preandana, mitjançant les portes de vestíbul, resistents al foc i disposant d'un vestíbul previ a l'accés dels ascensors PMR.
- Evacuació des de la preandana. El sector de la preandana disposa d'escapes protegides. Per tal de permetre l'evacuació, aquestes escales es sectoritzen respecte de la preandana mitjançant portes resistents al foc. Segons la tipologia d'estació, en funció de l'alçada d'evacuació, l'escala disposa de replans de descans, que constitueixen sectors d'incendi independents de les escales.

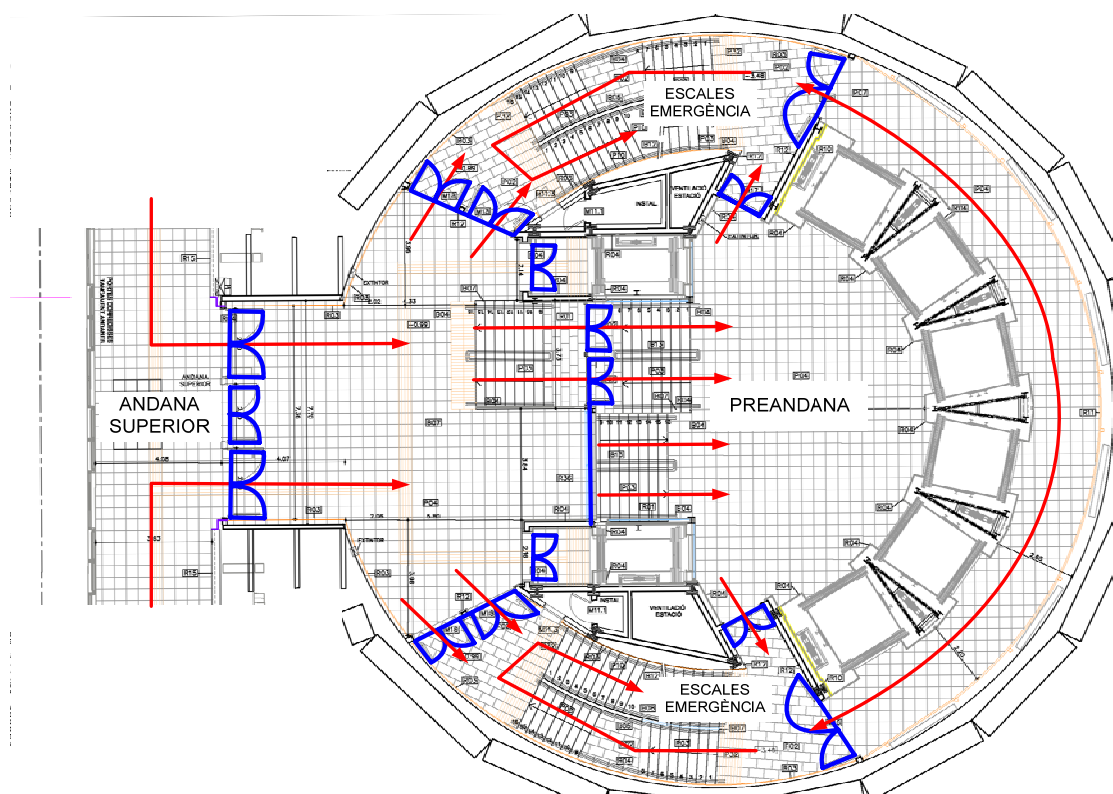


Figura 58 Esquema de rutes d'evacuació d'una estació tipus L9. Font: Elaboració pròpia.



Figura 59 Portes de sectorització andana-preandana. Font: Ifercat 2009

El cas de sectorització amb escales mecàniques és similar al presentat per una estació amb ascensors. Com es veurà més endavant, alhora de ventilar, les dificultats no són les mateixes.

2) Escales fixes d'emergència

Les escales fixes d'emergència (veure Figura 58) parteixen des del nivell inferior de l'estació (per sota de l'andana inferior) i arriben fins a l'exterior (per una sortida d'emergència) o fins el vestíbul de l'estació (en cas de continuar per les mateixes). Aquestes escales es consideren com a lloc segur ja que estaran sectoritzades respecte la resta de l'estació i disposaran d'un sistema de ventilació adient. Aquestes estan independitzades de la preandana i dels vestíbuls previs per portes resistents al foc. Segons l'alçada d'evacuació de les escales, aquestes disposen, cada determinat nombre de plantes de zones de descans, sectoritzades respecte de l'escala d'evacuació, mitjançant portes resistents al foc.

Els accessos a aquestes escales es realitzen pel vestíbul previ inferior, pel vestíbul previ superior i per la preandana.

3) Escales mecàniques

A les estacions on l'equipament de transport vertical està format per escales mecàniques, s'accepta que funcionin en cas d'emergència per ajudar a realitzar l'evacuació.

Als càlculs del temps d'evacuació de l'estació que es desenvolupen seguidament, s'ha considerat que es pot realitzar l'evacuació per escales mecàniques en sentit ascendent i parades, que és la situació més desfavorable.

4) Ascensors de gran capacitat

Els ascensors de gran capacitat previstos van des de la preandana fins al vestíbul, sense parades intermèdies. Cada estació tipus línia 9 té espai suficient per encabir sis ascensors, excepte l'estació de l'Església Major, que disposarà de quatre ascensors. La capacitat de cada ascensor és de 40 persones, amb una càrrega màxima de 3.000 kg.

S'han dissenyat parades d'emergència dels ascensors cada 11 metres en vertical, sent la capacitat dels vestíbuls de parada d'unes 240 persones. Aquests vestíbuls no es poden considerar com a lloc segur degut a que només és un forjat en mènsula amb una barana de protecció.

Els ascensors, de la mateixa manera que les escales mecàniques es troben connectats a una xarxa d'alimentació segura via SAI²⁵ per tal de seguir en funcionament en cas de tall de subministrament elèctrics. Tot i així, per a evacuació d'emergència no es tenen en compte pel càlcul.

5) Ascensors reservats per PMR'S

Els ascensors reservats per persones de mobilitat reduïda (PMR's) van des dels vestíbuls previs inferior i superior de la preandana, i des de la preandana fins al vestíbul de l'estació, és a dir, disposarà de tres parades. Cada estació tipus línia 9 disposa de dos ascensors per PMR's. L'accés d'aquests ascensors disposa de vestíbul previ d'independència, per tal de permetre l'espera de les persones de PMR's en un sector d'incendis independent.

S'han dissenyat parades d'emergència dels ascensors cada 11 metres en vertical, coincidint amb els vestíbuls de les parades d'emergència dels ascensors de gran capacitat.

b) Càlcul de capacitats d'evacuació a estacions tipus L9

En el present apartat es tractarà, en primer lloc la definició dels escenaris i dels temps d'evacuació, la càrrega d'ocupació de l'estació i la capacitat dels elements d'evacuació en estacions, i com a segon punt el càlcul de l'evacuació de l'estació.

En aquest apartat es tenen en compte diferents normatives sobre estacions ferroviàries, i es realitza una comparativa entre diferents aspectes dels càlculs d'evacuació.

Com a últim punt s'inclou les conclusions i millores a realitzar en els mitjans d'evacuació de les estacions per poder disminuir el temps d'evacuació dels passatgers de la futura línia 9 de Metro de Barcelona.

Als següents apartats es descriuen els criteris adoptats a L9, d'acord amb [4], [6] i [8]

- **Temps d'evacuació**

Segons [4], els temps d'evacuació d'estació soterrada han de complir:

- Hi ha d'haver prou passos per evacuar en 4 minuts, o menys, des de les andanes, tota la càrrega d'ocupació de l'estació

²⁵ Sistema d'alimentació ininterrompuda

- L'estació s'ha de projectar de manera que es pugui evacuar des del punt més llunyà de l'andana fins a un lloc segur, en sis (6) minuts o menys.

La normativa [7], coincideix en aquests valors :... *4 minutes to clear the platform, and 6 minutes to reach a place of safety...*

- **Càrrega d'ocupació de l'estació**

Les normes tècniques catalanes [4] defineixen com a càrrega d'ocupació de l'estació els viatgers dels trens que puguin entrar simultàniament a l'estació per totes les vies en la direcció de trànsit normal durant els 15 minuts de màxima afluència, més la càrrega simultània que comporta la capacitat de les andanes, suposant que mai descarregarà més d'un tren cap a una andana durant una emergència.

Per a evaluar la càrrega d'ocupació, a Catalunya s'accepta el procediment de [8]. Segons aquest procediment el nombre de passatgers es determina amb l'expressió:

$$P_{max} = n (P1 + P2) + P3$$

n = nombre de vies a l'andana

P1 = nombre màxim de places de seient als trens més llargs que paren a l'andana.

P2 = nombre màxim de places de peu als trens mas llargs que paren a l'andana.

P3 = 30 % de las suma P1 + P2, nombre de viatgers esperant a l'andana.

- **Capacitat dels trens en hora punta**

Segons ALSTOM, empresa adjudicatària del subministre del material mòbil de la línia 9 de metro, la capacitat del tren, segons la composició Ma1-Mb1-R-Mb2-Ma2 és la que es resumeix en la Taula 11 , en funció de la densitat d'ocupació.

	Ma	Mb	R	Tren
Passatgers asseguts	24	26	22	122
PMR's	0	1	0	2
Passatgers drets (AW1) ²⁶	116	108	116	564
Total (AW1)	140	135	138	688
Passatgers drets (AW2) ²⁷	175	162	173	847
Total (AW2)	199	189	195	975
Passatgers drets (AW3) ²⁸	233	217	231	1131
Total (AW3)	257	244	253	1255

Taula 11 Característiques material mòbil L9. Font: Alstom

A la Figura 60 es pot observar la composició del material mòbil (Ma, Mb i R)

²⁶ AW1: 4 Pax/m2

²⁷ AW2: 6 Pax/m2

²⁸ AW3: 8 Pax/m2



Figura 60 Esquema composició tren. Font: Alstom

El nombre de viatgers pel càlcul d'evacuació, d'un total de viatgers (asseguts i a peu) es pren el valor de 975 persones segons [8], amb una densitat de càlcul de 6 pers./m² a la superfície destinada a viatgers de peu.

▪ Capacitat de les andanes

Segons el procediment de [8] "Determinació dependent de les places als trens, de les persones que es troben a l'andana", s'obté el següent nombre de viatgers al càlcul d'evacuació per totes les estacions:

- Viatgers en vehicle = 975 persones
- Viatgers esperant a l'andana = 30% de 975 = 293 persones
- Suma per andana lateral (nivell d'andana): 1.268 persones

En el cas que al mateix temps estacionés un tren complet a la via oposada de l'altre nivell d'andana, resultarien $2 \times 1.268 = 2.536$ persones, que haurien d'anar cap al nivell superior.

Aquesta és l'ocupació que es tindrà en compte per fer l'estudi d'evacuació de les estacions tipus L9.

▪ Capacitat en persones/minut dels elements d'evacuació en estacions

Capacitat de les andanes

Segons [4], s'estableix que la capacitat en persones per minut d'elements com andanes, passadissos o rampes amb pendents inferiors al 4% és de 50 persones/minut/pas de sortida, on 1 pas de sortida és de 60cm.

Amb andanes de 3,75 m (5 passos de sortida), s'obté que la capacitat d'evacuació de les andanes (superior e inferior) és de 250 persones/minut per cada andana. Tenint en compte que a l'ample indicat es treu un ample de 0,30 m de la vorera de paret i 0,45 m de la vora d'andana, segons [4].

Capacitat de la connexió entre andanes

Es disposa de dos tipus de connexió entre andanes, mitjançant les vies que es disposen als extrems de les andanes.

Existeixen dos connexions entre andanes al final de les mateixes, es tracta d'escales fixes d'un ample mínim de 2,0 m, més unes rampes amb el 8,0 % de pendent i mínim

de 2,0 m d'ample, essent la capacitat d'evacuació en sentit d'andana inferior a andana superior de 280 persones/minut ($35 \times 2 \text{m} \times 2 + 35 \times 2 \text{m} \times 2$) i en sentit d'andana superior a andana inferior de 320 persones/minut ($40 \times 2 \text{m} \times 2 + 40 \times 2 \text{m} \times 2$).

Les capacitats són diferents degut a que [4] fixa una capacitat per escales fixes i rampes amb pendents superiors al 4% de 35 persones/minut/pas de sortida en direcció de pujada i 40 persones/minut/pas de sortida en direcció de baixada.

No es tindran en compte en l'estudi d'evacuació els recorreguts mitjançant les portes que es disposen als extrems de les andanes, a les estacions on aquest recorregut traslladi les persones d'una a l'altra andana.

Capacitat de la connexió andana-preandana

Per poder pujar o baixar de l'andana a la preandana existeix una escala fixa d'ample de 3,30 metres (5 passos de sortida), s'assoleix una capacitat d'evacuació de 175 persones/minut des d'andana inferior a preandana i 200 persones/minut des d'andana superior a preandana, donat que la capacitat en una escala fixa és de 35 persones/minut/pas en sentit de pujada i 40 persones/minut/pas en sentit de baixada.

Capacitat de la preandana

Es tracta d'un vestíbul amb una superfície aproximada de 100 m^2 , a nivell intermedi entre les 2 andanes. Suposant una ocupació màxima en cas d'emergència de 4 persones/ m^2 , s'obté una capacitat $(4 \text{ p}/\text{m}^2) \times 100 (\text{m}^2) = 400$ persones.

La preandana, entesa com a espai d'espera dels ascensors i de connexió amb escales fixes i mecàniques, té una capacitat d'evacuació en persones/minut corresponent a aquests elements, tal i com es descriu a continuació.

Capacitat de les escales fixes i mecàniques

La capacitat per pas de sortida en "direcció pujada" segons [4] és de 35 persones/minut/pas. Les escales de sortida han de tenir un mínim de 1,20 m d'ample. Les escales mecàniques es poden computar per al càlcul d'evacuació, amb capacitat equivalen a dos passos, 1,5 passos per ample de 0,80 m i un pas per menys de 0,80m. No pot haver sortida d'un nivell que només es pugui realitzar mitjançant l'escala mecànica. Sempre es considerarà una escala mecànica fora de servei. Amb 2 escales fixes de comunicació entre preandana i vestíbul de 2 m cadascuna, es tenen 6 passos de sortida, i per tant el conjunt de les 2 escales fixes té una capacitat d'evacuació de 210 persones/min.

Les escales mecàniques tenen la mateixa capacitat d'evacuació que les fixes en situació d'emergència, de 35 p/min per pas de sortida en sentit ascendent, segons [4].

Pel càlcul de l'evacuació es plantegen diferents alternatives de punt d'inici de les escales mecàniques, sent les següents:

- Inici de les escales mecàniques en un nivell superior a la andana superior.
- Inici de les escales mecàniques en l'andana superior.
- Inici de les escales mecàniques en l'andana inferior.

Capacitat de les portes de sortida i de les barreres tarifàries

Les barreres tarifàries desactivades tenen una amplada mínima de 50 cm sense obstacles (aproximadament 1 pas de sortida), de forma que cadascuna té una capacitat d'evacuació de 50 persones/min/barrera, aquestes estaran desactivades i obertes mentre duri l'emergència. En cas de que sigui de tipus torniquet, la capacitat es redueix a 25 persones/min (aquest últim tipus no aplica a la línia 9).

Les portes de sortida han de tenir una amplada mínima de 0,90 m, i tenen una capacitat de 50p/m per pas de sortida.

- **Consideracions de zones segures**

En el present càlcul de l'evacuació de l'estació es consideren com lloc segur o zona segura: els passadissos de connexió, els vestíbuls previs, les escales fixes d'emergència, la preandana, l'andana on no es produeix l'emergència i els refugis i punts d'espera proposats que es troben sectoritzats respecte de la resta de les dependències.

- **Evacuació dels PMR'S**

L'evacuació de les persones amb mobilitat reduïda es realitzarà mitjançant els ascensors destinats a l'ús d'aquestes persones, comentats anteriorment.

4.2.3 Càlcul d'evacuació segons NFPA-130 d'una estació tipus L9

El temps d'evacuació pel recorregut més llarg es defineix, com la suma dels temps de recorregut a peu i els d'espera a cada un dels trams.

S'estableixen segons [6] 1,5 min com al temps des què es produeix l'incendi, fins que el tren arriba a l'andana i comença l'evacuació dels passatgers.

- **Hipòtesis bàsiques**

Nombre de persones

$P1 + P2 = 975$ Persones al tren (segons dades del fabricant)

$1 \times (975 \text{ Pers.}) + 0,3 \times 975 \text{ Pers.} = 1268$ Persones per andana

Es considera que al mateix temps, a l'altra andana arriba el tren amb 975 persones, i a l'andana hi ha $0,3 \times 975$ persones esperant.

Pel càlcul d'evacuació de l'estació es tindrà en compte un total de $1268 \text{ Pers.} \times 2 =$ **2.536 Pers.**

- **Hipòtesis segons la NFPA 130**

Velocitat de fugida

a) a l'andana: 0,63 m/s

b) als vestíbuls i en superfície: 1 m/s

c) velocitat vertical (ascens) de les persones emprant escales: 0,25 m/s

Capacitat

Es preveuen les següents capacitats:

- a) Escala fixa (ascens): 55 persones per minut i 1 m d'amplada
- b) Escala mecànica parada (ascens): 55 persones per minut i 1 m d'amplada
- c) En passos de portes: 89 persones per minut i 1 m d'amplada
- d) A l'andana: 82 persones per minut i 1 m d'amplada.

Escales mecàniques

- a) Escales mecàniques parades són considerades com vies de fugida
- b) Les escales mecàniques en funcionament en la direcció de l'evacuació poden quedar en funcionament mentre el subministre d'electricitat estigui intacte.
- c) Les escales mecàniques en funcionament en contra de la direcció d'evacuació s'han de detenir immediatament amb l'activació de l'alarma.
- d) Pel càlcul d'evacuació se suposa que totes les escales mecàniques (també les que funcionen en direcció de l'evacuació) estan parades (factor de seguretat). A la pràctica es recomana deixar en funcionament les escales mecàniques en direcció de l'evacuació el major temps possible, per facilitar l'evacuació en general, i en concret la d'aquelles persones amb majors dificultats (d'edat avançada per exemple).

- **Altres hipòtesis**

Pels càlculs d'evacuació, s'han de considerar també les següents hipòtesis:

- a) Els ascensors no poden ser utilitzats en cas d'incendi, pel que conseqüentment no es tenen en compte en el càlcul de l'evacuació segons [6].
- b) Les persones que es trobin en el pou de l'estació, es troben temporalment en un lloc lliure de fum ja que la ventilació del pou està dissenyada per impedir l'entrada de gasos d'incendi al pou segons [6].

a) **Escenari 1: Estació amb ascensors i 50 metres de fondària.**

Segons estableix [6], es pressuposa un tren de cinc vagons que entra incendiats en un dels nivells de l'estació tipus L9 que disposa d'una bateria d'ascensors de gran capacitat. Cal recordar que en aquest escenari, els **ascensors no es troben disponibles per a evacuació**.

El temps del trajecte del tren des de l'inici de l'incendi fins l'entrada a l'estació és de 1,5 minuts segons [6]. Durant el trajecte a l'estació s'informa als viatgers per a que immediatament després de que el tren pari a l'estació (1,5 minuts després de l'inici de l'incendi) puguin sortir del tren i iniciar la fugida cap a l'exterior.

Les persones en el pou de l'estació poden esperar davant de les portes que permeten l'accés a les escales fixes d'evacuació des del pou, sense exposar-se als gasos de l'incendi, ja que la instal·lació de ventilació impedeix que el fum passi de la zona de l'andana al pou.

Les persones que escapen de l'andana superior a les escales en el pou de l'estació, poden romandre fora de perill en el pou a una superfície aproximada de 100 m², sense tenir en compte la superfície davant i darrera dels ascensors com a superfície d'espera. En una superfície de 100 m² i una densitat de persones de 4 Pers./m² poden romandre aproximadament **400 persones**.

Temps necessari per a l'evacuació

El temps necessari per a l'evacuació es calcula per mitjà de la suma dels temps de pas i d'espera. Els temps d'espera es calculen a partir dels temps necessaris per travessar els elements reductors de secció de pas.

El temps de pas en aquests elements reductors de secció, es determina amb la divisió del nombre de persones que l'han de passar, entre la capacitat d'aquest element segons els rangs indicats a l'apartat d'hipòtesis segons [7].

N'hi ha una quantitat de persones provinents de l'andana superior ($\Delta P_{\text{nivell1}}$)²⁹, que passen a l'escala sense problemes d'interferència amb les persones que evacuen des de l'andana inferior, ja que el camí de fugida des de l'andana superior és més curt que des de l'andana inferior. Aproximadament 0,5 minuts més tard s'uneixen les persones provinents de l'andana inferior a la zona de l'escala on s'intersequen amb les persones que evacuen el nivell superior.

En aquests primers 0,5 minuts hi ha un nombre de persones (0,5 min x 165 pers./min = 82) del flux de persones del nivell superior, que poden passar sense problemes a l'escala fixa d'evacuació. A partir d'aquest moment travessen ambdós grups l'escala ($P_{\text{nivell1}}^{30} - \Delta P_{\text{nivell1}}$) i P_{nivell2}^{31} a parts iguals.

29 $\Delta P_{\text{nivell1}}$: Quantitat de persones provinents de l'andana superior, que passen a l'escala sense problemes d'interferència amb les persones que evacuen des de l'andana inferior.

30 P_{nivell1} : Número de persones que evacuen des de l'andana superior.

31 P_{nivell2} : Número de persones que evacuen des de l'andana inferior.

No es tenen en compte les capacitats de les portes davant de les primeres escales fixes, quan les escales que es troben a continuació, tenen una capacitat menor que la de les portes.

Des de l'andana superior i tenint en compte la superfície d'espera segura al pou,

$$P_{nivell1} - \Delta P_{nivell1} - P_{Sector Pou}^{32} = 1268 \text{ pers} - 82 \text{ pers} - 400 \text{ pers} = 786 \text{ Persones.}$$

El número màxim de persones que es troben evacuant a la vegada per escales és de $786 + P_{nivell2} (1.268) = 2.054$ persones.

Evacuació de l'andana superior

S'indica el temps d'evacuació de l'andana superior. Aquest és el temps que triguen totes les persones a arribar a una zona temporalment lliure de fum. Aquesta zona es troba darrera de les portes de l'andana al pou de l'estació. El temps d'evacuació per l'andana superior és de **7' 34"** (veure Taula 12) D'acord amb [4], l'estació s'hauria d'evacuar amb menys de 6 minuts. De fet no s'ha considerat l'efecte de les sales de confinament d'extrem d'andana, també considerades zona segura, fet pel qual, el temps d'evacuació d'andana fins a zona segura disminuiria considerablement.

Temps d'evacuació	Càlculs	Duració de fase
Temps des de inici d'incendi fins començament d'evacuació (inclou temps de trajecte fins que el tren entra a l'estació).		1' 30"
Temps d'arribada d'andana a portes de connexió amb el pou (T1).	$T1 = 50 \text{ m d'andana} / 0.63 \text{ m/s}$ $T1 = 79.3 \text{ s} = 1' 19"$	1' 19"
Temps d'espera en elements que redueixen el caudal de pas. *) Retenció de 400 p en zona de pou, 82 p que accedeixen a escala sense intersecció amb evac. d'andana inferior, i les 1268p de ocupació de l'andana inferior	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Tp), sense retenció en pou. $Tp = 1.268 \text{ p} / (89 \text{ p/min} \cdot \text{m}) \times 6.7 \text{ m}$ $Tp = 2.12 \text{ min} = 2' 07"$	2' 07"
	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Te1), tenint en compte la retenció davant escales de pou. $Te1 = Te - T1 = 6' 04" - 1' 19"$ $Te1 = 4' 45"$ Nº p que es troben en escala a nivell d'andana superior: *) $(1.268 - 82 - 400) + 1.268 = 2.054$ Temps de pas a escales: $Te = 5' 34" + 30" = 6' 04"$ $2.054 / (55 \text{ p/m/min} \times 6.7 \text{ m}) = 5' 34"$ Temps de pas de 82 p per escala sense interferir amb nivell inferior = $0.5' = 30"$	4' 45"
Temps d'evacuació de l'andana superior (T evac. andana sup.) = 1' 30" + T1 + max(Tp; Te1)		7' 34"

Taula 12 Temps d'evacuació d'andana. Font: Auding [6]

32 PSector Pou: Persones que romanen a zona segura del pou.

Evacuació de l'estació

El temps d'evacuació de l'estació, és el temps que transcorre fins que la última persona arriba a la superfície a 10 m de distància de la sortida segons [7]. Per a l'evacuació de l'estació completa fins l'exterior el temps es de **22' 11"** (veure Taula 13

Temps d'evacuació	Càlculs	Duració de fase
Temps des de inici d'incendi fins començament d'evacuació (inclou temps de trajecte fins que el tren entra a l'estació).		1' 30"
Temps de recorregut de les persones des de l'andana inferior a superfície.	Temps d'arribada, d'andana a portes de connexió amb el pou (T1). T1 = 50 m d'andana / 0.63 m/s T1 = 79.3 s = <u>1' 19"</u>	1' 19"
	Temps de recorregut en escala des d'andana inferior a superfície (T2). T2 = 53 m / 0.25 m/s T2 = 212 s = <u>3' 31"</u>	3' 31"
	Temps de pas en replans d'escalas (T3) T3 = 116 m / 1m/s T3 = 116 s = <u>1' 56"</u>	1' 56"
	Temps de recorregut pla fins 10 m de la superfície (T4). T4 = 20 m / 1m/s T4 = 20 s = <u>20"</u>	20"
Temps d'espera en elements que redueixen el caudal de pas *) Retenció de 400 p en zona de pou, 82 p que accedeixen a escala sense intersecció amb evac. d'andana inferior, i les 1268p de ocupació de l'andana inferior	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Te1), sense retenció en pou. Te1 = T pas porta andana - T1 Te1 = 2' 07" - 1' 19" = <u>0' 48"</u> T pas porta andana = 1268 p / (89 p/min/m x 6.7m) T pas porta andana = <u>2' 07"</u>	0' 48"
	Temps d'espera davant escalas de pou en andana inferior (Te2), sense retenció en pou. Te2 = Tpas escala - Tpas porta andana Te2 = 6' 24" - 2' 07" = <u>4' 17"</u> Tpas escala = 1268p / (2x55p/min/m x 1.8 m) Tpas escala = 6.40 min = <u>6' 24"</u>	4' 17"
	Temps d'espera davant escala d'andana superior (Te3), tenint en compte la retenció davant escalas de pou Te3 = Tpas escala (7.81m) - max (Te1:Te2) Te3 = 10' 52" - 4' 17" = <u>6' 35"</u> Nºp que es troben en escala a nivell d'andana superior: *) (1268 - 82 - 400) + 1268 = 2.054p Temps de pas escala (7,81m): Tpe (7.81) = 10' 22" + 30" = <u>10' 52"</u> 2.054 / (55p/m/min x 3.6m) = 10.37' = <u>10' 22"</u> Temps de pas de 82p per escala sense interferir amb nivell inferior = 0,5' = <u>30"</u>	6' 35"
	Temps d'espera en escalas del nivell 7.81 m al nivell 41.72 m (Te4) Te4 = Tpas escala (7.81m a 41.72m) - max(6'35":10'52") Te4 = 12'48" - 10' 52" = <u>1' 56"</u> Tpas escala = 2536p / (3.6x55p/min) = 12.80' = <u>12' 48"</u>	1' 56"
	Temps d'espera en escalas del nivell 41.72m a 49.15m, (Te5) Te5 = Tpas escala (41.72m a 49.15m) - max(anteriors restriccions de pas) Te5 = 12' 48" - 13' 20" = 0 Tpas escla (41.72m a 49.15m) = 2536p / (55m p/min x 3.6m) = 12.8 min = <u>12' 48"</u>	0
	Temps d'espera en escalas del nivell 49.15m a superfície (Te6) Te6 = Tpas escala (41.72m a 49.15m) - max(anteriors restriccions de pas) Te6 = 7' 18" - 13' = 0	0
Temps d'evacuació de l'andana inferior a superfície (T evac. estació) = 1' 30" + T1 + T2 + T3 + T4 + Te1 + Te2 + Te3 + Te4 + Te5 + Te6		22' 11"

Taula 13 Temps d'evacuació estació amb ascensors. Font: Auding [6]

ESCENARI 2 estació amb escales mecàniques i 50 metres de fondària

Es pressuposa un tren de cinc vagons que entra incendiats en un dels nivells de l'estació tipus amb escales mecàniques.

El temps del trajecte del tren des de l'inici de l'incendi fins l'entrada a l'estació és de 1,5 minuts. En el trajecte a l'estació s'informa als viatgers per que immediatament després de que el tren pari a l'estació (1,5 minuts després de l'inici de l'incendi) puguin sortir del tren i iniciar la fugida cap a l'exterior.

Les persones en el pou de l'estació poden esperar davant de les portes que permetin l'accés a les escales fixes d'evacuació des del pou, sense exposar-se als gasos d'incendi, ja que la instal·lació de ventilació impedeix el seu pas de la zona de l'andana al pou. Les persones que escapen de l'andana superior a les escales en el pou de l'estació, puguin romandre segurs en el pou en una superfície d'aproximadament $2 \times 35 \text{ m}^2$, sense tenir en compte la superfície davant i darrera dels ascensors com superfície d'espera. En una superfície de 70 m^2 i una densitat de persones de 4 Pers./m^2 poden romandre aproximadament 280 persones, menys capacitat que a una estació amb ascensors.

A efecte d'evacuació, les escales mecàniques s'han de considerar fixes segons [7].

Temps necessari per a l'evacuació

El temps necessari per a l'evacuació es calcula per mitjà de la suma dels temps de pas i d'espera. Els temps d'espera es calculen a partir dels temps necessaris per passar els elements reductors de secció de pas.

El temps de pas en aquests elements reductors de secció, es determina dividint el nombre de persones que han de travessar-lo, entre la capacitat d'aquest element segons els rangs indicats a l'apartat "d'Hipòtesis segons [7].

Hi ha una quantitat de persones provinents de l'andana superior ($\Delta P_{\text{nivell1}}$), que accedeixen a les escales fixes i mecàniques sense problemes d'interferència amb les persones que evacuen des de l'andana inferior, ja que el camí de fugida des de l'andana superior és més curt que des de l'andana inferior.

Aproximadament 0,5 minuts més tard les persones provinents de l'andana inferior arriben a la zona de les escales, on es troben amb les persones que evacuen el nivell superior.

En aquests primers 0,5 minuts hi ha un nombre de persones ($0,5 \text{ min} \times 7,4 \text{ m} \times 55 \text{ pers./min/m} = 203 \text{ p}$) del flux de persones del nivell superior, que poden passar sense problemes per les escales fixes i mecàniques d'evacuació. A partir d'aquest moment ambdós grups passen per les escales d'evacuació ($P_{\text{nivell1}} - \Delta P_{\text{nivell1}}$) i P_{nivell2} , en diferent distribució debut a la consideració que una escala mecànica es trobi fora de funcionament:

- 1 Escala fixa + 2 Escales mecàniques: 115
- 1 Escala fixa + 1 Escales mecàniques: 88

Des de l'andana superior i tenint en compte la superfície d'espera segura en el pou,

$P_{nivell1} - \Delta P_{nivell1} - P_{Sector Pou} = 1268 \text{ pers} - 203 \text{ pers} - 280 \text{ pers} = 785 \text{ Persones}$.

El nombre màxim de persones que es troben evacuant a la vegada per escales és de $785 + P_{nivell2} (1.268) = 2.053 \text{ p}$.

Evacuació de l'andana superior

S'indica el temps d'evacuació de l'andana superior. Aquest és els temps que triguen totes les persones en arribar a una zona temporalment lliure de fum. Aquesta zona es troba darrera de les portes de l'andana al pou de l'estació. El temps d'evacuació per a l'andana superior és de 7' 54" (Taula 1).

Temps d'evacuació	Càlculs	Duració de fase
Temps des de inici d'incendi fins començament d'evacuació (inclou temps de trajecte fins que el tren entra a l'estació)		1' 30"
Temps d'arribada d'andana a portes de connexió amb el pou (T1).	Temps d'arribada d'andana a portes de connexió amb el pou (T1) $T1=40\text{m d'andana a porta de pou}/0.63 \text{ m/s}$ $T1 = 63'' = \underline{1'03''}$	1' 03"
Temps d'espera en elements que redueixen el caudal de pas. *) Retenció de 140p+140p en zona de pou, 192p que accedeixen a escala sense intersecció amb evac. d'andana inferior, i les 1268p de ocupació de l'andana inferior	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Te1), sense retenció en pou. $Te1_1 = T_{pas \text{ porta}} (T_p) - T1$ $Te1_1 = 1'58'' - 1'03'' = 55''$ $T_p = 1268P / (89P/\text{min}/m \times 7.2\text{m})$ $T_p = 1.97 \text{ min} = 1'58''$	55"
	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Te2), tenint en compte la retenció davant escales de pou. $Te1_2 = T_{pas \text{ escala}} (T_{pe}) - T1 = 6' 24' - 1' 03''$ $Te1 = \underline{5' 21''}$ N° persones que es troben a la zona de pou amb les escales mecàniques: *) $(634-88-140) + 634 = 1.040\text{p}$ Temps total de pas per escales: $T_{pe \text{ total}} = 5'54'' + 30'' = 6'24''$ $1.040 / (55\text{p}/\text{m}/\text{mx}(1\text{mx}1 + 2.2\text{mx}1)) = 5'54''$ Temps de pas de 88p per escala sense interferir amb nivell inferior	5 21"
Temps d'evacuació de l'andana superior (T evac. andana sup.) = 1' 30" + T1 + max(Te1₁; Te1₂)		7' 54"

Taula 14 Temps d'evacuació d'andana. Font: Auding [6]

Evacuació de l'estació

El temps d'evacuació de l'estació, és el temps que transcorre fins que la última persona arriba a la superfície a 10 m de distancia de la sortida. Per a l'evacuació de l'estació completa fins l'exterior el temps és de 16' 29" (Taula 2).

Temps d'evacuació	Càlculs	Duració de fase
Temps des de inici d'incendi fins començament d'evacuació (inclou temps de trajecte fins que el tren entra a l'estació).		1' 30"
Temps de recorregut de les persones des de l'andana inferior a superfície.	Temps d'arribada, d'andana a portes de connexió amb el pou (T1). T1 = 50 m d'andana / 0.63 m/s T1 = 79.3 s = <u>1' 03"</u>	1' 03"
	Temps de recorregut en escala des d'andana inferior a superfície (T2). T2= 51 m/ 0.25 m/s T2 = 204 s = <u>3' 24"</u>	3' 24"
	Temps de pas en replans d'escalas (T3) T3 = 30x4 m T3 = 120 s = <u>2'</u>	2'
	Temps de recorregut pla fins 10 m de la superfície (T4). T4 = 30 m /1m/s T4 = 30 s = <u>30"</u>	30"
Temps d'espera en elements que redueixen el caudal de pas *) Retenció de 400 p en zona de pou, 82 p que accedeixen a escala sense intersecció amb evac. d'andana inferior, i les 1268p de ocupació de l'andana inferior	Temps d'espera en andana davant portes de connexió amb pou (Te1), sense retenció en pou. Te1 = T pas porta andana – T1 Te1 = 1' 58" – 1' 03" = <u>1' 55"</u> T pas porta andana = 1268 p / (89 p/min/m x 7.2m) T pas porta andana = <u>1' 58"</u>	1' 55"
	Temps més desfavorable d'espera davant escales de pou a andana inferior (Te2), sense retenció en pou. Te2 = Tpas escala – Tpas porta andana Te2 = 3' 36" – 1' 58" = <u>1' 38"</u>	1' 38"
	Temps d'espera davant escala d'andana superior (Te3), tenint en compte la retenció davant escales de pou. Te3=10' 52" – 4' 17" = <u>6' 35"</u> Nºp que es troben en escala a nivell d'andana superior: *) (634 -88 -140) + 634 = 1.040p Temps total de pas escala: Tpe total = 5' 54" + 30" = <u>6' 24"</u> 1.040 / (55/p/m/min x 1mx1+2.2mx1) = 5'54" Temps de pas de 82p per escala sense interferir amb nivell inferior = 0,5' = 30"	4' 29"
Temps d'evacuació de l'andana inferior a superfície (T evac. estació) = 1' 30" + T1 + T2 +T3 + T4 +Te1+Te2+Te3		16' 29"

Taula 15 Temps d'evacuació estació amb escales mecàniques. Font: Auding [6]

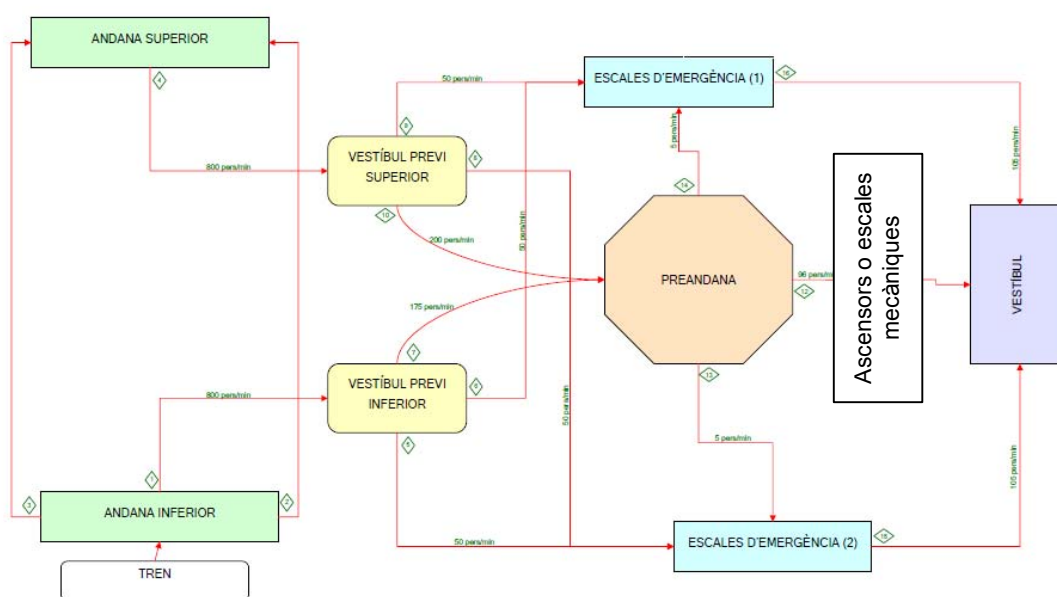


Figura 61 Esquema evacuació estació tipus L9. Font: Auding

Tal i com podem comprovar, per una estació de 50 metres de fondària, després d'aplicar el procediment que suggereix [7], observem que l'estació equipada amb escales mecàniques, és més ràpida d'evacuar en cas d'emergència que no pas l'estació amb ascensors. Això es deu en gran part perquè s'amplien els passos disponibles (recordem que les escales mecàniques treballen com fixes) i es guanya amb capacitat d'evacuació.

Això es correspon amb els resultats obtinguts a l'apartat de transport vertical (veure Figura 31), on a partir dels 40 metres era convenient equipar les estacions amb escales mecàniques.

Malgrat això, aquests resultats no són els únics a tenir en compte. També cal indicar que factors com la demanda en hores punta i vall, així com la probabilitat de tenir esdeveniments esportius o culturals de fort impacte social (atreuen molta gent), poden influir en la decisió final. Això es deu a que puntualment estacions situades a zones de poca demanda són escenari d'esdeveniments que concentren elevats nombres d'assistents, per la qual cosa les necessitats d'evacuació són molt superiors a les capacitats inicialment previstes i conseqüentment col·lapsant el sistema.

4.3 SISTEMA DE VENTILACIÓ

El sistema de ventilació, com ja es va comentar a l'apartat 2.2.1 del present document, és cabdal per garantir condicions de salubritat al sistema subterrani i per al control d'incendis dins del propi sistema.

El present apartat té com objecte establir les condicions generals que ha de complir els sistema de ventilació de la línia 9 de metro de Barcelona, per tal de facilitar l'evacuació dels passatgers i els empleats i l'actuació dels serveis d'intervenció, en cas d'emergència.

Cal recalcar que no existeix un projecte global de ventilació, i per tant el disseny és objecte dels projectes d'obra civil associats a cada tram de la infraestructura.

4.3.1 Documentació de referència

Per poder establir aquestes condicions del sistema de ventilació, en situació d'emergència, utilitzem com a base de partida la següent documentació:

Com a documents de referència citem [4], [6], [7], [8], [9] i [10].

4.3.2 Criteris de disseny generals dels sistemes de ventilació a L9

a) Esquema de funcionament general

Les estacions de la línia 9 tenen dos parts diferenciades des del punt de vista de la ventilació: el vestíbul i les andanes

Aquests dos sistemes poden compartir els circuits de retorn d'aire. El vestíbul es ventila amb l'aportació que proporciona l'entrada a l'estació. Cada estació és un sistema propi. Tot l'aire que entra a l'estació surt per l'estació.

Les sales tècniques que per les seves característiques necessiten ser climatitzades aportaran l'aire calent generat contra el circuit d'extracció d'aire. La Figura 62 mostra l'esquema de funcionament de la ventilació en una estació de tipus pou. La descripció del circuit complet és aquesta a partir de [6]:

- 1.- L'aire entra per la **reixa d'admissió** d'aire per aspiració i arriba a 2
- 2.- **Plènum de distribució** d'aire a estació. Des d'aquí es porta aire a tots els espais de l'estació.
- 3.- L'aire passa per:
 - a.-**Transport vertical** d'aire. Porta l'aire des del plènum de sota vestíbul fins al plènum de sota les andanes.
 - b.-**Impulsió dins del pou**. Impulsa aire des de la part superior del pou per renovar l'aire del mateix i crear un corrent d'aire cap a les andanes.

c.-**Impulsió de sobrepressió de les escales d'emergència.** Provenent del conducte de transport vertical, es genera un corrent d'aire cap a la preandana. En cas d'emergència, ha de garantir **0.5 m/s** a l'entrada de les escales d'emergència segons [7], per impedir l'entrada de fums a les mateixes.

d.-**Preandanes:** Recull la impulsió del pou i de les escales d'emergència i té un corrent d'aire constant que va sempre en el sentit del pou cap a les andanes. La velocitat en explotació diària ha de ser segons [7], aproximadament **1 m/s** mentre que en emergència el valor ha de ser **3 m/s**.

4.- **Plènum sota estació.** Aquí va a parar tot l'aire que envia el plènum de distribució que no es fa servi pel pou o escales d'emergència. Des de aquí es ventilen les dues andanes, i les dependències laterals de canvi de nivell d'andana i de confinament.

5.- **Ventilació d'andanes.** L'aire provinent del plènum s'injecta per conduccions a les andanes per sota del bancs, i es recull pel sostre. Tot l'aire que s'injecta a l'estació es recull pel sostre de les andanes. A les sales de confinament, en cas d'emergència, s'estableix una sobrepressió per impedir el pas de fums.

6.- Tot l'aire de l'estació recollit a 5, es transporta per un **plènum vertical** similar al de transport d'aire fresc fins a sota vestíbul, des de on s'impulsa cap a la reixa d'extracció d'aire.

7.- **Reixa d'extracció d'aire.** Treu l'aire de retorn de l'estació cap a l'exterior.

8.- Les sales tècniques amb climatització aboquen el seu aire calent contra el plènum de retorn d'aire.

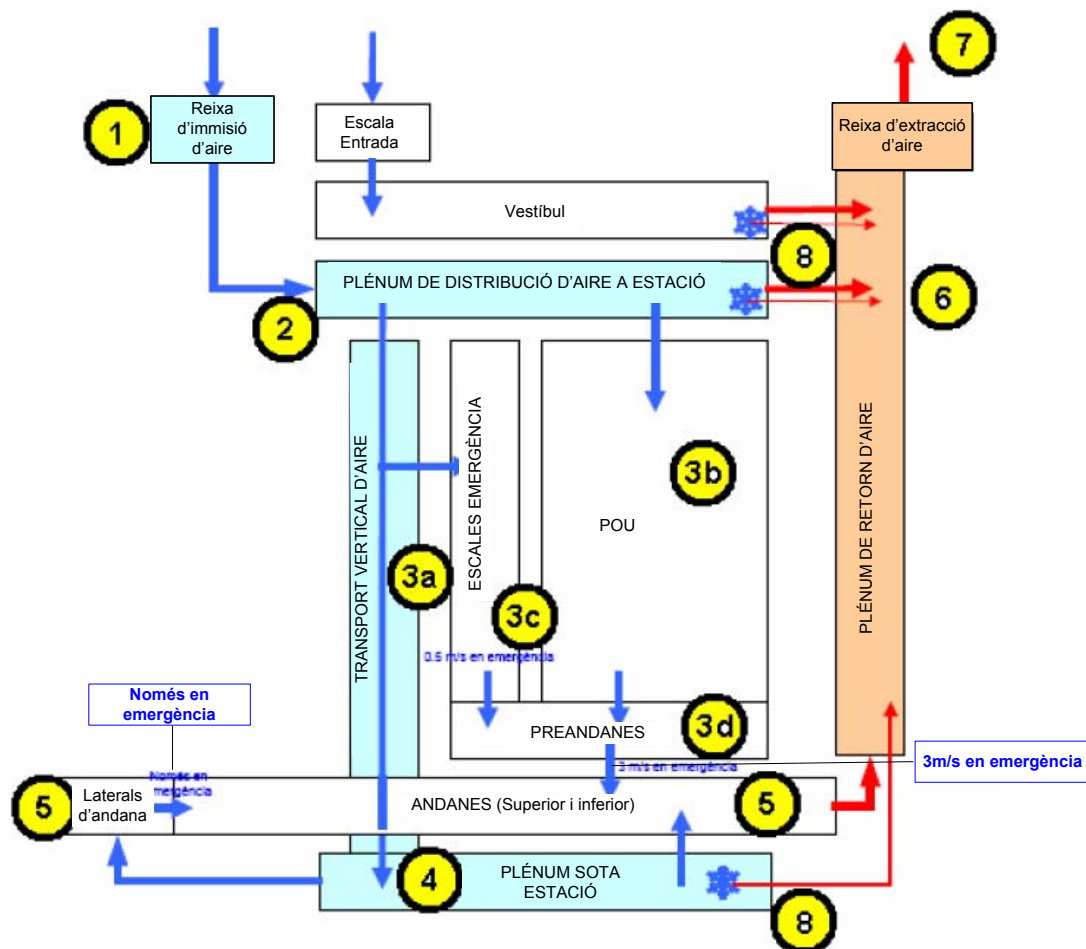


Figura 62 Esquema de ventilació estació tipus L9. Font: Elaboració pròpia

b) **Riscos a cobrir amb el sistema de ventilació**

La circulació de fums o gasos tòxics a l'interior de la infraestructura i en particular a les rutes d'evacuació.

- Forta **concentració de fums** en túnels i estacions soterrades en molt poc volum en curts períodes de temps.
- Les **condicions de l'ambient** no són les adequades per l'explotació de l'infraestructura

c) **Caracterització de l'ambient**

Els sistemes de ventilació hauran de garantir que l'aire compleix amb uns determinats paràmetres de temperatura, concentració de gasos i visibilitat durant l'evacuació a l'interior de la infraestructura (veure Taula 16).

Paràmetre	Confort	Emergència
-----------	---------	------------

Temperatura de l'aire (màxima)	<35°C	<60°C
Contingut O ₂	Igual a exterior	<14%
Contingut de CO	50 ppm	<200 ppm
CO ₂ en ambient	Igual a exterior	10 metres
Visibilitat mínima sense fums durant evacuació	Igual a exterior	10 metres
Alçada lliure de fums durant l'evacuació	Igual a exterior	2,5 metres
Velocitat d'aire en túnel (màxim)	10 m/s	Sense limitació

Taula 16 Caracterització de l'ambient. Font:[6]

Les condicions de l'aire especificades per l'emergència s'han de mantenir en aquestes condicions al menys durant tot el temps que dura l'emergència.

d) Caracterització de l' incendi

Els sistemes de ventilació hauran de poder fer front a un incendi (controlar els fums) com el que es caracteritza a continuació (veure Taula 17).

El treball realitzat defineix com pitjor tipus d'incendi possible el que es descriu en aquest apartat.

Paràmetre	Valor
Valor calorífic	20473 KJ/kg
Potencial de fum	0.306 m ² /s
Producció de fum	0.123 g/m ³
Producció de CO	0.045 g/m ³
Producció de CO ₂	1.342 g/m ³

Taula 17 Caracterització de l'incendi. Font: [6]

La **càrrega d'ignició** per iniciar el foc emprada és de **190 MJ**, equivalent a una llauna de benzina de 5 litres.

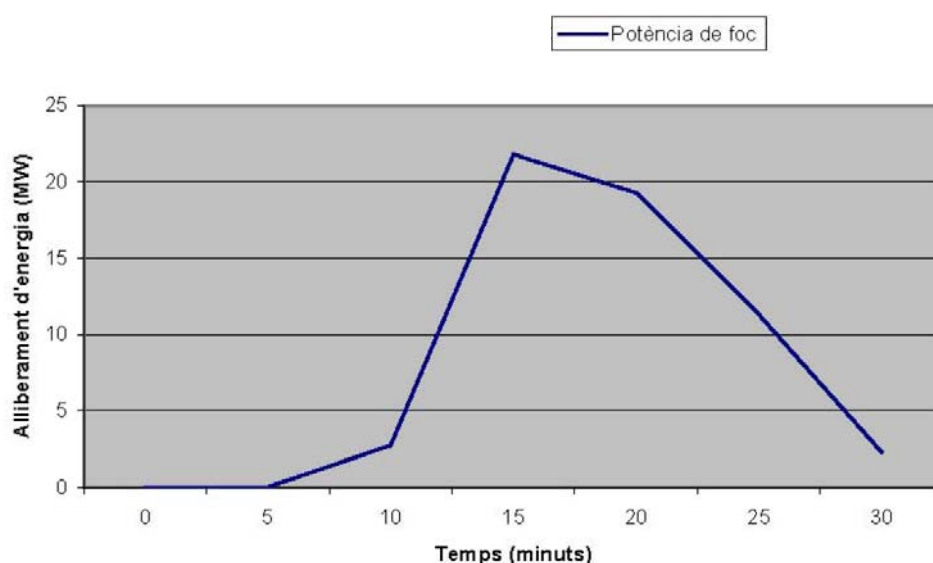


Figura 63 Corba de d'incendi tipus München. Font: Auding 2007

Hipòtesi d'incendi:

- La **ubicació de l'incendi** a l'estació serà la que més dificultat presenti per l'evacuació. Usualment serà dins del tren aturat a andana, davant de la sortida principal de l'estació.
- En cas d'**intercanviadors**, caldrà establir hipòtesis d'incendi que afectin simultàniament a ambdues estacions.
- Aquelles **ubicacions** que per la geometria **de l'estació** i que d'acord entre els projectistes i els responsables de l'administració acordin.
- **Tren aturat en túnel**, seleccionant el punt del traçat més desfavorable.

Altres paràmetres d'entrada a tenir en compte per la simulació

- Les finestres del tren incendiats es trenquen a 200 °
- Les portes d'andana es comporten com segueix:
- Els vidres de les portes aguanten 200° C durant 15 minuts
- Els vidres de sobre les portes aguanten 400° durant 15 minuts
- El temps d'evacuació de l'andana afectada (o tram de túnel) seguint la hipòtesis anterior.

Aquest temps pot provenir del projecte d'evacuació o es pot calcular directament seguint la metodologia de la NFPA 130:2007-10-17.

Validació del model de ventilació emprat.

La solució de ventilació adoptada s'ha validat a través de models numèrics, amb programes de càlcul CFD en el cas de les estacions i amb models lineals per túnels.

El model quedarà validat si amb les hipòtesis d'ubicació de l'incendi anteriorment exposades i els paràmetres d'entrada que s'especifiquen per la ignició i desenvolupament del mateix, els paràmetres d'ambient en cas d'emergència es mantenen dins dels límits admissibles durant el temps calculat per l'evacuació més 1 minut.

A més a més s'han realitzat proves del sistema de ventilació, per tal de garantir que amb la solució adoptada s'assolien els valors líndars a les seccions establertes (connexió andanes amb pou) prescrits per [7].

4.3.3 Criteris de disseny de ventilació d'estacions en emergència

1. La ventilació d'estacions ha de garantir que totes les rutes d'evacuació es mantenen sense fums en les condicions d'ambient tolerables al menys un minut més que el temps calculat per l'evacuació seguint la metodologia de [7].
2. En el cas de tren incendiats a estació, a les estacions de tipus pou, la ventilació ha de garantir velocitats de almenys 3 m/s des de l'entroncament de pou amb túnel i una velocitat d'aire suficient des de les sortides laterals com per confinar el fum a l'andana afectada i al túnel.
3. Les reixes de ventilació de les estacions han de poder proporcionar els cabals màxims dins de les estacions requerits per l'emergència.

4. Els nivells sonors generats pel sistema de ventilació a d'interior de les estacions ha de ser inferior als 95 dB a l'estació al llarg de les rutes d'evacuació.
5. En el cas de que l'estació sigui un intercanviador amb una altre línia i hi hagi un accés directe a una de les andanes, estem obligats a sectoritzar amb portes de manera que un incendi a la línia d'intercanvi no ens afecti.
6. A la resta de casos d'intercanviador, i depenent de com es fan els intercanvis, caldrà fer un estudi conjunt de la ventilació per veure l'afectació mútua.
7. No es poden crear recirculacions d'aire. Cal assegurar que les parets dels plènums, no presentin esquerdes, i que les canalitzacions son estanques.
 - Les ventilacions en túnel i estacions només es poden comunicar amb les portes d'andana obertes
 - Els circuits de circulació d'aire han d'impedir en tot cas que l'aire fresc i el fum es barregin.

4.3.4 Criteris de disseny de ventilació d'estacions en confort.

1. S'ha de garantir que la ventilació pugui evacuar la calor generada per totes les càrregues de calor comptabilitzades a una estació.
 - Passatgers
 - Il·luminació
 - Dependències tècniques
 - Interacció amb altres sistemes (túnel, climatització de trens, etc)
2. Les reixes de ventilació han de complir amb els requeriments que cada ajuntament imposa per les mateixes, tant a nivell de dimensions com de soroll generat durant el dia i la nit.
3. Els nivells sonors generats pel sistema de ventilació a l'interior de les estacions ha de ser inferior als 50 dB als llocs de transit de viatgers.
4. No es poden crear recirculacions d'aire. Les ventilacions de túnel i estacions només es poden comunicar amb les portes d'andanes.
 - Els circuits de circulació d'aire han d'impedir en tot cas que l'aire fresc i el fum es barregin.
5. Els locals tècnics que per necessitats de la seva funció han d'estar climatitzats, abocaran l'aire calent canalitzat cap al circuit de sortida d'aire.

4.3.5 Casos de funcionament de la ventilació

a) Ventilació de confort

A la Figura 64 es pot observar l'esquema de ventilació en mode confort amb els valors considerats a [9], per garantir els valors prescrits per la normativa.

ventilació confort

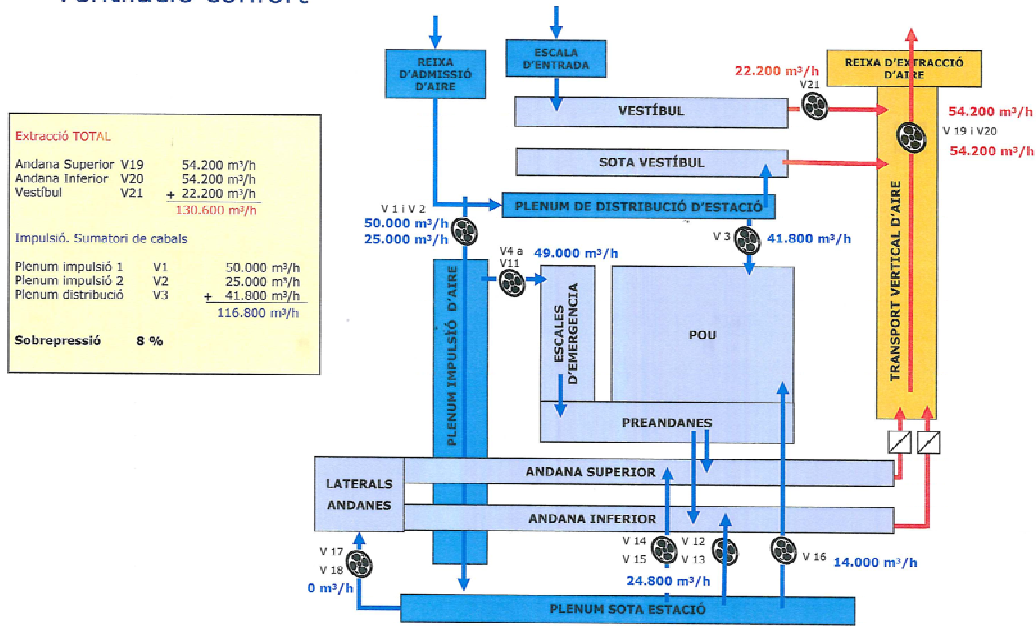


Figura 64 Esquema de funcionament ventilació en confort. Font: PaymaCotas 2007

b) **Ventilació d'emergència (Incident a l'andana inferior)**

Aquest cas suposa que un tren s'estigui cremant a l'andana inferior i s'hagi de contenir el fum a l'andana afectada. (Figura 65)

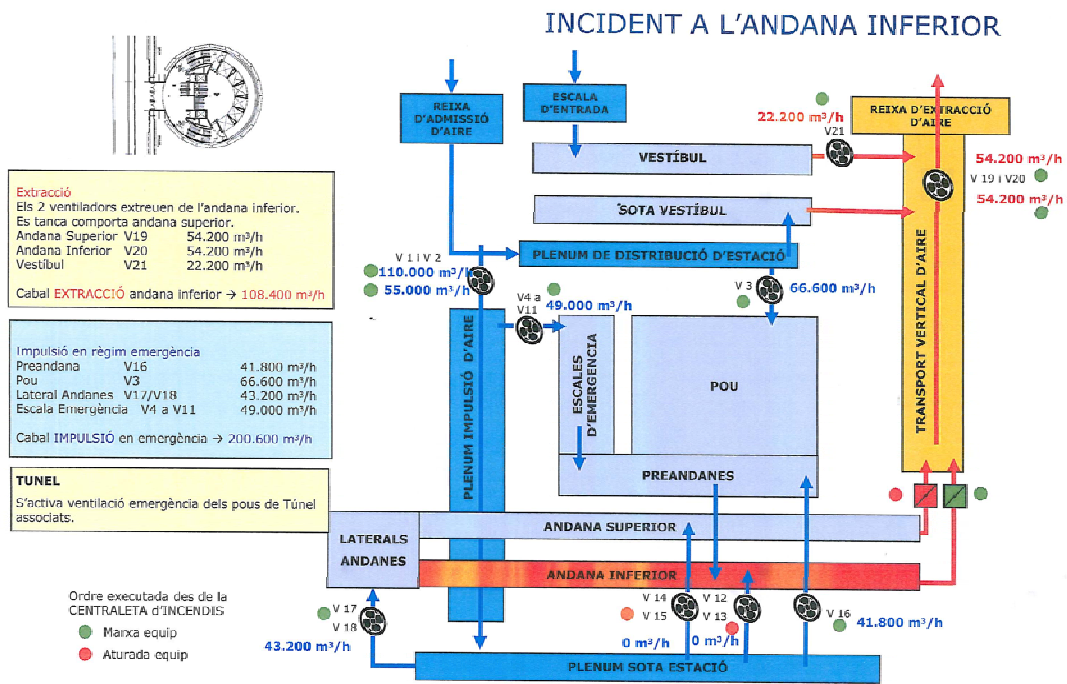


Figura 65 Esquema de funcionament ventilació amb incident a l'andana inferior. Font: PaymaCotas 2007

c) Ventilació d'emergència (Incident a l'andana superior)

Mateix cas que l'anterior però amb un tren incendiat a l'andana superior (Figura 66)

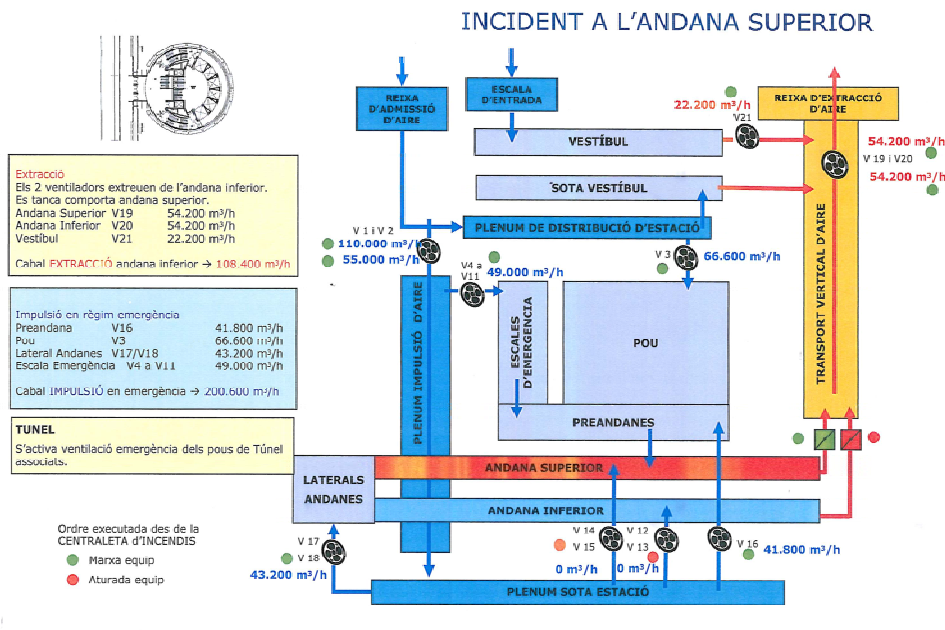


Figura 66 Esquema de funcionament ventilació amb incident a l'andana superior. Font: PaymaCotas 2007

d) Ventilació d'emergència (Incident al vestíbul d'estació)

En aquest cas, l'emergència la tenim per incendi al vestíbul de l'estació. L'esquema de la ens indica l'estratègia de ventilació per contenir l'incendi al vestíbul (Figura 67)

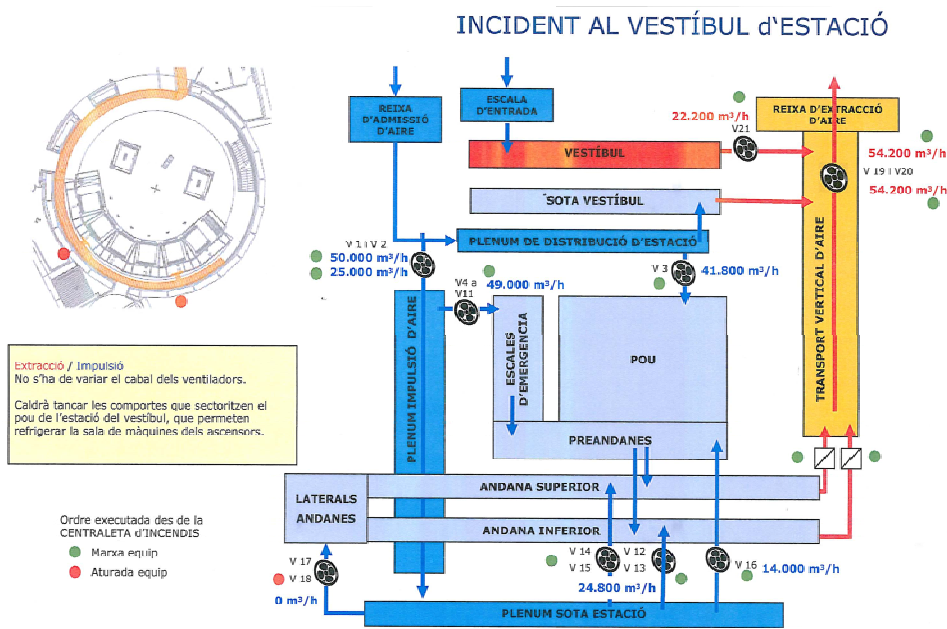


Figura 67 Esquema de funcionament ventilació amb incident al vestíbul. Font: PaymaCotas 2007

4.3.6 Conclusions del sistema de ventilació.

El sistema de ventilació, s'ha validat, com ja s'ha comentat anteriorment, en primer lloc mitjançant models numèrics recolzats en la normativa i documentació citada [4], [6], [7], [8], [9] i [10].

Igualment, el sistema s'ha sotmès a proves de camp mitjançant proves de contrast, observant que s'assoleixen els valors prescrits a les normes i recomanacions d'aplicació, quedant doncs aquest validat.

Igualment, donat que es tracta d'un sistema poc convencional (recordem que el sistema està inspirat en les clàssiques explotacions mineres) cal la continua verificació dels paràmetres prescrits, que han estat adoptats com a mesures de disseny, amb l'objecte de reafirmar que els valors de confort i en cas d'emergència es troben dins dels paràmetres establerts.

5 CONCLUSIONS

Les infraestructures soterrades, com s'ha vist en el present document, han anat prenent importància.

En l'àmbit de les infraestructures urbanes, que són l'objecte d'aquest estudi, l'augment de la fondària ha comportat canvis en els plantejaments de molts conceptes que fins ara s'acceptaven com a vàlids.

A nivell estatal, en l'àmbit ferroviari, no existeix una normativa d'obligat compliment en matèria de seguretat, fet pel qual les administracions competents s'acullen a normes o recomanacions d'altres àmbits per tal de garantir uns mínims de seguretat a les seves instal·lacions. A nivell nacional, l'Adif, pren com a referència la ISTF-2006, un esborrany del que serà una normativa d'obligat compliment. A nivell català, la Generalitat va editar un recull de recomanacions anomenades "Normes tècniques sobre seguretat contra incendis a la xarxa ferroviària soterrada de Catalunya" [4], fonamentades en la NFPA-130 i la norma espanyola NBE-CPI/9.

A més a més, es consideren altres normes, recomanacions i prescripcions d'altres àmbits, que per similitud ajuden a complementar un marc normatiu que garanteixi la seguretat en aquestes infraestructures soterrades.

Després d'analitzar les estacions de poca fondària, s'ha analitzat el canvi que suposa incrementar la fondària de les mateixes. Donat que es tracta d'un fenomen emergent en l'actualitat i que no hi ha gaires referents al món, s'ha pres com a model el projecte de la L9 del metro de Barcelona; una infraestructura exemple per representar el transport a gran profunditat.

Destaquem que entre molts altres aspectes, els temes d'evacuació i ventilació, mereixen especial atenció, donat que el fet d'aprofundir una estació, implica una reformulació dels criteris de disseny i explotació.

Comparant l'evacuació entre els dos tipus d'estacions (clàssiques i molt profundes), observem que el transport vertical és una de les peces clau durant l'explotació normal de la infraestructura. La fondària implica que el passatger roman més temps dins de la estació i per tant s'ha de facilitar una sortida àgil, minimitzant els temps de permanència. Les possibles solucions giren al voltant d'equipaments d'altres prestacions com són les escales mecàniques i els ascensors, però malgrat això, la solució no és trivial.

Un problema de la profunditat de les estacions és la evacuació en ascens per escales fixes. S'ha de tenir en compte el cansament de la persona, fet que fins ara no es contemplava a les estacions convencionals. Parlem de fondàries al voltant dels 80 metres, fet pel qual disposar d'espais que garanteixin seguretat, en cas d'esgotament del passatger són cabdals.

La fondària també afecta a la forma d'evacuació per túnel. Les sortides directes a carrer són econòmicament poc viables i la tendència creix cap a la construcció de túnels bi-tub o seccions tipus L9.

Les demandes associades a cada estació, així com la fondària, condicionada aquesta per altres factors, porta necessàriament a comparar i estudiar de forma específica cada cas per poder triar la solució de transport vertical idònia.

A partir de models lineals bàsics, valorant demandes i profunditats, s'ha arribat a definir unes regions, que sense ser molt precises, ens permeten valorar la idoneïtat d'un equipament o d'un altre (veure Figura 68)

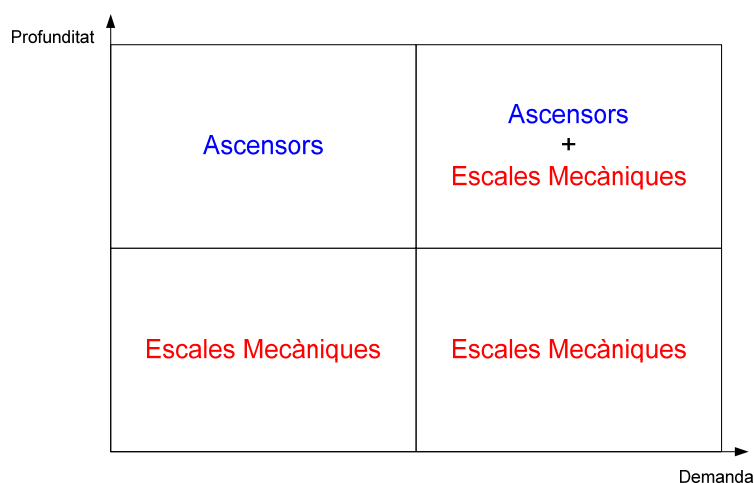


Figura 68 Esquema comparatiu Ascensors-Escales mecàniques, respecte el temps d'evacuació d'andana. Font: Estudi d'alternatives d'escales i ascensors. Sener 2007

El model de pou de la L9 amb ascensors, és una bona opció sempre i quan aquest equipament estigui dimensionat per a la evolució futura de la demanda de la estació. El problema, com s'ha pogut comprovar, radica en la sortida dels trens i l'acumulació de gent a les andanes pel fet d'esperar per poder embarcar als ascensors.

Pel cas d'estacions amb grans afluències de gent, el transport vertical amb escales mecàniques, malgrat de ser més lent pel global dels usuaris de la estació, elimina les aglomeracions a les andanes ocasionades per l'espera dels ascensors.

Per a triar el sistema de transport vertical, s'han de considerar moltes variables que determinen l'escenari a analitzar. Des de la geometria en alçat i planta, el recorregut, les prestacions de cada dispositiu elevador, la profunditat i la demanda entre d'altres. En el cas de la L9, els factors fonamentals son la geometria, la profunditat i la demanda, donada la configuració de la estació tipus L9.

Finalment els factors fonamentals seran la profunditat i la demanda, donat que la geometria ens marcarà el número màxim d'escales mecàniques així com el número d'ascensors que hi podem ubicar.

A nivell de ventilació, el model en estació convencional (a poca fondària) estava ben resolt mitjançant els pous a capçalera d'estació i els pous interestació. Aquest model s'ha comprovat amb l'experiència que funciona sempre i quan els equips siguin els adequats.

En el model d'estació profunda, i concretament en el de L9, el fet de portar l'aire fresc a tanta profunditat implica conduccions verticals amb molta pèrdua de càrrega. Això requereix d'equipar amb sistemes de ventilació molt potents, amb les necessitats geomètriques d'espai oportunes i els requeriments de silenciadors adients, o augmentar els cabals d'aire de les conduccions, a la vegada tenen majors pèrdues de càrrega per la elevada quantitat d'aire a moure.

Per tant juguen un factor important la geometria i la profunditat. Això requereix simulació numèrica i no són vàlids els models antics lineals o unidimensionals, que no permeten simular d'una manera realista els efectes dels girs de les conduccions d'aire. Igualment cal assumir elevats costos computacionals pel fet de no poder simplificar el comportament dels fluids. La majoria dels fluids són no lineals, fet que condiciona el tractament que se'n faci d'ells durant la seva simulació; el seu comportament és molt més complex que un fluxe laminar.

És doncs de suma importància el paper del projectista de l'obra civil, qui disposarà al disseny espais destinats al sistema de ventilació, d'acord amb els requeriments propis d'aplicar la normativa.

Igualment cal establir durant la fase de disseny, hipòtesis d'incendi viables, tot i que per càlcul probabilístic, tinguin poques possibilitats d'esdevenir. Aquestes estacions profundes, requereixen afinar molt la casuística d'emergències per poder treballar juntament amb la sectorització per tal de garantir les condicions de seguretat establertes.

Les grans dimensions del conjunt d'equips que treballen conjuntament al sistema de ventilació i detecció, impliquen disposar de telecomandaments, amb ordres i protocols ben establerts d'emergència, que en cas d'alarma, controlin d'una forma ràpida, segura i eficient els riscos derivats d'un incendi a qualsevol punt de l'estació. De la mateixa manera, es requereix uns criteris de disseny, així com una metodologia de validació del model proposat. És molt important la simulació numèrica, així com les proves de contrast realitzades a camp, un cop s'ha instal·lat el sistema.

Normativament, l'aspecte de la ventilació, a l'Estat espanyol, així com a la resta de països del món està força definida per a edificis en alçada. En el cas d'edificis profunds, la normativa no estableix clarament directrius, fet pel qual és necessari establir un espai de debat on les experiències d'infraestructures profundes serveixin per dissenyar una normativa comuna, clara i precisa que estableixi uns paràmetres que garanteixin la seguretat dels usuaris i treballadors d'aquests àmbits.

A mode de síntesi, fruit del treball d'aquesta tesina s'ha establert que:

- Hi ha un creixent interès per les infraestructures de transport a gran fondària
- Les infraestructures de transport a gran fondària són viables des del punt de vista funcional (accés i ventilació) però presenten aspectes singulars que en condicionen el disseny i l'explotació
- Entre els condicionants lligats a l'accés destaca el transport vertical i la seva mecanització (escales mecàniques o ascensors) s'ha establert que la decisió del tipus d'equipament a instal·lar no depèn exclusivament de la fondària sinó que s'hi ha d'incorporar la demanda (figura 68).
- No existeix una normativa específica a nivell Espanyol que contempli i reguli el cas particular d'estacions a gran profunditat.
- La L9 constitueix un exemple il·lustratiu d'infraestructura a gran fondària amb estacions equipades amb diferents tipologies de mecanització. S'ha constatat a nivell teòric la bondat de les solucions adoptades. Tanmateix, la posada en servei de les instal·lacions servirà per comprovar la funcionalitat i validar les hipòtesis adoptades a l'anàlisi.

6 FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ

El fi d'aquesta tesina no és fer una descripció únicament de la problemàtica associada a la fondària i veure quines solucions s'han adoptat. És important transcendir més enllà del document per poder observar que s'obre davant de nosaltres un camí que demana innovacions constructives, nous i millors criteris d'explotació i seguretat i que reclama cada cop amb més força la creació de marcs normatius unificats, basats en les experiències d'arreu del món, que garanteixin uns paràmetres mínims i fonamentals i matèria de seguretat.

Com a futures línies d'investigació, podem destacar que caldria analitzar la influència que la fondària té en la distribució de les estacions i dels seus punts d'accés, així com els dissenys de les mateixes.

És probable que calgui redefinir la regió de captació d'usuaris de Metro, si es valora un disseny com el de la Figura 69.

El model de pou amb la profunditat requereix d'un transport vertical molt ràpid i efectiu. En canvi amb galeries inclinades i escales mecàniques incorporades amb els replans preceptius d'acord amb els criteris normatius i de disseny dels equips.

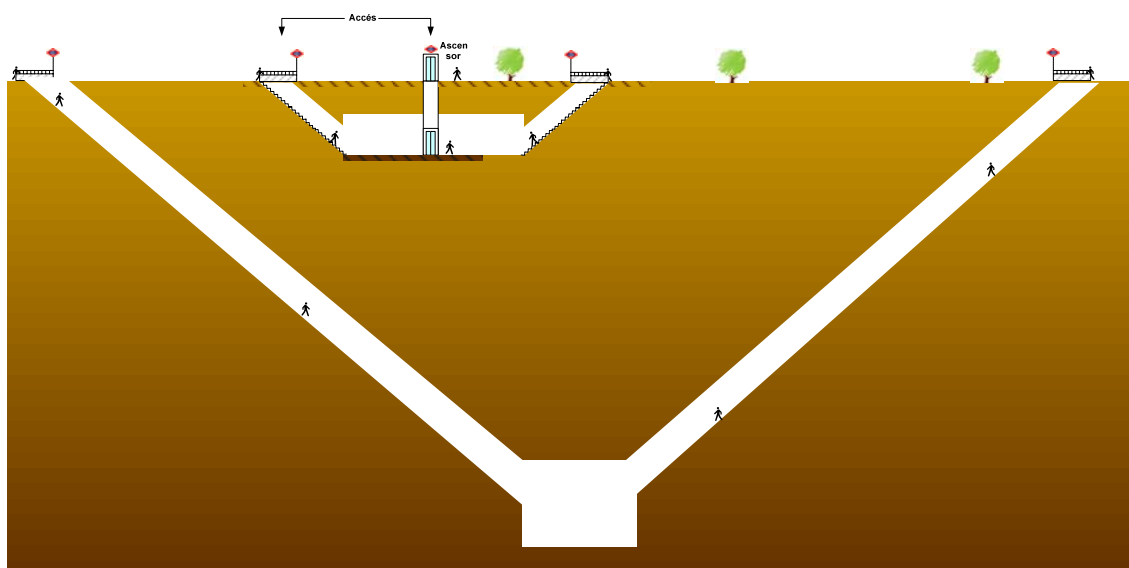


Figura 69 Esquema comparatiu de l'àrea de captació d'una estació de Metro a l'augmentar la fondària de l'estació

Igualment, la ventilació podria ser objecte d'un ampli estudi en el que analitzar les condicions que imposa la profunditat per poder establir uns estàndards de disseny que anessin encaminats a la millora d'equipaments, materials, i reducció de consums energètics.

Per altra banda, l'estandarització del sistema d'anàlisi del transport vertical permetria establir uns criteris bàsics, com a eines interessants de cara a la planificació de futures infraestructures subterrànies.

En el cas de la Línia 9, caldria comprovar com respon la infraestructura en termes d'evacuació a partir de la seva inauguració per validar el model establert i assentar les bases per a la planificació de futures infraestructures de gran capacitat en el subsòl de les ciutats.

BIBLIOGRAFIA

- [1] López Jimeno, C. Manual de túneles y obras subterráneas. Madrid, 2003. ISBN: 84-921708-1-6.
- [2] Melis Maynar, M. Ferrocarriles metropolitanos, tranvías, metros ligeros y metros convencionales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2004.
- [3] Julià Sort, J. Redes metropolitanas. Editorial Gustavo Gili. Barcelona 2006.
- [4] Generalitat de Catalunya. Normes Tècniques sobre seguretat contra incendis a la xarxa ferroviària soterrada a Catalunya. Barcelona 1997.
- [5] Sener. Estudi d'alternatives de transport vertical. Barcelona 2007.
- [6] Auding. TM-02609.11. Projecte d'evacuació de la L9 del Metro de Barcelona. Barcelona 2001
- [7] NFPA. NFPA-130. Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems. Massachusetts 2009
- [8] EBA. Protecció contra incendis i altres catàstrofes en la construcció i explotació de túnels ferroviaris. Alemanya 2001
- [9] TYPESA. Projecte de Construcció de la línia 9 del Metro de Barcelona. Clau TM-00509.2 Annexe Ventilació i Climatització. Barcelona 2001
- [10] UTE Gorg. Projecte de Construcció de la línia 9 del Metro de Barcelona. Clau TM-00509.3 Annexe Ventilació i Climatització. Barcelona 2001
- [11] Comas Barragan, M. Propietat del autor. 2009
- [12] JuanFran. Propietat del autor. 2008
- [13] Manuel, Cristóbal. Propietat del autor. 2008
- [14] Madrid Virtual. Propietat del autor. 2008