Relazione tecnica riguardante le componenti impiantistiche ed il materiale rotabile

:: SOMMARIO ::

1. PREMESSA 4

2. IL SISTEMA "CATENARY FREE" ALSTOM APS 4

2.1 Componenti impiantistiche essenziali del sistema APS 6
2.2 Fasi elementari di alimentazione e di isolamento della "terza rotaia" 7
2.3 Marcia in condizioni di avaria di un tratto di linea 9
2.4 Sviluppo attuale e futuro del sistema APS Alstom 9

3. IL ROTABILE "CITADIS X05": CARATTERISTICHE TECNICHE 11

3.1 Il sistema di assistenza alla guida "ADAS" 14
3.2 L'impatto sull'ambiente dei Tram Citadis X05 14
3.3 Comfort di marcia e "personalizzazioni" 15
3.4 Certificazioni del sistema APS di Alstom e sua affidabilità 16

4. DESCRIZIONE SOMMARIA DEL SISTEMA DI CONTROLLO E DI SICUREZZA 19

4.1 CARATTERISTICHE ESSENZIALI DELL'ESERCIZIO 20
4.1.1 Gli scambi 20
4.1.2 La gestione della circolazione 21
4.2 PECULIARITÀ DELL'IMPIANTO 21
4.2.1 L'architettura funzionale 21
4.2.2 Il sistema delle telecomunicazioni 22
4.2.3 Il software 23
4.2.4 Hardware di centro 23
4.2.5 Livello periferico 24
4.2.6 I circuiti di Binario 24
4.2.7 I segnali Stop & Go 25
4.2.8 I segnali posizione scambi (PS) 26
4.2.9 Le Casse di Manovra 26
4.2.10 Il sistema di Comunicazione Terra – Bordo (transponder) 27
4.2.11 Posto Periferico di Controllo - segnalamento Linea o Deposito - 29
4.3 LIVELLO CENTRALE 30

5. SISTEMA DI CONTROLLO DELL'ESERCIZIO E LOCALIZZAZIONE 31

5.1 LIVELLO PERIFERICO 31
5.1.1 Sistema di Localizzazione (Posto Periferico di Rilevamento) 31
5.1.2 Sistema Radio 32
5.2 LIVELLO CENTRALE 32

6. SISTEMA DI REGOLAZIONE SEMAFORICA CON PRIORITÀ AL TRAM 33

6.1 LIVELLO PERIFERICO 33
6.1.1 Caratteristiche tecniche delle lanterne per semafori veicolari, tranviari e ciclo - pedinali 33
6.2 LIVELLO CENTRALE 35

7. SISTEMA DI SUPERVISIONE E DI CONTROLLO DELLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE 36

7.1 LIVELLO PERIFERICO 36
7.2 LIVELLO CENTRALE 36

8. SISTEMA VIDEOSORVEGLIANZA, INFORMAZIONE ALL'UTENZA E COMUNICAZIONI DI EMERGENZA 39

8.1 LIVELLO PERIFERICO 39
8.2 LIVELLO CENTRALE 40

9. IL SISTEMA DI BORDO 40

10. INSTRADAMENTI 40

10.1 PECULIARITÀ DELL'ESERCIZIO TRANVIARIO 41

11. NORMATIVE DI RIFERIMENTO 43

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI 46

1. PREMESSA

Per le nuove tratte della città di Palermo, si propone di realizzare l'infrastruttura tranviaria di tipo **"catenary free"** nei tratti delle linee indicati nei documenti posti a base del concorso, cioè dove l'impatto della alimentazione tradizionale con linea di trazione aerea risulterebbe assolutamente incompatibile - per ragioni storiche, architettoniche e urbanistiche - con le peculiarità del centro urbano cittadino.

Dopo una specifica analisi comparativa delle soluzione tecniche già adottate in altre città aventi caratteristiche simili o assimilabili a quelle di Palermo, si è giunti alla conclusione che la scelta del nuovo sistema di trasporto tranviario di tipo **"catenary free" deve necessariamente prevedere un'alimentazione dei rotabili in continuo a livello binario** (cioè con impianti posti al suolo "ground level system").

In particolare, per affidabilità degli impianti dell'infrastruttura, efficienza energetica, costi di investimento e di esercizio, vita utile dei rotabili e compatibilità sia con le linee già esistenti, sia con le nuove tratte aventi anche alimentazione tradizionale (aerea), **si è individuata come soluzione tranviaria "catenary free" ottimale il Sistema APS di Alstom.**

Si precisa, inoltre, che tutti i sistemi che prevedono rotabili a batteria e supercapacitori, con ricarica alle fermate vanno scartati per la realtà di Palermo perché, di fatto, essi non possono essere considerati a tutti gli effetti di tipo "catenary free". Infatti, questi sistemi (es. Bombardier Primove) richiedono la ricarica dei Tram ogni 600 m circa in fermate che debbono necessariamente essere attrezzate con 90 m, o più, di linea aerea.

Si realizzerebbe così, proprio nel centro storico della città di Palermo, un'alternanza – certamente non pregevole e quindi presumibilmente contestata dalla cittadinanza - di zone prive di linea di alimentazione aerea e di zone con linea di contatto aerea (catenaria), il cui sviluppo complessivo occuperebbe dal 15 al 25% circa dello sviluppo della tratta tranviaria (così come bene documentato in letteratura tecnico-scientifica di settore [1]).

Ciò premesso, nei paragrafi che seguono si descrive l'architettura del sistema di trasporto tranviario proposto per la città di Palermo, dando particolare evidenza alle tratte prive di catenaria ed al materiale rotabile.

2. IL SISTEMA "CATENARY FREE" ALSTOM APS

Il sistema tranviario proposto nel presente studio è composto da sette tratte (denominate con le lettere A, B, C, D, E, F, G) che si sviluppano in parte con un tradizionale sistema di trazione elettrica aerea ed in parte con tecnologia di tipo "catenary free".

Più in particolare, per le **tratte di tipo "catenary free", che si sviluppano per lo più nel centro storico della città e nelle altre aree a vocazione turistica (Mondello)**, si propone la realizzazione del **sistema con "terza rotai" APS di Alstom**.

Si tratta di una tecnologia tramite la quale l'alimentazione dei rotabili avviene con una cosiddetta (sebbene impropriamente) **"terza rotaia"** (*contact rail*) **ubicata in corrispondenza dell'asse del binario,** tra le due rotaie a gola (scartamento ordinario di 1.435 mm).

La "terza rotaia" è suddivisa in più segmenti metallici tra loro isolati, ciascuno avente una lunghezza di 8 m (con tratte di isolamento lunghe 3 m).

I suddetti segmenti della terza rotaia sono energizzati ed attivati per il tramite di un radiocomando emesso dai rotabili tranviari che viene captato da un sottostante loop che determina la chiusura di un contattore di potenza di collegamento di ogni singolo segmento con una linea alimentatrice a +750 V.
Ciò determina il passaggio di corrente elettrica soltanto su quei segmenti di terza rotaia che, man mano il Tram avanza, sono posti al di sotto dello stesso e quindi risultano a diretto contatto con due pattini di captazione. I segmenti energizzati sono pertanto fisicamente inaccessibili ad eventuali pedoni.
I restanti segmenti esterni al tratto di linea occupato, istante per istante dal rotabile, sono collegati a un *feeder* di terra grazie ad altrettanti contattori azionati in modo contrapposta rispetto a quelli a +750 V.
Così facendo, si tutela la sicurezza di eventuali pedoni, rispetto al rischio di elettrocuzione.
In altri termini, **i pedoni possono attraversare i binari perché i segmenti metallici non conducono energia elettrica, ad eccezione di quelli posti al di sotto dei rotabili che sono, appunto, inaccessibili perché schermati dai veicoli**.
L'energia di trazione viene captata da pattini (*frotteurs*), posti al di sotto della cassa del Tram, che strisciano sui segmenti metallici.
È utile rimarcare che **dall'attenta disamina della letteratura tecnico-scientifica di settore, emerge che il sistema APS Alstom in tutte le linee già in esercizio non hai mai dato alcun problema di sicurezza, neanche in presenza di acqua stagnante sulla piattaforma stradale anche in seguito a piogge di eccezionale intensità**.
Gli unici limiti del sistema APS riguardano eventuali disservizi per il solo caso di pavimentazione innevata o con ghiaccio: si tratta, come ben noto, di una situazione meteo-climatica il cui accadimento è del tutto improbabile nella città di Palermo.

Figura 1: Fotografia del Tram APS Alstom nella città di Bordeaux

Figura 2: Schema di funzionamento del sistema APS Alstom e foto del Tram di Bordeaux (notare i pedoni che calpestano in piena sicurezza la "terza rotaia")

2.1 Componenti impiantistiche essenziali del sistema APS

L'impianto previsto per le tratte con terza rotaia APS è così composto:

- in corrispondenza delle due estremità della sezione di alimentazione della linea sono ubicate le sottostazioni di energia da ciascuna delle quali, in configurazione di alimentazione bilaterale, parte il feeder a +750 V;
- al suddetto cavo si collegano i contattori di energia situati nella scatola di alimentazione (coffret d'alimentation "CA"), inserita nella sede stradale (cfr. Figg. 2 e 3);
- ogni scatola di alimentazione pone sotto tensione a +750 V il segmento della "contact rail" (circuito in tratto a colore rosso) che si trova esattamente sotto il Tram (cfr. Fig. 2), captando il radiosegnale emesso dallo stesso Tram che così certifica la propria presenza e posizione senza margini di errore;
  ogni scatola di alimentazione è provvista anche di un secondo contattore disposto normalmente in chiusura verso il feeder di "terra" e che in condizioni di presenza del radiosegnale, al contrario, si dispone in apertura;
- una linea di controllo "ligne pilote" mette in collegamento le sottostazioni e tutte le scatole di alimentazione, convogliando i segnali di permanente verifica della coerenza delle condizioni di funzionamento con quelle di sicurezza e funzionalità prescritte per il sistema. Nel caso di una segnalazione di anomalia, a seguito della quale potrebbero essere alterate le ordinarie condizioni di sicurezza e di funzionalità del sistema di trasporto, la "ligne pilote" istantaneamente segnala alla sottostazione di provvedere all'immediato distacco dell'energia e all'isolamento della sottostazione che ha originato l'anomalia.
  In questa circostanza il Tram, poiché è anche munito di batterie a bordo (che consentono un'autonomia di circa 200 m senza alcuna alimentazione esterna), può continuare a percorrere in piena sicurezza ed efficienza la zona con anomalia, superata la quale il rotabile potrà nuovamente essere alimentato dalla "contact rail" priva di anomalie.

Si precisa che **il sistema con "terza rotaia" APS Alstom**, diversamente da quelli caratterizzati da rotabili alimentati con batterie/capacitori e ricariche tradizionali o a induzione alle fermate,

permette di ottimizzare e di diminuire al massimo le sottostazioni elettriche a servizio del nuovo sistema di trasporto tranviario della città di Palermo.

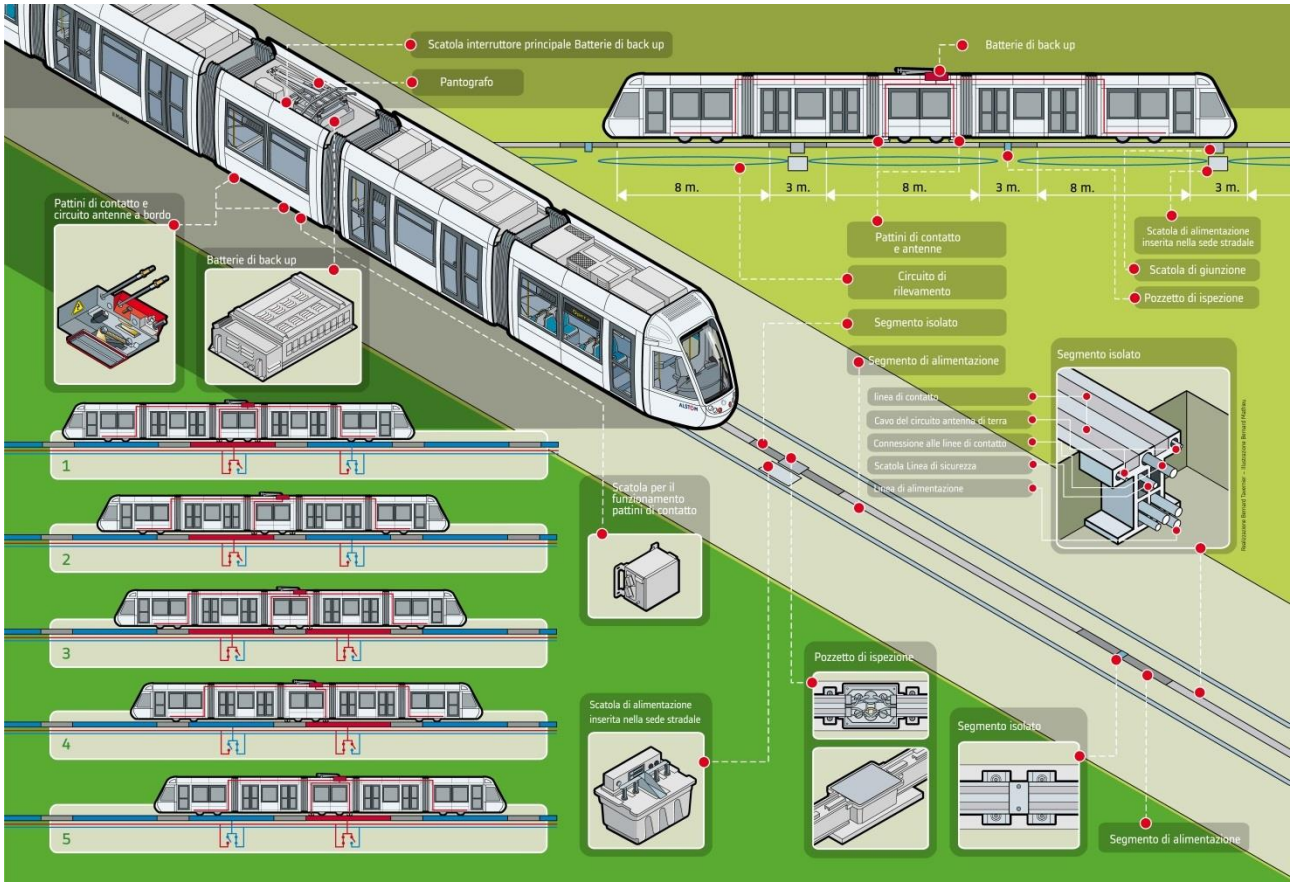


Figura 3: Elementi essenziali dell'impianto APS e fasi di marcia del Tram

2.2 Fasi elementari di alimentazione e di isolamento della "terza rotaia"

Nella precedente Fig. 3 sono schematizzate le fasi di transizioni dello stato infrastruttura/rotabile che si verificano nel sistema APS Alstom durante le ordinarie condizioni di esercizio.
Più in dettaglio, si tratta di un ciclo composto da cinque distinte fasi elementari:

- **Fase 1:** nell'istante iniziale il Tram è posizionato con il pattino anteriore e quello posteriore su un segmento di rotaia che per semplicità di trattazione indichiamo qui con "segmento A". Questo segmento, essendo energizzato, dalla presenza del radiosegnale emesso dal Tram consente che lo stesso capti l'energia elettrica con entrambi i pattini, avanzando lungo la linea (o mettendosi in moto se inizialmente fermo);
- **Fase 2:** man mano che il Tram avanza lungo la linea il pattino anteriore, avanzando di conseguenza, oltrepassa il "segmento A" energizzato e si porta sul segmento isolante (quindi non energizzato). In questa fase la vettura è alimentata esclusivamente dal pattino posteriore, che si trova ancora a contatto con il "segmento A" energizzato.

- **Fase 3:** in questa fase il pattino anteriore del Tram ha superato il segmento isolante ed è entrato in contatto con un successivo "segmento B". Il radiosegnale emesso dal Tram in movimento è captato dalla scatola di alimentazione del "segmento B", che si porterà solo dopo tale captazione in condizioni di chiusura inviando energia al "segmento B" che diviene energizzato. In questa fase entrambi i segmenti A e B sono energizzati ed il Tram capta energia sia dal pattino anteriore, sia dal pattino posteriore;

- **Fase 4:** il tram ha percorso un altro tratto ed il pattino posteriore ha abbandonato il "segmento A"; quindi il rotabile è alimentato dal solo pattino anteriore. La scatola di alimentazione di competenza del "segmento A", non captando più il radiosegnale emesso dl Tram, determina il distacco del contattore di collegamento con il cavo a +750V, e la conseguente chiusura del contattore di terra per la messa in sicurezza (potenziale di terra) dello stesso "segmento A";

- **Fase 5:** il ciclo si completa con il contatto del pattino posteriore con il "segmento B", dopo il superamento del segmento isolante intermedio. In questa fase, la captazione dell'energia avviene nuovamente da entrambi i pattini senza che avvenga mai interruzione galvanica del circuito di alimentazione verso la vettura e quindi manifestazione di archi elettrici nella sottocassa del rotabile.

Si realizza in tal modo **un controllo di tipo "switched off/on/off"** per la massima sicurezza di tutti gli utenti della strada, ivi compresi **i pedoni che possono toccare o calpestare i segmenti di cui è composta la "terza rotaia" senza alcun pericolo per la propria incolumità anche quando la sovrastruttura stradale è bagnata**.
Quando si verifica una anomalia con la permanenza in tensione di uno dei segmenti della linea al suolo si determina la successione dei rilevamenti e delle manovre che seguono (A.P.S. System Safety):

- indicando con t =0 sec. l'istante di tempo iniziale nel quale si manifesta il guasto, entro un intervallo Δt = 100 msec. il guasto viene rilevato dai dispositivi che pilotano la linea di controllo. Quest'ultima invia la segnalazione di anomalia al computer a servizio della sottostazione che, a sua volta, comanda l'apertura dell'interruttore principale della linea di alimentazione a +750 V e la sua messa a terra entro un intervallo temporale Δt = 200 msec.
  Il pezzo guasto viene quindi individuato ed escluso dal sistema di alimentazione entro 2 sec. L'alimentazione viene ripristinata entro un tempo massimo di 2 minuti.

Figura 4: Esempio di zona di transizione tra tratto con catenaria e tratto con terza rotaia (foto di sinistra) e particolare della "terza rotaia" in uno scambio (foto di destra)

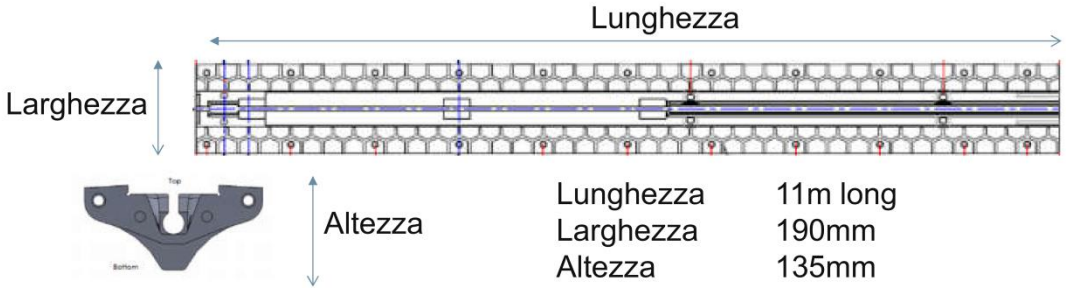


Figura 5: Dimensioni caratteristiche del sistema di alimentazione a quota binario ("terza rotaia")

2.3 Marcia in condizioni di avaria di un tratto di linea

Come già anticipato, i rotabili sono provvisti di riserva di energia a bordo: una batteria permette di alimentare il veicolo e di poter superare le tratte in cui uno o più segmenti di "terza rotaia" sono in stato di temporanea avaria. Il rotabile, se alimentato a batteria, ha una autonomia di oltre 200 m.

In condizioni di piena efficienza della linea di alimentazione (catenaria o "terza rotaia"), la batteria di bordo preleva dalla linea stessa l'energia di ricarica.

2.4 Sviluppo attuale e futuro del sistema APS Alstom

A partire dalla sua prima implementazione a Bordeaux (Francia) nel 2003, in diverse città del mondo, sono state realizzate, o sono in fase di realizzazione, numerose **linee tranviarie APS Alstom. Si stima una estensione complessiva di oltre 144 km (62 km di linee tutte già in**

esercizio); inoltre sono stati venduti più di **349 Tram Alstom Citadis compatibili con il sistema APS** (cfr. paragrafi seguenti).

Più in dettaglio, **il sistema APS di Alstom è utilizzato, oltre che a Bordeaux, anche nelle seguenti città: Angers, Reims, Orléans, Tours** (Francia), **Dubai** (Stato degli Emirati Arabi Unit), **Rio de Janeiro** (Brasile).

Inoltre, sono in fase di costruzione altre linee tranviarie "catenary free", con tecnologia APS Alstom, nelle seguenti città: **Cuenca** (Ecuador), **Lusail** (Qatar), **Sydney** (Australia) e nuove tratte a **Rio de Janeiro** e **Bordeaux** (Francia) [2].

Va poi considerato con interesse che **sono in fase di sviluppo mezzi privati ed autobus elettrici alimentati da terra sfruttando la tecnologia APS di Alstom, anche in promiscuità con la corsia tranviaria**. In tale direzione, si annovera a titolo puramente esemplificativo la sperimentazioni dall'Agenzia Svedese per l'Energia, in sinergia con Alstom e Volvo, mirata alla costruzione di cosiddetti "Electric Road Systems (ERS)" [2].

Quindi **in prospettiva futura, le corsie Tranviarie della città di Palermo realizzate con il sistema "APS Alstom", se in sede promiscua, potenzialmente potranno essere percorse oltre che dai Tram anche da Bus Elettrici o mezzi privati alimentati o ricaricati da terra, sfruttando la "terza rotaia" dell'infrastruttura tranviaria**.

Figura 6: Uso del sistema APS Alstom per alimentare/ricaricare Autobus mezzi privati

3. IL ROTABILE "CITADIS X05": CARATTERISTICHE TECNICHE

Per le nuove linee tranviarie di Palermo si considera come scelta ottimale l'utilizzo dei rotabili bidirezionali "Citadis X05, modello 305" (Citadis di quinta generazione).
Si tratta di un mezzo ampiamento utilizzato in molte tranvie di diverse città. Si stima che negli ultimi 15 anni tra la versioni precedenti e quella attuale (quinta generazione) siano stati venduti nel mondo oltre **2.300 rotabili tranviari Citadis in più di 50 città e 18 Paesi del mondo**.
Il rotabile è bidirezionale e, nella versione compatibile con tecnologia APS, può essere alimentato sia da catenaria (sulle linee tradizionali) mediante pantografo, sia da terra con pattini a contatto con la "terza rotaia" nelle tratte catenary-free, così come descritto nei precedenti paragrafi.
Sono disponibili molteplici configurazioni del veicolo. Con riferimento alla larghezza della cassa, in accordo agli attuali standard commerciali, i rotabili vengono realizzati in due versioni: larghezza di 2,40 m e di 2,65 m (ma su specifica richiesta possono essere realizzati anche rotabili con dimensioni inferiori, es. 2,30 m). Per la città di Palermo, come premesso, si è prescelto il **Citadis X05 modello 305, largo 2,40 m, alto 3,30 m e lungo 32,2 m avente massima capacità di 211 o 273 passeggeri seduti ed in piedi,** considerando rispettivamente 4 passeggeri/m^2 o 6 passeggeri/m^2. Quindi l'ingombro del rotabile proposto è sostanzialmente identico a quello dei rotabili, di altra marca, già acquistati ed in esercizio nelle attuali linee tranviarie della città di Palermo (aventi lunghezza di 2,40 m e lunghezza di 32,37 m). Il massimo carico assiale è inferiore alle 10 tonnellate. I finestrini del Tram sono particolarmente ampi in modo da offrire ai passeggeri un **"effetto balconata"** che sarà certamente apprezzato dai passeggeri residenti e turisti soprattutto nelle nuove tratte del centro storico di Palermo.
È stato verificato, con simulazioni di marcia, **che l'ingombro dinamico del rotabile Citadis X05 modello 305 è del tutto compatibile con i tracciati plano-altimetrici di tutte le nuove tratte** in progetto (oltre che con le linee esistenti) e con gli ostacoli trasversali, anche in fermata e nei depositi. Il Tram scelto, quindi, **è perfettamente compatibile con le linee tranviarie già esistenti a Palermo**, in termini di alimentazione, scartamento, transito/ricovero/rimessaggio nei depositi e nelle officine esistenti.

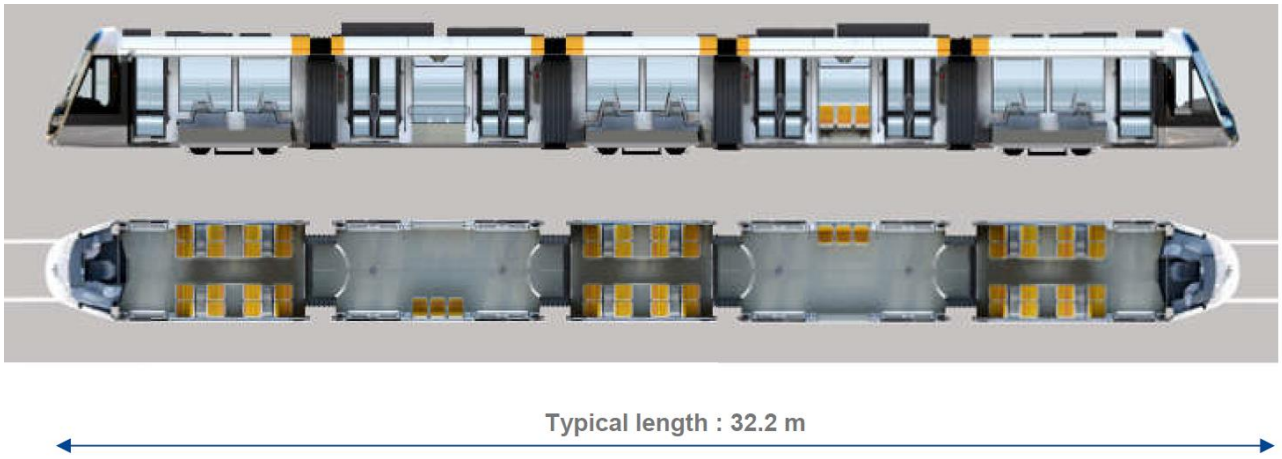


Figura 7: Layout interno e dimensioni del rotabile Citadis X05 modello 305

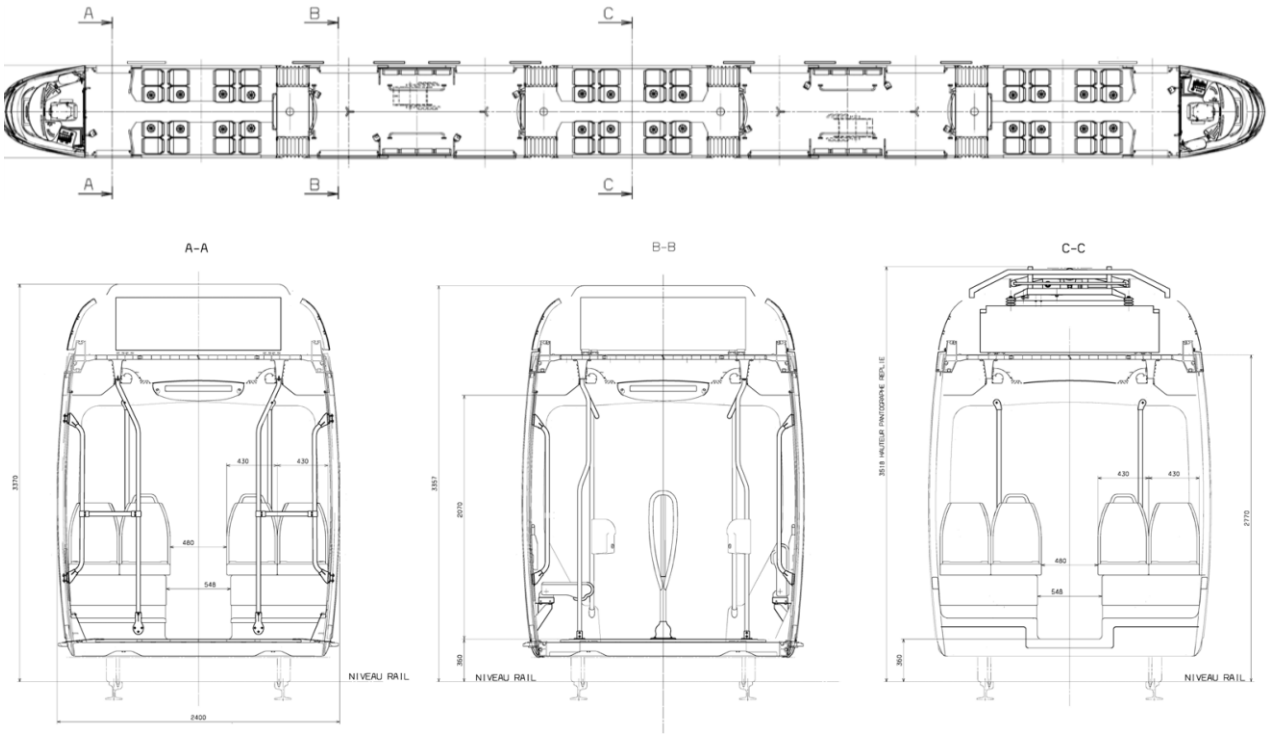


Figura 8: Pianta e sezioni trasversali del rotabile Citadis X05 modello 305

Il "Citadis X05" è un tram estraneamente diffuso per l'esercizio su linee senza catenaria: addirittura, secondo i dati di Alstom (disponibili sul portale internet dell'Azienda) **oltre il 97% dell'offerta di trasporto mondiale su linee senza catenaria ("catenary free") è effettuato con Tram Citadis** (Alstom). Si tratta pertanto di un prodotto ampiamente diffuso perché estremamente affidabile e confortevole. Il veicolo può percorrere continuativamente la linea APS senza catenaria ad una velocità massima di 60 km/h, senza alcun limite legato all'autonomia, come invece avviene nei Tram con alimentazione esclusiva on board con batterie/capacitori.
Il Tram **"Citadis X05"**, che come già precisato **ha una doppia alimentazione** (dal basso con pattini e terza rotaia; dall'alto con pantografo e linea di trazione aerea) ed **è anche munito di un pacchetto di batterie a bordo che offre un'autonomia di marcia di oltre 200 m, senza alcuna alimentazione elettrica esterna**.
Il rotabile Citadis X05 è estremante flessibile potendo percorrere senza alcun disservizio, rallentamento o soluzione di continuità nella marcia tutte le possibili configurazioni della rete tranviaria, potendo anche attraversare eventuali tronchi con guasti o assenza di rete.
Il rotabile può percorrere in piena efficienza:

- le linee con catenaria già in esercizio nella città di Palermo;
- le future tratte, oggetto del presente Studio, munite di catenaria;
- le future tratte, oggetto del presente Studio, in cui è prevista l'alimentazione a livello pavimentazione /binario (ground level system) con "terza rotaia";
- tronchi di transizione tra tratti con catenaria e tratti con "terza rotaia";
- tratti con guasti (della catenaria o della "terza rotaia"), con disservizi o assenza di rete, grazie al sistema di alimentazione a bordo di cui il veicolo è munito (batterie).

Figura 9: Rotabile Citadis X05 alimentato da terra (sistema APS) e pianale 100% ribassato

Il veicolo può iscriversi in tratti di binario con raggi di curvatura modesti (20 m in linea e 18 m in fermata/deposito) e **può superare agevolmente livellette stradali con pendenza sino al 8% anche con il sistema di condizionamento attivo la cui potenza massima è di 45kW nella zona passeggeri e 4 kW in cabina**.
L'accelerazione massima è di 1,3 m/s^2, la decelerazione in condizioni di esercizio è di 1,2 m/s^2 mentre quella massina in condizioni di emergenza arriva a 2,8 m/s^2.
Nella cabina di guida, progettata per il massimo comfort psico-fisico del macchinista, è installato un monitor touch screen (CCTV Monitor) col quale l'autista può monitorare, tra le altre cose, i passeggeri ed agire sui comandi di apertura e di chiusura delle porte.

Figura 10: Particolare della cabina e del monitor CCTV in cabina

Gli steps del programma di manutenzione suggerito da Alstom per il rotabile Citadis X05 mod. 305 sono molto diradati. Infatti, gli interventi devono essere eseguiti al raggiungimento delle seguenti percorrenze e tempi di esercizio: 1): 25.000 km; 2): 75.000 km; 3) 450.000 km; 4): 600.000 km; 5): dopo 15 anni di esercizio. I costi di manutenzione del rotabile Citadis X05 sono inferiori del 18% rispetto agli omologhi costi dei modelli precedenti.

3.1 Il sistema di assistenza alla guida "ADAS"

Al fine di migliorare ulteriormente la sicurezza per i passeggeri del sistema tranviario e per tutti gli atri utenti della strada, si prevede di munire il Citadis X05 mod. 305 dell'optional di assistenza alla guida ADAS (Advanced Driver Assistance System), specificatamente studiato per questo mezzo. Il sistema di ausilio alla guida ADAS **consente di individuare eventuali pericoli o rischi presenti sull'infrastruttura e nelle sue vicinanze** (altri Tram, veicoli, pedoni, ecc.) **intervenendo, con una frenata di emergenza, in caso di ritardi nei tempi di percezione e reazione del macchinista**. Ciò consente di evitare incidenti o di ridurre significativamente la velocità relativa di impatto contro altri veicoli o pedoni, limitando di conseguenza gli effetti di eventuali sinistri. Il sistema si fonda sui ben noti principi della **tecnica dell'image processing** che richiede, in primo luogo, telecamere e radar installate sul mezzo per l'auscultazione dell'ambiente stradale, ed il cui utilizzo si sta sempre più diffondendo nei veicoli a guida automatica e semi-automatica.

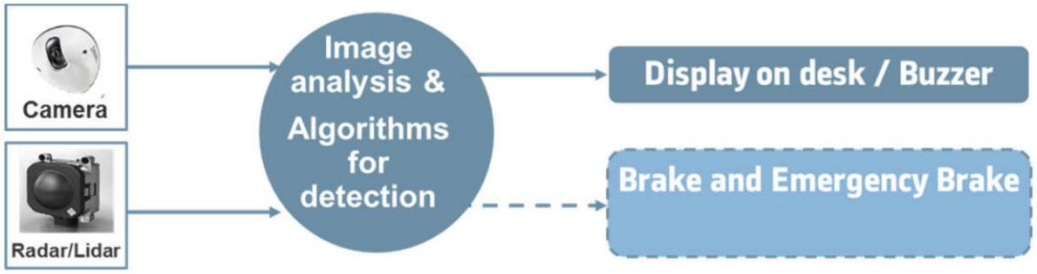


Figura 11: Logica del sistema di assistenza alla guida "ADAS"

3.2 L'impatto sull'ambiente dei Tram Citadis X05

I tram Citadis X05 sono estremamente efficienti dal punto di vista energetico. Il sistema di trazione adottato è denominato "Onix" con IGBT (Transitional Bipolar Gate Transistor) e si contraddistingue per i **motori a magneti permanenti che riducono il consumo di energia del 25% rispetto a quelli tradizionalmente usati sui Tram,** ed **hanno una efficienza energetica dichiarata del 97%.** È inoltre installato sul rotabile un sistema di recupero dell'energia in fase di frenatura del mezzo (tecnologia HESOP). Il mezzo è integralmente riciclabile (99%) alla fine della sua vita utile (convenzionalmente individuata in 30 anni) e rispetta il regolamento REACH (es. vernici usate a base d'acqua).

Figura 12: Motore e carrello a due assi con sospensioni primarie e secondarie del rotabile Citadis X05

3.3 Comfort di marcia e "personalizzazioni"

I passeggeri sono stati posti al centro dello sviluppo del Citadis X05, con particolare attenzione alla mobilità e al comfort a bordo. I rotabili comprendono porte doppie per un migliore accesso, grandi finestrini, aree polifunzionali, illuminazione a LED e massimi livelli di sicurezza, come le telecamere di sorveglianza, i citofoni di emergenza e le informazioni in tempo reale per i passeggeri mostrate in appositi display a messaggio variabile.
Il pianale è integramente ribassato, alla stessa quota della banchina, e garantisce l'accessibilità facilitata e non discriminata per tutti gli utenti (adulti, bambini anziani e persone con disabilità motorie).
Il Tram è climatizzato ed è munito di sensori di rilevamento di CO_2 tramite i quali viene regolato il flusso d'aria nelle diverse parti del Tram. La marcia risulta regolare anche quando il climatizzatore è attivato poiché non si verificano riduzioni di potenza del motore tali da limitare la velocità e le accelerazioni anche su livellette con pendenza sino a 8% che possono essere percorse senza limitazioni di lunghezza.
Il **confort di marcia è elevatissimo** essendo le carrozze perfettamente isolate dai rumori del traffico urbano.
Anche **le vibrazione sono estremamente ridotte per una resa del servizio estremamente confortevole**. Infatti, in accordo alla norma ISO 2631-1 /2010, **ai macchinisti è garantito il pieno confort alla guida per oltre 8 ore di servizio continuativo**. Anche **il confort percepito dai passeggeri è eccezionale**, essendo le massime vibrazioni laterali/verticali inferiori rispettivamente a 0,51 m/s^2 e 0,57 m/s^2, per le ordinarie velocità operative (norma ISO 2631-1 / 2010).
Il Tram Citadis X05 può circolare regolarmente con una affidabilità del 99,5% con temperature esterne sino a + 55 °C (all'ombra) e con temperature raggiunte dalla carrozzeria di oltre + 85 °C.
Le sedute sono di tipo ergonomico e sono presenti aree dedicate ad ospitare le sedie a rotelle ed i passeggini. Numerosi servizi sono garantiti a bordo tram: connettività, ricarica cellulari, informazioni turistiche, acquisto biglietti. Va poi considerato che **il mezzo è ampiamente personalizzabile nella carrozzeria, nei colori, negli allestimenti interni e può quindi essere attrezzato con appoggia schiena nella zona posti non seduti e con rastrelliere per biciclette**.

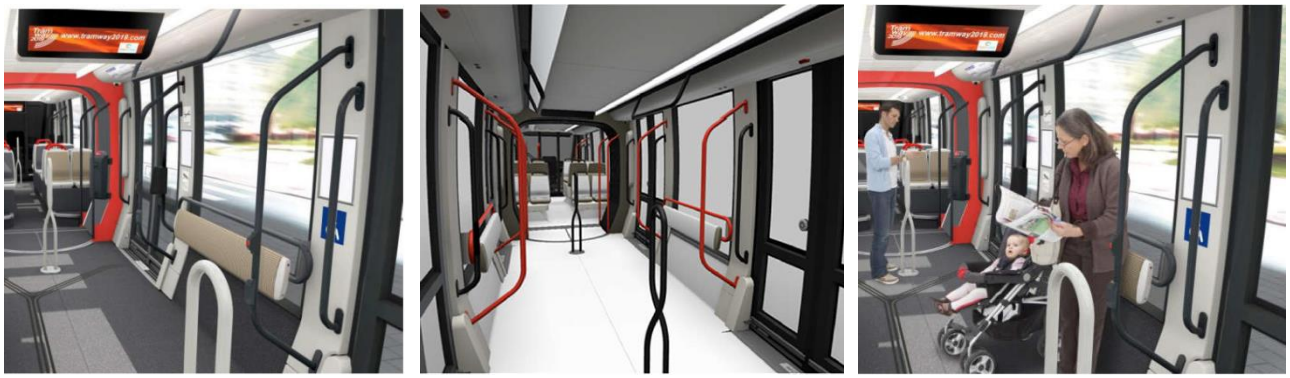


Figura 13: Esempi di personalizzazioni interne del Tram "Citadis X05, modello 305"

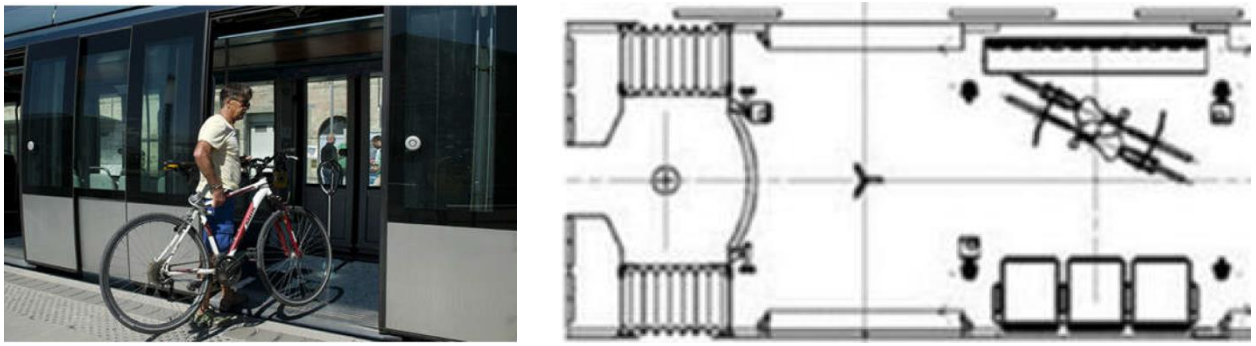


Figura 14: Il Tram "Citadis X05, modello 305" è attrezzabile con rastrelliere per biciclette

3.4 Certificazioni del sistema APS di Alstom e sua affidabilità

La sicurezza del sistema di trasporto tranviario Alstom APS per i passeggeri, i pedoni e le atre componenti del traffico stradale, è ormai ben nota ed **è stata certificata a livello interazionale dai più importanti Enti cui è attribuito il ruolo di verificatori e valutatori indipendenti della sicurezza** nel settore ferroviario e filo-ferrotranviario, tra i quali si annoverano: **CERTIFER**, STRMTG e Lloyd's.

Le suddette certificazioni, contemplano tra i numerosi aspetti tecnici ed impiantistici anche il **massimo carico per asse (inferiore a 10 tonnellate), l'ingombro statico e dinamico, il sistema di articolazione della cassa, la resistenza agli urti frontali e laterali** (Structure acc. EN 12 663 cat. IV, compressione: 40 ton., Crash acc. to EN 12 227)**, il sistema di raffreddamento e, più in generale l'affidabilità dei mezzi.**

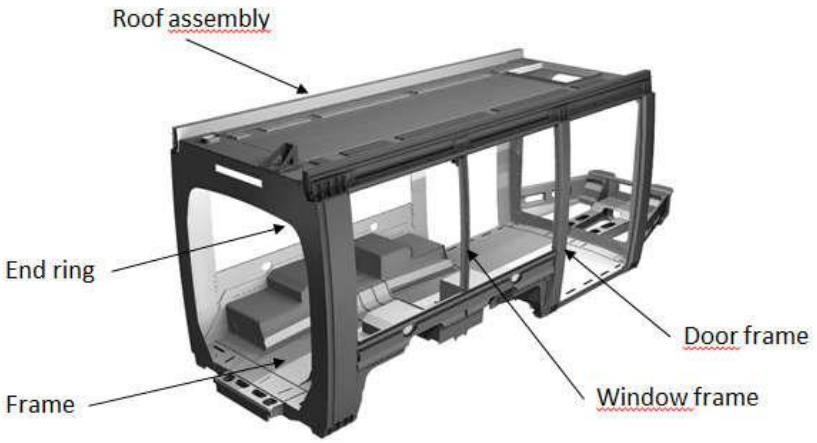


Figura 15: Il telaio del Citadis X05 mod. 305 (conforme alle norme EN 12 663, EN 12 227)

Il Rotabile è stato progettato anche in conformità alle seguenti Norme europee e italiane:

- EN 45545: Applicazioni ferroviarie - Protezione al fuoco per i rotabili ferroviari;

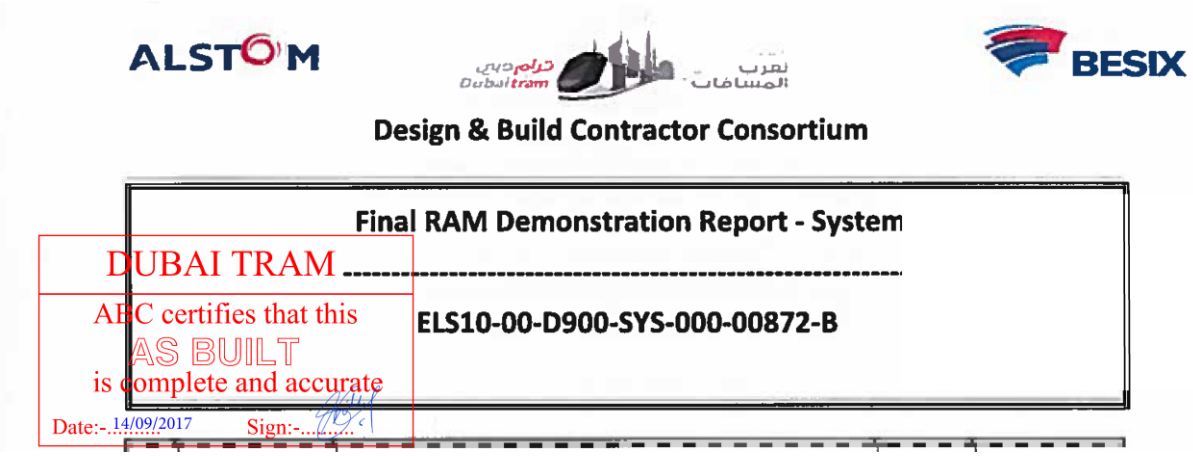
- EN 50128: Sistemi di telecomunicazione, segnalamento ed elaborazione - Software per sistemi ferroviari di comando e di protezione),
- EN 50121: Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane. Compatibilità elettromagnetica — Parte 3-2: Materiale rotabile — Apparecchiature;
- UNI 11174: Materiale rotabile per tramvie e tramvie veloci - Caratteristiche generali e prestazioni
- UNI 7156: Tranvie e tranvie veloci - Distanze minime degli ostacoli fissi dal materiale rotabile e interbinario - Altezza della linea aerea di contatto.

Pertanto, è forse superfluo evidenziare che si tratta di un sistema Tranviario che può essere utilizzato senza problemi di sorta (normativi, di omologazione, certificazione, ecc.) in Italia e quindi, per il caso in esame, nella città di Palermo.
Attualmente sono in esercizio oltre 62 km di linee tranviarie "catenary free" APS Alstom, su cui circolano 188 rotabili Citadis (Alstom).
A titolo puramente esemplificativo della rilevante richiesta di rotabili per tranvie "catenary free" con tecnologia APS, basti considerare che nel corso degli ultimi 5 anni, **sono stati venduti da Alstom i seguenti rotabili Citadis con pavimento 100% ribassato** (cioè privi di gradini interni nel percorso da cabina e cabina) **specificatamente progettati per servizi su linee tranviarie "catenary free"** e linee ordinarie:

- Anno 2013: 14 tram Citadis a Cuenca;
- Anno 2013: 11 tram Citadis a Dubai;
- Anno 2013: 32 tram Citadis X05 a Rio de Janeiro;
- anno 2015: 30 tram Citadis X05 a Sidney (con sistema di recupero dell'energia HESOP);
- anno 2016: 17 tram Citadis X05 a Lusail;
- anno 2018: 10 tram Citadis X05 a Bordeaux;

Si tratta di un elenco non completo ma certamente utile a dimostrare che **Alstom, nell'ultimo quinquennio, ha venduto un numero di Tram Citadis X05** – mezzo scelto nel presente Studio per le nuove tratte tranviarie della città di Palermo - **ben superiore alle 30 unità** (numero minimo previsto nel Bando di concorso).

Per quanto attiene l'affidabilità del servizio, come espressamente dichiarato dalla Società Alstom nella documentazione tecnica fornita, e facilmente reperibile nel sito internet dell'Azienda, **sulla scorta dei risultati certificati dell'esercizio sinora effettuato dalle diverse "Aziende di Trasporto Pubblico Locale", l'affidabilità del sistema APS Alstom e dei rotabili Citadis X05 è stata del 99.95% su base annuale.**
A titolo esemplificativo, si riportano **i risultati certificati di affidabilità** ottenuti sulla linea tranviaria di Dubai realizzata con tecnologia APS di Alstom e rotabili Citadis X05 (documentazione del 14/09/2017). **Come è immediato notare dalla Tabella di seguito riportata l'affidabilità del sistema è sempre superiore al 99%**.



	Service Delivery		Vehicle Ponctuality		Failure ratio and reliability improvement factors			
Month	SD TOTAL	SD ATTRIBUTABLE ABC	VP TOTAL	VP ATTRIBUTABLE ABC	Actual R1	Actual R2	Actual R3	Actual R4
Jan-16	99.56%	99.56%	99.81%	99.88%	0.00%	0.11%	0.01%	0.00%
Feb-16	99.61%	99.66%	99.49%	99.66%	0.00%	0.26%	0.08%	0.00%
Mar-16	99.36%	99.54%	99.60%	99.88%	0.00%	0.11%	0.01%	0.00%
Apr-16	99.34%	99.34%	99.76%	99.87%	0.00%	0.13%	0.00%	0.00%
May-16	99.60%	99.83%	99.71%	99.87%	0.00%	0.06%	0.00%	0.07%
Jun-16	99.99%	99.99%	99.74%	99.96%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%
Jul-16	99.83%	99.83%	99.91%	99.94%	0.00%	0.06%	0.00%	0.00%
Aug-16	99.98%	100.00%	99.87%	99.96%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%
Sep-16	99.63%	100.00%	99.81%	99.92%	0.00%	0.08%	0.00%	0.00%
Oct-16	99.82%	99.99%	99.89%	99.91%	0.00%	0.09%	0.00%	0.00%
Nov-16	99.65%	99.65%	99.71%	99.77%	0.00%	0.08%	0.15%	0.00%
Dec-16	99.96%	99.98%	99.71%	99.82%	0.00%	0.18%	0.00%	0.00%

Tabella 1: Valori dell'affidabilità del sistema tranviario APS di Alstom e rotabile Citadis X05, riscontrati nel 2016 a Dubai

In definitiva, **la soluzione tecnologia proposta per le nuove tratte tranviarie della città di Palermo** - sistema APS Alstom e rotabile Citadis X05 - **avrà indubitabilmente un valore di affidabilità del sistema** identico a quello empiricamente rilevato e certificato su linee già attive, cioè **pari ad almeno il 99%** su base annuale; **quindi un valore di affidabilità ben maggiore del valore minimo richiesto dal Bando** (95%).

4. DESCRIZIONE SOMMARIA DEL SISTEMA DI CONTROLLO E DI SICUREZZA

Il **sistema di controllo e di sicurezza dell'esercizio** proposto per le nuove tratte Tranviarie della città di Palermo si fonda sui più moderni modelli e standard di gestione della circolazione tranviaria. Quest'ultima sarà infatti assistita da un *centro di controllo e di supervisione* mediante l'ausilio di apparati di sicurezza per la gestione automatica delle tratte (anche banalizzate), dei deviatoi e dei capolinea.

Il sistema centralizzato di supervisione dell'esercizio consente, per altro di ottimizzare al meglio i movimenti grazie a funzioni aggiuntive di indirizzamento automatico dei rotabili tranviari, informando in tempo reale i conducenti su eventuali anticipi o ritardi rispetto alle tabelle di marcia programmate.

Il sistema centralizzato elabora e trasmette, in tempo reale, le **informazioni agli utenti sui i tempi di attesa** che vengono visualizzate sugli appositi **pannelli informativi** posti in corrispondenza di ogni fermata.

Le altre principali funzioni svolte riguardano la gestione della circolazione anche in condizioni di anomalie. In queste circostanze attraverso il telecomando di enti di campo **si possono evitare gli effetti negativi derivanti da guasti o indisponibilità temporanee delle linee**, che in genere possono determinare perturbazioni dell'esercizio (con conseguenti ritardi), permettendo in tal modo il marcato miglioramento del coordinamento dei movimenti tranviari, sia sulle linee, sia all'interno delle zone dei depositi (CRM).

Dal **Posto Centrale di Controllo (PCC)** si potranno svolgere le seguenti principali mansioni:

1. supervisionare il sistema di segnalamento e sicurezza di tutte le linee tranviarie;
2. in caso di necessità, intervenire, con funzioni di prenotazione dei movimenti;
3. fornire informazioni e comunicazioni via radio direttamente con i conducenti dei tram;
4. fornire informazioni agli utenti in attesa alle diverse fermate con appositi diffusori audio posti in prossimità delle stesse;
5. inviare agli utenti informazioni e scritte sui *Pannelli a Messaggio Variabile (PVM)* sia nelle fermate, sia all'interno dei rotabili;
6. gestire il sistema elettrico TE attraverso le funzioni del "*Supervisory Control and Data Acquisition* " (SCADA);
7. intervenire sul sistema di comunicazione e dei nodi della rete in fibra ottica;
8. monitorare le fermate, sia nelle ore diurne, sia in quelle notturne mediante telecamere;
9. gestire la regolamentazione degli impianti semaforici (e quindi dei flussi tranviari e degli autoveicoli) grazie ai regolatori semaforici posti alle intersezioni della rete viaria che, quando abilitati, attribuiscono priorità di marcia ai tram.

Si precisa che le **caratteristiche funzionali del sistema proposto per le nuove tratte tranviarie sono del tutto compatibili con quelle del sistema installato sulle linee attualmente in esercizio nella città di Palermo** e quindi si otterrà una perfetta integrazione dei due impianti.

Per la descrizione geometrica e funzionale delle nuove tratte tranviarie, si rimanda ai documenti tecnici facenti parte del presente progetto di fattibilità.

Le linee TE della **tranvia saranno alimentate da nuove sottostazioni elettriche telecomandate**.
Poiché lungo la rete viaria si avranno numerose intersezioni tra il tracciato delle linee tranviarie e quello degli assi stradali occorre gestire la regolamentazione dei flussi di traffico con **regolatori semaforici tra loro coordinati**.

4.1 CARATTERISTICHE ESSENZIALI DELL'ESERCIZIO

La **circolazione dei rotabili si realizza con "marcia a vista" e senso di marcia sulla destra**, sia lungo le tratte a doppio binario, sia nei punti di incrocio ed anche in corrispondenza delle fermate.
Tuttavia, in casi del tutto eccezionali per servizio degradato (es. guasti) è consentita la circolazione "banalizzata" sul binario "illegale" in tratte di linea a doppio binario.
Diversamente da quanto avviene nel trasporto ferroviario ("marcia strumentale"), la modalità di esercizio tranviaria è con "marcia a vista". Tuttavia, **il sistema di condotta del mezzo è integrato da alcune informazioni di ausilio al conducente che vengono trasmesse in cabina** attraverso gli impianti e le apparecchiature di segnalamento e di sicurezza posti in corrispondenza degli scambi e degli incroci fra tram, con l'ausilio delle informazioni sui segnali luminosi.
Ne deriva che la responsabilità sulla condotta di guida ricade principalmente sul conducente che valuta e stima, istante per istante, le informazioni che provengono dall'ambiente stradale agendo di conseguenza sui comandi di guida del veicolo (dunque accelerando, decelerando, ecc.).
Si precisa che **la marcia a vista è "assistita" da segnali luminosi**, come ad esempio da lanterne semaforiche di protezione agli incroci stradali, segnali luminosi di protezione delle tratte di incrocio per tram "STOP" e "GO" e segnali luminosi indicanti la posizione dei deviatoi. **Si prevede, inoltre, l'apposizione lungo le linee di segnali sussidiari fissi (cartelli)** indicanti eventuali riduzioni delle velocità, indicazioni per cambio di direzione e tabelle distanziometriche.
I conducenti durante l'esercizio devono garantire una condotta di guida conforme e rispettosa delle indicazioni e delle limitazioni imposte sulle linee e segnalate agli stessi con i suddetti segnali. Nel caso di guasti o eventi imprevisti i conducenti debbono eventualmente arrestare la marcia dei rotabili e richiedere la necessaria assistenza al PCC.

4.1.1 Gli scambi

Si prevede l'utilizzo di **scambi con cerniera elastica accoppiati a casse di manovra con ritorno a molla**, tallonabili sistematicamente (per eventuale marcia banalizzata).
Le casse di manovra garantiscono il contenimento dei costi di installazione e di manutenzione ed offrono elevata robustezza durante i ripetuti e ciclici movimenti richiesti dall'esercizio tranviario ordinario.
Le cassa di manovra in esercizio sono di due tipi:

- *casse di manovra elettro idrauliche telecomandabili con alimentazione elettrica trifase a 380 v*;
- *casse di manovra meccaniche non telecomandabili*.

Entrambi i tipi i casse potranno essere monitorati dal sistema di rilevamento della posizione degli aghi e manovrabili manualmente con apposita asta.
In ragione del caratteristico senso di marcia (a destra), gli incroci nelle fermate e nelle zone di raddoppio, sono predisposti, di norma, con ingresso a destra. Come già anticipato verranno installate unicamente casse meccaniche con ritorno elastico.

4.1.2 La gestione della circolazione

La circolazione è regolata dall'**orario di esercizio di riferimento**, con la caratteristica principale fornita dalle fasce di frequenza giornaliera.
Si tratta, quindi, di un regime di circolazione di tipo **"previsionale orario"** con possibili scostamenti di valore non trascurabile dovuti al fatto che talune volte un rotabile potrebbe accodarsi a quello che lo precede, quando entrambi marciano con lo stesso senso di marcia in tronchi di linea a doppio binario.
Nelle tratte banalizzate, la regolazione del traffico è cadenzata con priorità di prenotazione dell'occupazione del tronco di linea gestita dagli apparati di segnalamento, che "concedono" l'occupazione della tratta banalizzata al tram che richiede per primo la prenotazione.

4.2 PECULIARITÀ DELL'IMPIANTO

4.2.1 L'architettura funzionale

L'impianto di segnalamento, telecomunicazione, telecomandi e di SCADA ("*Supervisory Control and Data Acquisition* ") **è composto da sei distinti sistemi a logica distribuita, tra loro integrati, tramite i quali si effettuano le attività di supervisione e di controllo dell'intera rete tranviaria**.
A ciascuno dei sei sistemi è associato, nel Posto Centrale di Controllo, un modulo software di gestione centralizzata delle funzionalità del sistema medesimo.
Le caratteristiche dei suddetti sistemi, ai quali corrispondono moduli software dedicati, sono nel seguito brevemente descritte.
È forse superfluo rilevare che rispetto alle caratteristiche generali prima chiarite, fa eccezione **il sistema di bordo dei rotabili,** che **ha un software di gestione e di controllo** non residente nel PCC, bensì nel veicolo e più precisamente **nell'unità "intelligente" presente a bordo di ciascun rotabile**.
Il sistema, nel suo insieme, presenta i macro servizi / sottoinsiemi di eseguito descritti:

1. **Sistema di Segnalamento, Supervisione e Controllo della Linea e del Deposito** funzionale alla gestione in sicurezza delle rotte e degli instradamenti;
2. **Sistema di Controllo dell'esercizio e sistema di Localizzazione** dedicati alla localizzazione del veicolo, alla gestione del sistema radio e al controllo dell'esercizio per l'intera flotta in circolazione, ed inoltre all'aggiornamento dei tempi di attesa indicati sui PMV delle fermate;
3. **Sistema di Regolazione e Supervisione Semaforica**, che garantiscono la priorità di marcia negli incroci al Tram mediante regolatori semaforici di incrocio;

4. **Sistema di Supervisione delle Sottostazioni Elettriche (SCADA)** dedicato al telecontrollo e alla supervisione in tempo reale di tutti gli apparati presenti nelle sottostazioni elettriche (come ad es. i trasformatori, gli interruttori, i sezionatori, ecc.) e nei punti di alimentazione lungo linea;
5. **Sistema di Videosorveglianza, Informazione all'Utenza e Comunicazioni di Emergenza** dedicati alla gestione delle funzionalità di assistenza in fermata mediante telecamere a circuito chiuso, citofoni di emergenza (colonnine SOS), o sistemi di informazione all'utenza attraverso i pannelli a messaggio variabile e diffusione sonora;
6. **Sistema di Bordo** dedicato alle funzionalità di bordo quali comunicazione terra – bordo (comando scambi e prenotazione rotte), localizzazione (gestione anticipi/ritardi), gestione dell'interfaccia conducente (abilitazioni) e comunicazioni via radio.

L'interazione tra il livello periferico ed il livello centrale si effettua con un sistema di telecomunicazioni in fibra ottica, avente standard "Fast Ethernet", e con comunicazioni analogiche e digitali del sistema radio.
Ciascuno dei sistemi appena descritti è strutturato su due diversi livelli:

- **livello periferico**, che comprendente l'insieme degli apparati distribuiti lungo le tratte tranviarie, nelle fermate, nelle sottostazioni elettriche e nei depositi;
- **un livello centrale**, residente nel Posto di Controllo Centralizzato, composto da un software di supervisione e di controllo di tutti gli apparati periferici afferenti ai vari sistemi costituenti l'intero impianto.

4.2.2 Il sistema delle telecomunicazioni

Il Posto Centrale di Controllo (PCC) è in grado di comunicare con tutti gli apparati presenti in periferia grazie ad una specifica dorsale di telecomunicazione (ed anche con un sistema radio) **costituita da una LAN "Fast Ethernet"** 100 Mbit/s e realizzata in fibra ottica monomodale avente architettura a singolo anello.
In particolare, è previsto l'uso di due canali di comunicazione, nei due sensi di trasmissione, e la ripartizione delle fibre ottiche di comunicazione su due cavi; ciò al fine di garantire la continuità e l'efficienza di funzionamento del sistema anche nel caso di accidentale rottura di uno dei due cavi.
In quest'ultima circostanza (rottura di un cavo) o in caso di guasto singolo sull'anello, **la riconfigurazione delle tabelle d'instradamento dei dati avviene automaticamente**.
Le dorsali di telecomunicazione seguono i percorsi dei tracciati planimetrici delle linee tranviarie, dipartendosi dal Deposito (PCC) sino a raggiungere i diversi capolinea ed attestandosi in corrispondenza di ogni fermata dove sono previsti i nodi concentratori. Questi ultimi costituiscono i punti d'interfaccia tra le dorsali di telecomunicazione e tutti gli apparati periferici relativi ai diversi sistemi che compongono l'impianto,
I nodi concentratori sono composti da più dispositivi inseriti all'interno di appositi armadi che gestiscono il diretto funzionamento degli "enti di campo" come ad es. le telecamere, i citofoni di emergenza, i pannelli a messaggio variabile, i posti periferici di controllo segnalamento, i regolatori semaforici, ecc.

4.2.3 Il software

I vari moduli applicativi presenti nel PCC compongono un'unica "suite software". La suite software è essenzialmente un sistema Client/Server formato da tre applicazioni principali **per la gestione rispettivamente della parte Client** (presentazione delle informazioni all'utente), **della parte Server** (server applicativo del sistema) **e del Protocollo di comunicazione con gli apparati di campo**.

4.2.4 Hardware di centro

L'architettura del PCC è progettata per la piena operatività dei cinque moduli software che costituiscono il livello centrale dell'impianto di segnalamento, supervisione e telecomandi.
Le applicazioni del Server e del Protocollo, relative ai cinque moduli, potranno essere installate su due postazioni Server perfettamente identiche in termini di configurazione hardware e software:

- la prima costantemente attiva;
- la seconda sarà in condizioni di stand–by ma pronta ad intervenire in caso di malfunzionamenti o guasti.

L'applicazione del Client risiederà su due postazioni operatore dotate ciascuna di monitor.
Le comunicazioni d'emergenza con gli utenti in attesa alle banchine avverranno mediante citofoni di emergenza, annunci a diffusione sonora, nonché mediante comunicazioni via radio con i conducenti o con i passeggeri effettuabili mediante le consolle citofoniche dotate di tastiera, display e microfono. Queste consolle hanno tecnologia tale da garantire conversazioni full duplex di qualità elevatissima.
Ognuna delle due postazione Client è dotata di una consolle citofonica. La gestione di tutte le funzionalità legate alle comunicazioni con i citofoni di emergenza e alla diffusione sonora è effettuata da un Concentratore audio Master, interamente controllato dal modulo software dedicato residente nella postazione server.
Al Concentratore audio Master è direttamente collegato il registratore audio che consente la registrazione automatica delle comunicazioni d'emergenza con l'utenza in fermata, i messaggi di diffusione sonora inoltrati direttamente dall'operatore nel PCC e le conversazioni fatte via radio.
Al Concentratore Audio Master è, inoltre, collegato il PABX per consentire l'inoltro di telefonate verso la PSTN dalle consolle citofoniche ed il collegamento del Concentratore audio Master con l'unità radio.
Invece, **la visualizzazione delle immagini riprese dalle telecamere periferiche avviene su due monitor**, collegati ciascuno con un'unità di decodifica dei flussi video digitalizzati e compressi, provenienti dal sistema di telecomunicazioni.
La gestione e registrazione contemporanea di tutti i flussi video acquisiti dalle telecamere periferiche è consentita dalla presenza di un Concentratore - Registratore Video, anch'esso interamente controllato dal modulo software dedicato.
Tutti i dispositivi prima descritti (Workstation, Unità di Decodifica Video, Concentratore Audio Master, Concentratore – Registratore Video) sono tra loro collegati mediante LAN Fast Ethernet 10/100 Mbit/s facente capo ad uno switch dotato di un numero sufficiente di porte Fast Ethernet

10/100 RJ 45. Tale switch è interfacciato alla dorsale di telecomunicazione in fibra ottica per consentire l'interazione tra il PCC e gli enti periferici.

4.2.5 Livello periferico

Ogni tratta tranviaria è controllata e supervisionata da uno o più Posti Periferici di Controllo di Linea (PPCL), ai quali è affidata la gestione in sicurezza degli instradamenti all'interno della tratta stessa.
Il PPCL costituisce pertanto un'unità di elaborazione a microprocessore che supervisiona e gestisce il segnalamento all'interno di un tronco di linea di estensione predefinita.
L'attività dei PPCL è svolta in modalità stand alone, cioè non richiede l'interazione con il PCC; tale interazione, mediante sistema di telecomunicazione fra centro e periferia, permette la supervisione centralizzata delle attività svolte a livello periferico, nonché la possibilità di effettuare comandi su apparati periferici (quali ad es. casse di manovra) o prenotazioni di instradamenti, direttamente da PCC.
In casi eccezionali di anomalie, e quindi di interruzione della comunicazione tra PCC ed enti periferici**, i PPCL continuano ed espletare le loro funzionalità di gestione degli instradamenti dei Tram in condizioni di piena sicurezza**.
I dispositivi e gli apparati coinvolti nel sistema di segnalamento, supervisione e controllo delle linee e dei depositi sono presenti lungo i binari (o nelle loro immediate vicinanze) e a bordo veicolo. Più in particolare sono previsti:

- **a bordo di ciascun rotabile:** un sistema di comunicazione bordo-terra per l'invio dei comandi;
- **a terra:** dispositivi di segnalazione luminosa, che forniscono informazione della posizione degli scambi ed informazioni sulla transitabilità (stop/go); circuiti di binario per rilevare, in sicurezza, la presenza di veicoli; casse di manovra elettriche per l'attuazione telecomandata dello scambio; casse di manovra meccanica con o senza ritorno a molla per l'attuazione manuale, o tramite tallonamento, dello scambio; sistema di comunicazione bordo-terra per l'acquisizione dei comandi inviati da bordo.

Ciascuno dei dispositivi o apparati di terra, afferenti al sistema in esame, è collegato e gestito da un PPCL.

4.2.6 I circuiti di Binario

I Circuiti di Binario (CDB) sono dispostivi atti a rilevare la presenza di un rotabile in modo passivo, cioè tramite un corto circuito che si genera tra le rotaie della linea al passaggio degli assi di un Tram e di inviare questa particolare informazione sullo stato della linea al PPCL.
Il CDB è:

- selettivo nel rilevamento; infatti, anche in caso di sede promiscua solo gli assi dei carrelli del Tram possono generare il predetto corto circuito e quindi identificare uno stato di occupato di un CDB da parte di un rotabile e non di altri veicoli ammessi a circolare in corsia (es. autoveicoli, autobus, mezzi di soccorso, ecc.);

- Affidabile nelle modalità di rilevamento poiché, come già osservato, solo la presenza del carrello di un tram all'interno di un CDB può determinare una condizione di "CDB occupato".

Il CDB può essere di tipo singolo, in grado cioè di rilevare esclusivamente la sola presenza del convoglio all'interno della sua area di funzionamento, o doppio, se è in grado di rilevare presenza e verso di marcia del rotabile.

4.2.7 I segnali Stop & Go

I segnali Stop & Go "S" indicano al Conducente se il Tram può procedere nella propria corsa o se deve attendere perché un tratto di linea per ragioni di sicurezza non è disponibile o è già occupata.

Quando il tratto di linea è libero, il segnale "S" passa da via impedita "—" a via libera "|" e il conducente può avviare il mezzo e dare inizio alla corsa schedulata.

In aggiunta alle due lanterne di indicazione dei segnali Stop e Go **si richiede l'installazione di una terza lanterna per visualizzare il segnale "P" che, se illuminata, indica al Conducente che la sua richiesta di prenotazione della rotta è stata acquisita dal Posto Periferico di Controllo**.

Per le ragioni appena richiamate, **i segnali "S" sono posizioni in corrispondenza dell'inizio di ogni tratta** ed in una posizione tale da poter essere visibile al Conducente in ogni situazione metereologica.

La funzione di ogni singolo aspetto e le possibili combinazioni sono riassunte nella Tabella che segue.

STATO	SEGNALE "S"
Invio richiesta di prenotazione tratta	Segnale indica STOP "—" e prenotato "P"
Tratta "formata" e bloccata	Segnale indica GO "|"
Tratta impegnata/nessuna tratta attiva	Segnale indica STOP "— "
Sistema in allarme o avaria	Segnale Spento

Tabella 2: Aspetti e combinazioni del segnale "S"

Considerata l'importanza del segnale "Stop", sia in termini di efficienza dell'esercizio sia di sicurezza per gli utenti del sistema di trasporto e per gli altri utenti della strada, **nella sua lanterna è implementato un sistema di controllo automatico** di efficienza del filamento principale progettato **in modo che nei casi di malfunzionamento** del filamento principale **il sistema** commuta automaticamente sul secondario (riserva) **e attiva ed invia uno specifico segnale di allarme al Posto Centrale Operativo.**

4.2.8 I segnali posizione scambi (PS)

I Segnali Posizione Scambi "PS" indicano al Conducente la posizione assunta dai deviatoi lungo la linea. Il Conducente può così verificare la congruenza della posizione dei deviatoi con l'instradamento in atto del rotabile e, in caso contrario, egli può arrestare il Tram prima di raggiungerli e oltrepassarli.
I segnali "PS" sono quindi posizionati in prossimità di ogni deviatoio indipendentemente dal tipo (elettroidraulico o manuale), **in una posizione visibile al Conducente e ad una distanza** (distanza di arresto) **tale da permettere al Conducente l'arresto del Tram qualora il deviatoio non risultasse nella corretta posizione**. La funzione di ogni singolo aspetto e le combinazioni possibili dei segnali posizione scambi sono indicati nella Tabella che segue.

STATO	SEGNALE "PS"
Deviatoio in retta	^
Deviatoio in deviata a destra	>
Deviatoio in deviata a sinistra	<
Sistema in allarme o avaria	(Spento)

Tabella 3: Aspetti e combinazioni del segnale "PS"

4.2.9 Le Casse di Manovra

Sulle linee è previsto l'uso **di casse di manovra ad azionamento elettrico** e **meccanico con ritorno elastico**. Inoltre si prevede l'impiego di scambi in versione tallonabile. Le casse di manovra saranno alimentate mediante derivazione dal controllore di zona (PPCL).
Per ragioni si sicurezza, il riscontro della posizione degli aghi è effettuato su un'asta, differente dall'asta di manovra, e il rilevamento della posizione sarà controllato con 4 sensori.

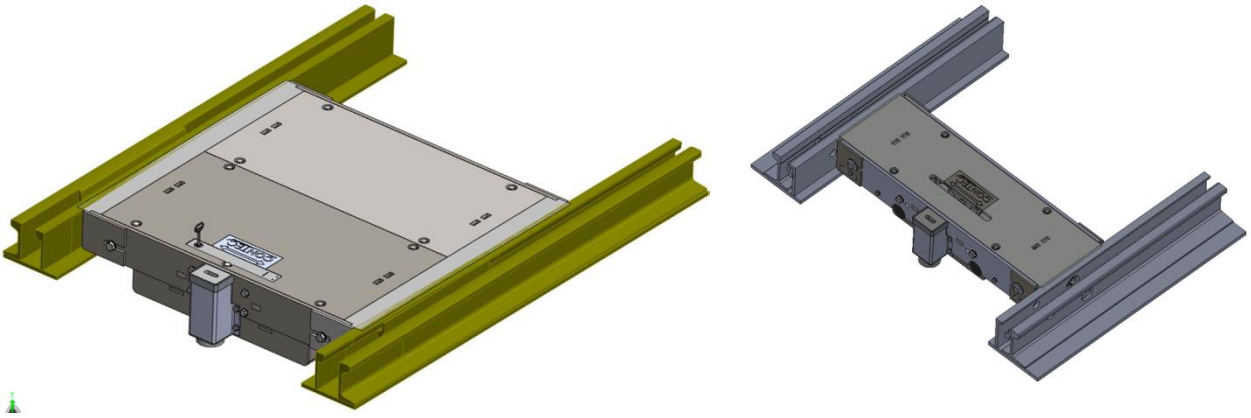


Figura 16: Esempio di casse di manovra per scambi di tipo elettrico (sinistra) e meccanico (destra)

Le casse di Manovra Elettriche (in acciaio inox e acciaio al cromo-manganese ad alta resistenza) hanno le seguenti principali caratteristiche:

- tallonabilità (sforzo di tallonamento fino a 9kN e sforzo di sforzo di manovra fino a 6kN regolabile)
- azionamento elettrico;
- durata della manovra 0,5 / 1,5 sec;
- sistema di smorzamento idraulico per ridurre la forza d'impatto ago – contrago;
- gruppo molle di posizionamento aghi;
- sensori di prossimità per il rilevamento della posizione degli aghi ridondato;
- azionabilità manuale diretta mediante apposita leva di manovra.
- altezza d'ingombro circa 200 mm;
- grado di protezione IP 67.

Le casse di manovra meccaniche permettono l'instradamento automatico (ovvero senza comando elettrico della cassa) lungo una direzione prefissata e fissa. La cassa è dotata di un azionamento manuale, necessario durante le manovre di emergenza, dei 2 aghi dello scambio per cambio direzione. Questo azionamento viene effettuato mediante apposita leva di comando.
Delle molle a precompressione regolabili generano un sistema di forze di ritenzione che agevolano il movimentare degli aghi dello scambio in posizione di chiusura. Il meccanismo di manovra è munito di smorzatore idraulico, al fine di ridurre il più possibile la rumorosità durante il funzionamento dello scambio e di limitare l'usura e gli ammaloramenti dovuti agli impatti degli aghi dello scambio.
La cassa di manovra è dotata di sensori di prossimità per il rilevamento della posizione degli aghi ridondato.
Le casse di manovra meccaniche hanno le seguenti principali caratteristiche:

- tallonabilità sistematica;
- sistema di ritorno a molla per il ripristino della posizione finale degli aghi;
- presenza di sensori di prossimità per il rilevamento della posizione degli aghi;
- sistema di smorzamento idraulico per ridurre la forza di impatto ago – contrago;
- gruppo molle di posizionamento aghi;
- azionabilità manuale diretta mediante apposita leva di manovra;
- altezza d'ingombro circa 200 mm;
- grado di protezione IP 67.

4.2.10 Il sistema di Comunicazione Terra – Bordo (transponder)

Il sistema di comunicazione bordo-terra (transponder) è composto dall'insieme dei dispositivi che concorrono alla comunicazione fra apparati di bordo e apparati di terra, assolvendo all'integrazione – per finalità di efficienza e di sicurezza - fra la parte mobile del sistema di trasporto (rotabili) e la parte fissa (infrastruttura).
Il sistema ha quindi una parte collocata a terra (sistema di terra) e una parte collocata a bordo dei rotabili.
Il **sistema di Terra** è composto dalle seguenti parti:

- **Posto Periferico** di Rilevamento (PPR), a sua volta composto da:

1. Unità d'alimentazione a 24Vcc e relative protezioni. Scheda CPU con interfaccia seriale RS232/485. Queste schede governano la scheda d'interfaccia con i loop induttivi per la loro scansione, instaurano la comunicazione con le unità di radioazionamento di bordo per la ricezione e la trasmissione dati, e attraverso l'interfaccia digitale fornita dalla scheda loop, trasmettono le informazioni inerenti al messaggio di comando ricevuto (mediante l'interfaccia seriale è realizzata la comunicazione con il PCC).
2. Scheda multiplexer d'interfaccia verso i loop induttivi con capacità di 8 loop dotata d'interfaccia a rélè; attraverso lo stato di contatto chiuso consentono di ricevere la condizione di comando inoltrata da bordo, quale destra, sinistra, diritto e la richiesta di "ready to start"

- **Loop buffer** - Si tratta di dispositivi con funzioni di amplificatore e di adattamento del segnale e consentono di aumentare le distanze fra l'apparato di radiocomunicazione di terra e i loop induttivi di comunicazione. Essi garantiscono altresì un isolamento galvanico dei loop di comunicazione. La distanza massima possibile fra loop buffer ed elettronica di controllo dell'unità di terra è di circa 250 m. Se le zone non sono influenzate da elementi generanti disturbi a carattere elettromagnetico, tale distanza può essere estesa fino a 400m. L'elettronica presente nella loop buffer è completamente resinata e sono disponibili solamente i morsetti di collegamento.

- **Loop induttivi -** Sono realizzati con conduttori unipolari aventi una sezione minima di 2,5 mm^2, isolati in materiale atto al contatto diretto con sostanze bituminose. Hanno la caratteristica forma ad 8 necessaria per ridurre le interferenze causate da cavi elettrici circostanti. Le dimensioni sono calcolate in funzione di vari parametri tra cui la velocità di passaggio del veicolo, la dimensione dei messaggi da trasferire e le caratteristiche dell'unità di acquisizioni.

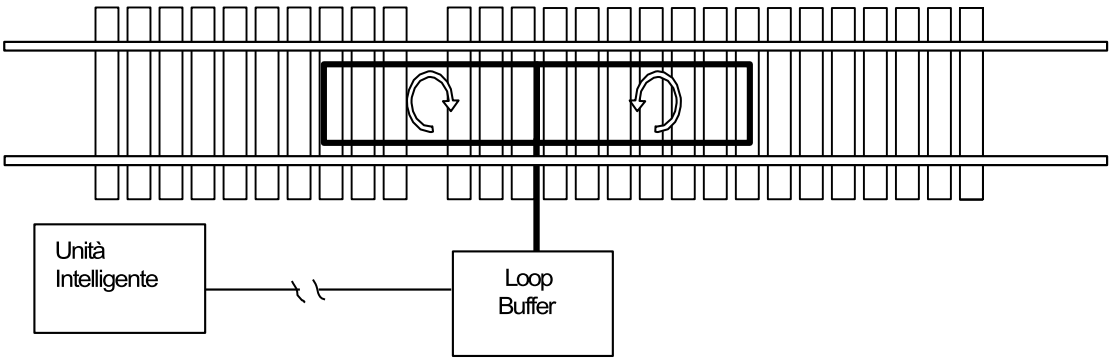


Figura 17: Sistema di comunicazione terra – bordo (sistema di terra)

4.2.11 Posto Periferico di Controllo - segnalamento Linea o Deposito -

Il Posto periferico di controllo è costituito da una unità a microprocessore a cui compete la gestione degli instradamenti nell'ambito di una predefinita area. Il controllore è basato su tecnologia ridondata (doppio processore) conforme alla classe di sicurezza AK6 (in conformità alla norma DIN V 19250) equivalente al SIL 3 secondo la EN 50126 - EN 50128.
L'unità logica di Controllo del segnalamento "depositaria delle procedure critiche per la sicurezza", è contenuta in appositi armadi per esterno IP 55, generalmente assemblati all'interno di un cestello (Rack) con schede a microprocessore, che permette di variare la configurazione a seconda dell'area controllata.
L'armadio è completo d'interfaccia con il sistema di trasmissione dati e di interfaccia con gli enti di campo, nonché la sezione di alimentazione che si collega alla dorsale apposita.
Il Posto Periferico di Controllo svolge le funzioni di seguito elencate:

1. acquisisce le prenotazioni e le richieste di instradamento attraverso il Circuito di binario CDB;
2. acquisisce le prenotazioni e le richieste di instradamento (via radioazionamento o via CDB);
3. verifica la compatibilità della richiesta con gli instradamenti già attivi e/o prenotati mediante una tabella d'incompatibilità;
4. aziona le casse di manovra (in presenza di scambi motorizzati);
5. acquisisce i segnali di fine corsa aghi provenienti dalle casse di manovra;
6. pilota i segnali tramviari (via libera/ impedita e posizione scambi);
7. interblocca le tratte dopo averne attivato l'instradamento;
8. effettua la diagnostica degli apparati esterni ed interni ad esso afferenti e ne memorizza lo stato;
9. comunica con il Centro Operativo mediante il sistema di telecomunicazione rete IP;
10. registra e memorizza gli eventi che si verificano durante l'esercizio consentendo una successiva analisi;

La dinamica di esecuzione di un instradamento in cui sono presenti scambi motorizzati avviene con la seguente sequenza:

- quando il tram inoltra il comando d'instradamento, viene trasmesso a terra un messaggio contenente l'identificativo del veicolo e la posizione desiderata degli scambi. Da questo momento la tratta risulta occupata e non è possibile per alcun veicolo azionare scambi; i circuiti di binario garantiscono il blocco in sicurezza della tratta a seguito di ogni attuazione e fino alla conclusione di ogni transito;
- l'unità di elaborazione di comando scambi (PPCL), dopo aver ricevuto il segnale dal sistema di comunicazione terra-bordo ad esso collegato, acquisisce le informazioni provenienti dalle cassa di manovra (controllo posizione aghi) e dai circuiti di binario. Se il controllo ha esito positivo vengono azionati gli scambi;
- quando gli aghi raggiungono il fine corsa, l'unità d'elaborazione provvede alla commutazione del segnale luminoso da via impedita a via libera, mentre i segnali di posizione scambi riportano l'esatta posizione degli aghi. Procedendo il veicolo si posiziona su un circuito di binario, bloccando così l'instradamento;

- qualsiasi comando sia inviato al sistema durante l'occupazione dell'instradamento bloccato, il sistema lo memorizza accettandolo come "prenotazione", ma lo esegue solo dopo che tutti i cdb relativi a tale instradamento sono stati liberati. Da questo momento fino alla liberazione della tratta, tutti i segnali presenti di STOP/GO, impediscono l'esecuzione dell'instradamento ad altri veicoli.

Il PPC ha inoltre il compito di supervisionare lo stato diagnostico degli enti di campo, mandando in blocco le tratte interessate da un eventuale guasto su un apparato presente al loro interno. La prenotazione di un instradamento può anche essere effettuata mediante occupazione di un circuito di binario, come nel caso di tratta banalizzata fra due zone di raddoppio del binario.

4.3 LIVELLO CENTRALE

A livello centrale il sistema di segnalamento, supervisione, controllo delle linee e depositi è realizzato mediante un modulo software dedicato, che fa parte della suite software.
Il modulo si occupa della gestione del segnalamento e della movimentazione dei veicoli in linea e in deposito ed anche della localizzazione dei rotabili in deposito.

5. SISTEMA DI CONTROLLO DELL'ESERCIZIO E LOCALIZZAZIONE

Il sistema fornisce agli operatori del PCC tutte le informazioni utili per localizzare, seguire, e organizzare l'andamento dei rotabili tranviari sulle linee attraverso l'impostazione del servizio, l'acquisizione dello stato attuale, la correzione attraverso politiche di regolarizzazione e la presentazione delle informazioni storiche.
Durante la percorrenza della linea, il generico tram trasferisce la propria matricola e il proprio turno da bordo a terra attraverso i loop posizionati in ingresso e in uscita di ogni fermata. Il sistema deputato a tale operazione è lo stesso descritto per il radio-azionamento scambi nel sistema di segnalamento; in questo caso però l'unità di terra trasferisce l'informazione ricevuta dal mezzo direttamente al PCC attraverso il sistema di telecomunicazione.
In questo modo avviene la localizzazione del mezzo che consente al modulo software dedicato la rappresentazione grafica della posizione e l'attuazione delle politiche di regolarizzazione del deflusso.
Inoltre, durante la percorrenza della linea, il sistema di bordo, invia messaggi precodificati verso il PCC via radio e riceve, sempre da PCC, eventuali comandi. Sempre via radio inoltre sono attivate comunicazioni foniche tra il PCC e tram.
La comunicazione tra modulo software di centro e modulo software di bordo avviene attraverso un Sistema di Comunicazione Radio digitale che gestisce in ambito centrale gli apparati radio.
L'architettura complessiva (apparati centrali e periferici) è descritta nei paragrafi che seguono.

5.1 LIVELLO PERIFERICO

5.1.1 Sistema di Localizzazione (Posto Periferico di Rilevamento)

Il Posto Periferico di Rilevamento, utilizzando un sistema di comunicazione induttivo a corto raggio, individua e localizza la posizione dei rotabili in circolazione sulle linee e trasferisce queste informazioni al PCC.
Ogni fermata è dotata di un Posto Periferico di Rilevamento (PPR) e di quattro loop ad esso collegati. Tali loop sono disposti in ingresso ed in uscita di ogni singolo binario di stazionamento, così come visibile nella seguente figura.

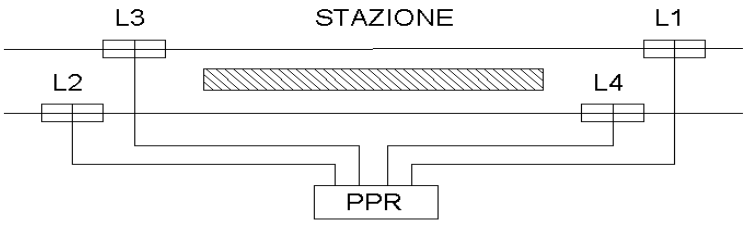


Figura 18: Disposizione dei loop per il rilevamento del Tram in fermata

Con questo sistema vengono localizzate le vetture tranviarie non appena entrano o escono da una fermata. È quindi possibile determinare, oltre alla posizione, anche i tempi di percorrenza tra fermata e fermata, il tempo di sosta, i ritardi, le previsioni di arrivo.

5.1.2 Sistema Radio

Il sistema radio utilizza 3 canali:

- due canali per l'esercizio normale in modalità Fonia/dati (precodificati e comandi);
- il terzo canale è riservato alle chiamate di emergenza.

Uno dei due canali usati nell'esercizio normale è dedicato alle comunicazioni tra PCC e Tram (conducente o passeggeri) e per la comunicazione tra Tram; l'altro canale è dedicato alla comunicazione tra portatili in canale aperto (radio del Posto Centrale di Controllo in modalità ripetitore).

Il sistema consente di effettuare i seguenti tipi di chiamate in fonia:

- Comunicazione tra PCC e Mezzi Mobili;
- Comunicazione tra Mezzi Mobili in modalità canale aperto con chiamata selettiva;
- Comunicazione tra Portatili in modalità canale aperto con chiamata selettiva;
- Comunicazione tra Portatile e PCC munito di portatile, in modalità in canale aperto con chiamata selettiva;

Il sistema consente i seguenti tipi di comunicazione dati:

- Invio di "precodificati" da Bordo a Centro;
- Invio di "comandi" da Centro a Bordo;

Il sistema Radio si interfaccia inoltre con un sistema di registrazione voce, consentendo così la registrazione di tutte le comunicazioni in fonia presso il PCC.

5.2 LIVELLO CENTRALE

A livello centrale sistema di controllo dell'esercizio e localizzazione potrà essere realizzato e gestito mediante il modulo "Train Monitor" della suite "Smartrams". Il modulo si occupa del monitoraggio e della regolarizzazione del servizio, del calcolo delle previsioni di arrivo alle fermate ed agli incroci, e della comunicazione centro-bordo nell'ambito delle tranvie.

6. SISTEMA DI REGOLAZIONE SEMAFORICA CON PRIORITÀ AL TRAM

Il sistema gestisce la regolamentazione dei cicli semaforici in modalità coordinata e centralizzata in corrispondenza delle intersezioni tra linee tranviarie – e stradali.
La centralizzazione del sistema consente la supervisione continua dello stato diagnostico degli enti periferici quali regolatori d'incrocio, lanterne, spire tranviarie e stradali.
I livelli di funzionamento si ripartiscono le funzionalità del sistema del modo seguente:

- Il livello periferico, costituito da una rete di regolatori semaforici di Incrocio che gestiscono localmente il traffico tranviario e stradale;
- Il livello centrale, che svolge le attività di supervisione, coordinamento e diagnostica dell'intero sistema.

6.1 LIVELLO PERIFERICO

In corrispondenza degli incroci facenti parte dell'impianto, sono previsti regolatori semaforici deputati a gestire localmente ed in modalità coordinata i flussi di traffico agli incroci, attribuendo la priorità ai rotabili tranviari. A tal fine **in prossimità dell'area dell'incrocio, e ad una distanza sufficiente a garantire lo spazio di arresto del veicolo tranviario** (calcolata il valore puntuale della Vp "velocità di progetto"), **saranno installati appositi Loop di impegno/disimpegno del Tram**.

6.1.1 Caratteristiche tecniche delle lanterne per semafori veicolari, tranviari e ciclo - pedinali

L'impianto semaforico proposto oltre ad essere improntato sui più moderni principi della "smart mobilily", prevede un sistema di illuminazione delle lanterne a basso consumo energetico ed alta efficienza.
Più in particolare, si propone l'uso di **innovative lanterne semaforiche con ottica a LED, ad elevatissima efficienza**, che si contraddistinguono per innumerevoli vantaggi rispetto ai tradizionali impianti con lampada ad incandescenza; tra questi si annoverano:

- l'abbattimento dei costi di gestione grazie ai modesti consumi di energia (riduzione del 90%) con conseguente marcata riduzione delle emissioni di CO_2;
- vita utile dei led superiore ai 15 anni;
- la maggior sicurezza, grazie alla riduzione del cosiddetto "effetto fantasma", dovuti ai riflesso dei raggi solari che negli impianti tradizionali possono ingannare gli utenti della strada con manovre scorrette e rischi per la sicurezza.

La struttura in policarbonato sarà, inoltre, robusta e durevole nel tempo e sarà munita di elementi parasole. Il design proposto è di tipo minimale ("slim") per un'ottimale compatibilità con il centro storico della città di Palermo.
Per gli **attraversamenti pedonali (e ciclo-pedonali) già esistenti e per quelli di nuova realizzazione saranno impiegate lanterne a tre colori** (rosso, giallo, verde), **con impianto di segnalamento acustico per ipovedenti**.
In associazione al dispositivo saranno installate **le luci countdown per indicare il tempo residuo negli attraversamenti pedonali e ciclabili** (cfr. Fig. seguente), con caratteristiche

conformi al recente **D.M. 24 aprile 2017** (G.U. n.140 del 19-6-2017), perciò conformi anche alle norme UNI EN 12368-2015, EN 60068-2-64 (e con grado di protezione almeno IP55).
Si tratta di un provvedimento con effetti particolarmente significativi in termini di sicurezza per gli utenti deboli della strada, quali pedoni, bambini anziani e ciclisti. A questo proposito basti considerare che nella città di San Francisco, **a seguito dell'installazione di semafori pedonali corredati d countdown, si è registrata una riduzione del numero di incidenti che coinvolgono pedoni di oltre il 25%** [6-10].

(a) (b)

Figura 19: Lanterne veicolari (a: 200 mm con countdown ; b= 300 mm)

(a) (b) (c)

Figura 20: : Lanterna tranviaria (a), ciclabile e pedonale con sistema countdown (b), di indicazione di svolta a sinistra (c)

6.2 LIVELLO CENTRALE

A livello centrale sistema di regolazione e supervisione semaforica, con priorità al tram potrà essere gestito mediate software specialistici tipo "SIGMA+" di "ELSAG".

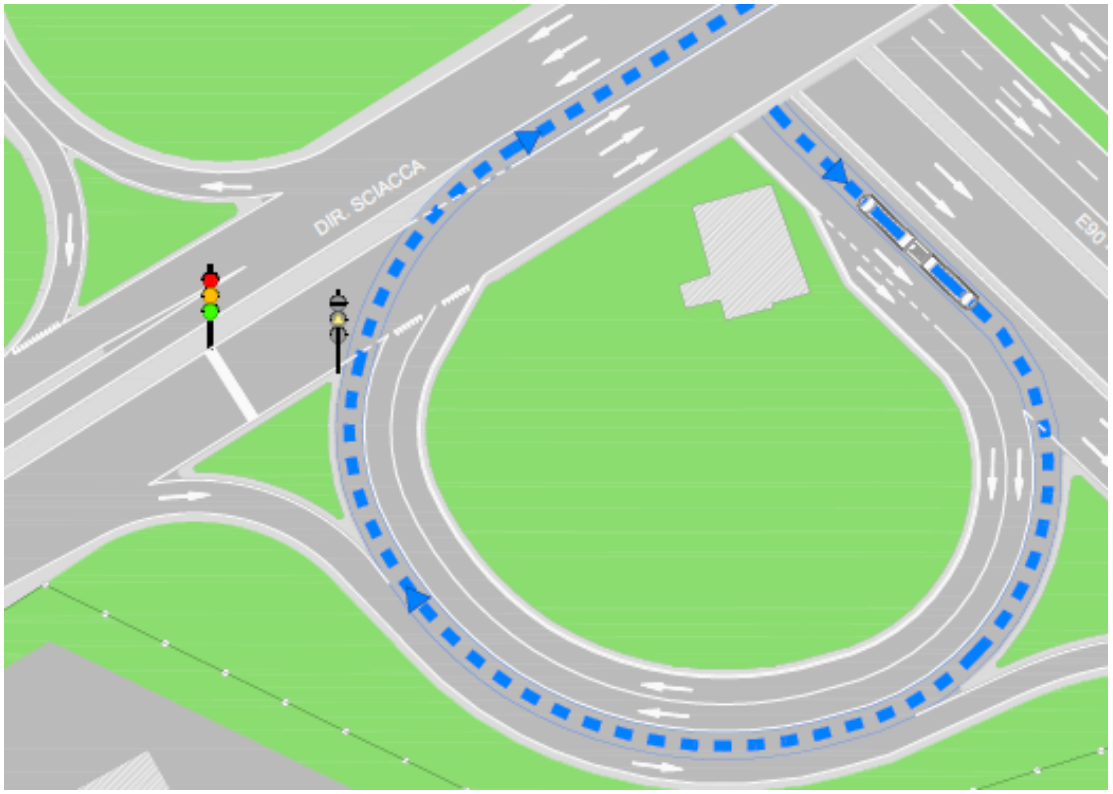


Figura 21: Esempio di regolazione semaforica con priorità al Tram (Tratta C, svincolo Brasa)

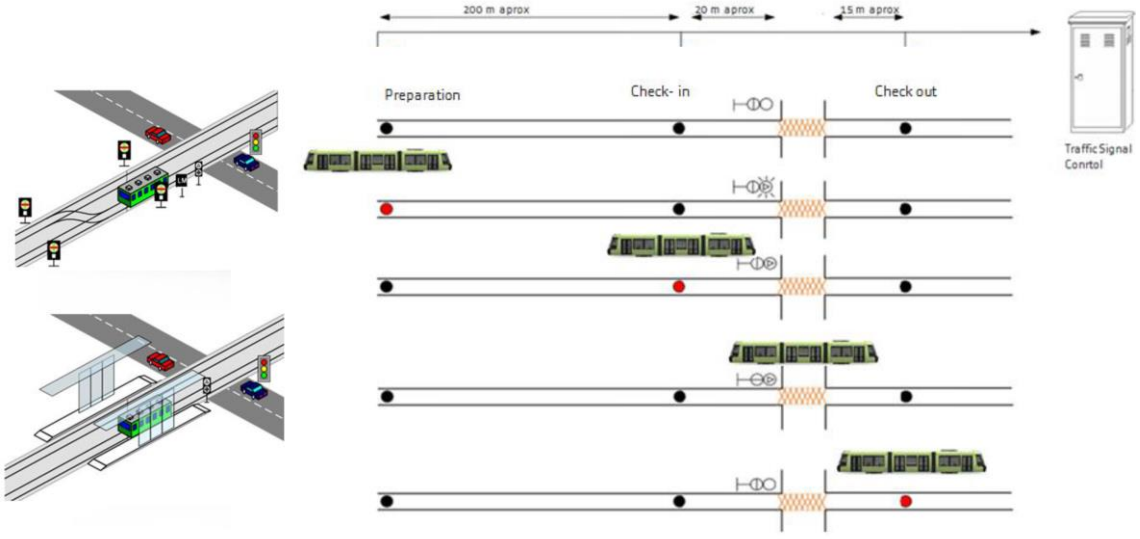


Figura 22: Schema con logica del sistema di regolazione semaforica con priorità al tram

7. SISTEMA DI SUPERVISIONE E DI CONTROLLO DELLE SOTTOSTAZIONI ELETTRICHE

Con questo sistema gli operatori del posto centrale di controllo possono effettuare la supervisione ed il telecontrollo degli apparati dedicati alla gestione dell'energia elettrica per la trazione, consentendo la gestione delle sottostazioni elettriche dal PCC in cui si raccolgono le informazioni provenienti dalle stazioni remote di controllo (RTU = Remote Terminal Unit) situate nei locali delle sottostazioni elettriche stesse.
I dati acquisiti vengono trattati e mostrati all'operatore in tempo reale, anche tramite rappresentazione grafica e tabellare. Le elaborazioni dei valori assunti dai parametri di controllo sono effettuate da un sistema RDBMS (Relational Database Management System) che permette la consultazione dei dati immagazzinati e l'analisi anche con l'obiettivo di perseguire una manutenzione programmata degli impianti.
Il sistema, mediante appositi filtri, offre livelli di accesso e di consultazione dei dati differenti in modo da poter assegnare specifiche mansioni e responsabilità a vari operatori.

7.1 LIVELLO PERIFERICO

A livello periferico il sistema è composto da apparati RTU tipo PLC di alte prestazioni funzionali e dotate di I/O per:

1. Ingressi Digitali (segnalazioni/allarmi);
2. Uscite Digitali (comandi);
3. Ingressi Analogici (misure).

I PLC hanno un numero totale di ingressi/uscite digitali ed analogiche tali da soddisfare le esigenze dell'impianto con una scorta del 20% e sono programmati con sequenze di gestione per soddisfare le esigenze richieste; il software per la programmazione delle sequenze è conforme alle normative internazionali applicabili e consente la programmazione e la configurazione remota.
Le funzionalità del sistema a livello periferico possono riassumersi nei seguenti punti:

1. Acquisizione delle informazioni circa lo stato degli enti di campo;
2. Attivazione automatica e locale di sequenze per gestire situazioni predeterminate (se previste);
3. Colloquio con il livello centrale.
4. I PLC sono montati in armadi nel cui equipaggiamento di base sono comprese anche:
5. Distribuzione alimentazione per apparati all'interno dell'armadio;
6. Alimentatori ausiliari del sistema;
7. Media Converter per conversione canale Ethernet da rame a fibra ottica multimodale al nodo concentratore più vicino.

7.2 LIVELLO CENTRALE

A livello centrale il sistema di supervisione e controllo delle sottostazioni elettriche è realizzato mediante il modulo software dedicato, che fa parte della suite software "Smartrams".

Il modulo software rappresenta uno strumento che permette la gestione, la supervisione e il controllo delle sottostazioni di trasformazione dell'energia elettrica necessarie ad alimentare le metrotranvie.

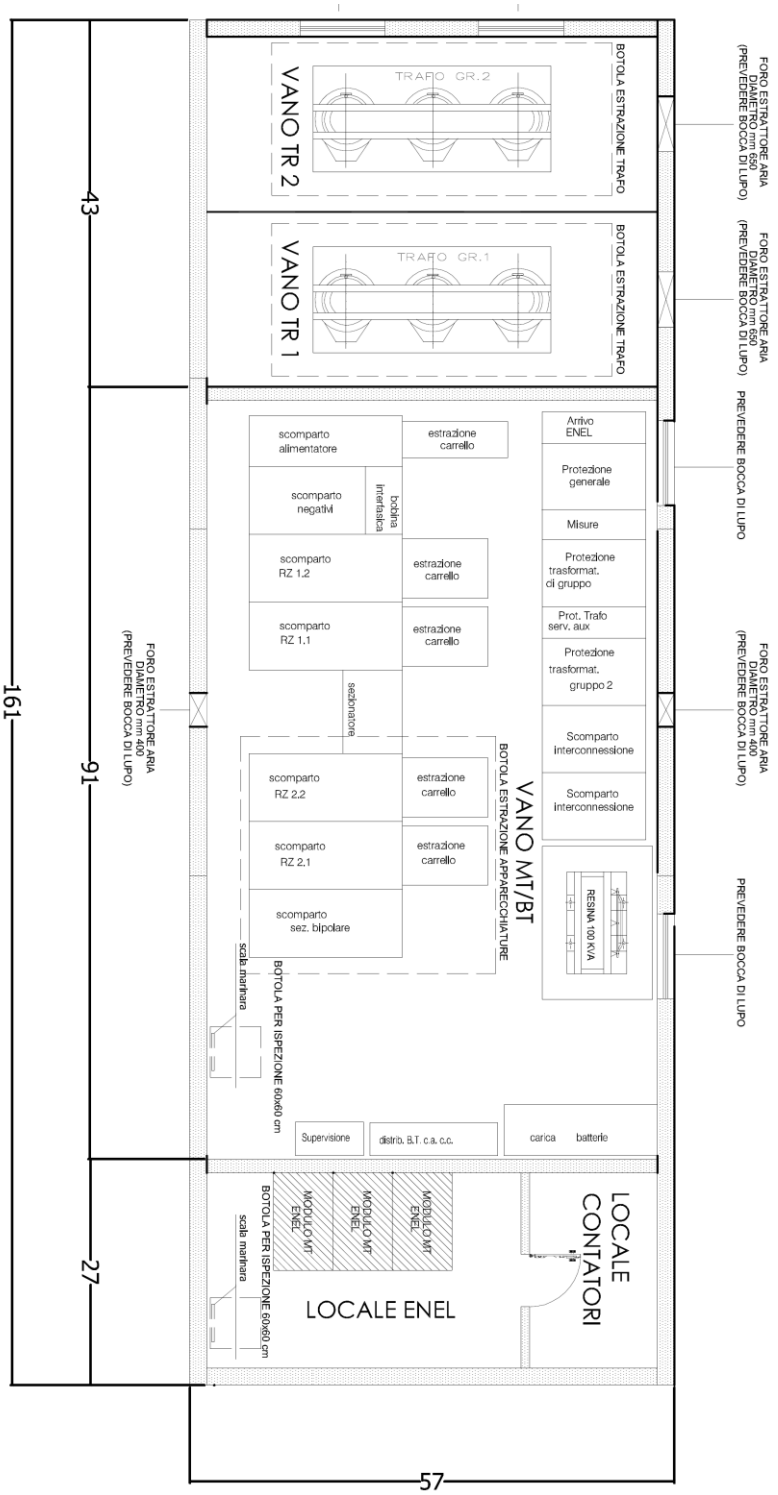


Figura 23: Pianta tipo di una sottostazione elettrica (interrata)

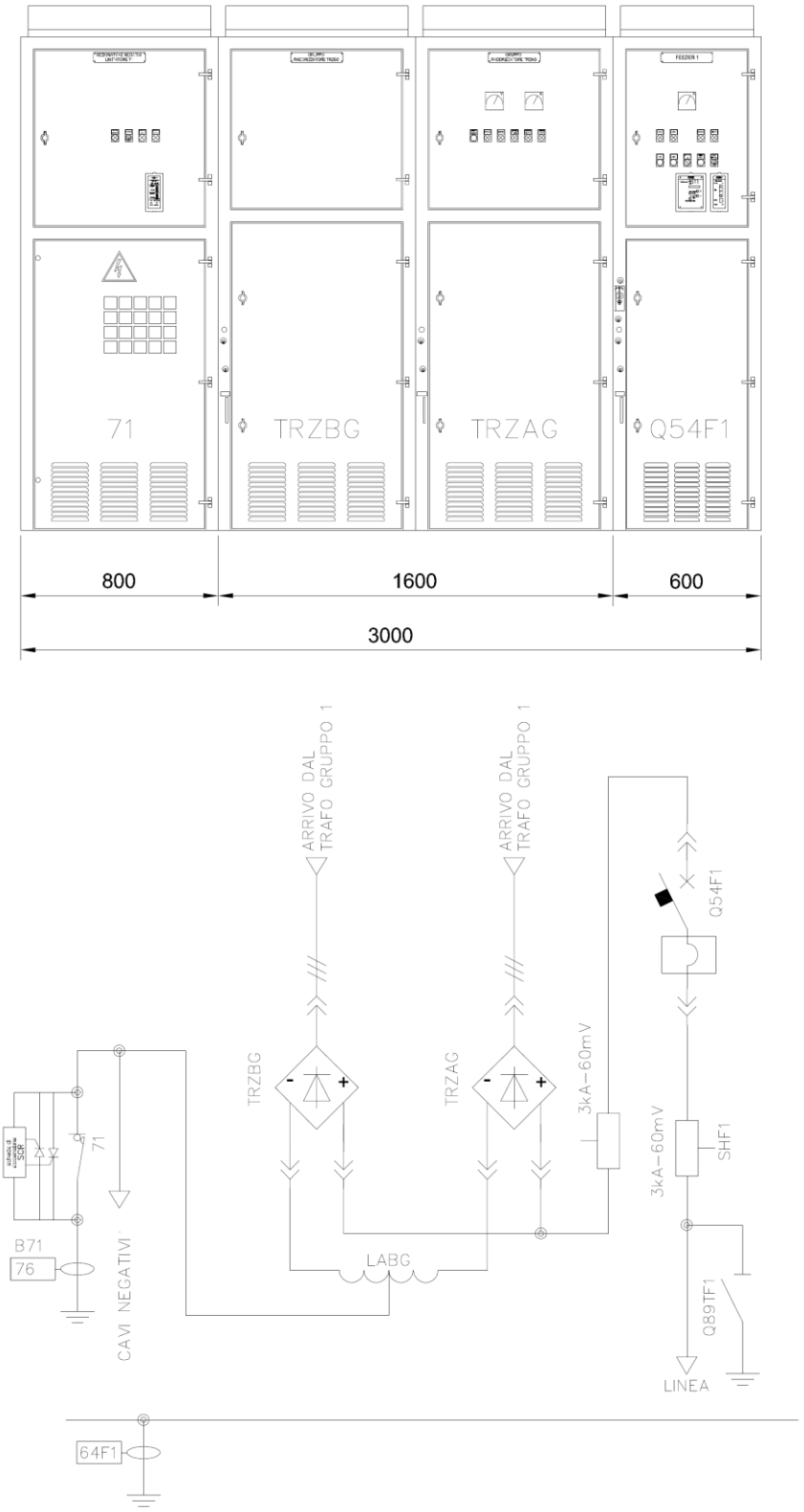


Figura 24: Particolare quadro CC

8. SISTEMA VIDEOSORVEGLIANZA, INFORMAZIONE ALL'UTENZA E COMUNICAZIONI DI EMERGENZA

La videosorveglianza nelle fermate, verrà effettata con un insieme di telecamere disposte sulle banchine. Sempre nelle fermate saranno installati sistemi informativi per l'utenza in fermata, mediante pannelli a messaggio variabile, diffusione sonora con opportuni altoparlanti incassati nella struttura di fermata, la comunicazione di emergenza fra i passeggeri in attesa in banchina e gli operatori nel PCC, mediante citofoni di emergenza.
Questo tipo di sistema effettua anche la registrazione automatica di tutti i messaggi di diffusione sonora, inoltrati dall'operatore del PCC verso l'utenza in fermata, le comunicazioni di emergenza fra il PCC e gli operatori in banchina e tutti i flussi video acquisiti dalle telecamere in banchina.
Altra funzionalità di questo sistema è la supervisione e il controllo degli apparati e degli enti di campo necessari al proprio funzionamento (telecamere, altoparlanti, pannelli a messaggio variabile); questa funzione permette all'operatore di centro di desumere lo stato di servizio dei dispositivi, tramite icone di rappresentazione, e di gestire l'allarmistica anche a livello di storico.

8.1 LIVELLO PERIFERICO

A livello periferico ogni banchina è oggi arredata con i seguenti dispositivi:
Videosorveglianza: effettuata con almeno due telecamere digitali a colori aventi le seguenti caratteristiche:

- Acquisizione e trasmissione di flussi video a 25 frame per secondo
- Risoluzione CIF (288 x 354 pixel)
- Zoom manuale
- Custodia stagna
- Uscita Ethernet 10/100 Mbit/s

Diffusione Sonora: due altoparlanti, costituiti da pannelli sonori incassati nella copertura, che garantiscono l'intelligibilità degli annunci di diffusione sonora in fermata.
Tramite gli altoparlanti è possibile inoltrare da PCC messaggi automatici (quali "tram in arrivo", "destinazione prossimo tram via X in arrivo fra 5 minuti") o messaggi "spontanei", generati direttamente dall'operatore mediante il microfono di cui esso dispone.

Informazione all'utenza mediante Pannelli a Messaggio Variabile: ad ogni fermata 1 pannello bifacciale a LED su cui sono visualizzati i seguenti messaggi:

- Automatici: direzione prossimo tram in arrivo/ tempo previsto all'arrivo; data ed ora attuale;
- Spontanei: riguardanti ad esempio variazioni al normale esercizio.

Comunicazioni di Emergenza: ad ogni fermata 1 citofono di emergenza avente le seguenti caratteristiche:

- Microfono, amplificatore (8 W), singolo tasto chiamata;
- Controllo automatico del volume in base al rumore ambientale;
- Indicazione luminosa sullo stato della comunicazione.

Quadro di comando periferico (Nodo Concentratore): ad ogni fermata un armadio contenente:

- Apparati di gestione locale dei dispositivi di banchina
- Apparati di interfacciamento alla dorsale di comunicazione

8.2 LIVELLO CENTRALE

A livello centrale il sistema di videosorveglianza, informazione all'utenza e comunicazioni di emergenza è realizzato mediante un modulo software dedicato, che fa parte della suite software.
Il modulo software si occupa della gestione degli aspetti che riguardano la sicurezza degli impianti e il livello qualitativo di servizio.

9. IL SISTEMA DI BORDO

Il sistema di bordo è funzionale all'ottimizzazione della qualità e dell'efficienza del servizio di trasporto. Il sistema di bordo fornisce al conducente un flusso costante di informazioni di ausilio al corretto svolgimento del servizio offerto ai passeggeri.
Il sistema di bordo "dialoga" con i posti periferici di rilevamento in modo da localizzare esattamente il rotabile lungo una data linea.
Tutti i dati di servizio di ogni giorno, vengono raccolti dal sistema in un database che comprende eventi, i transiti sui sensori di rilevamento ed i cambiamenti di stato.
Inoltre, il sistema di bordo **gestisce gli apparati informativi collocati a bordo veicolo del rotabile, ed in particolare i pannelli a messaggio variabile e gli apparati di diffusione sonora**.
Le suddette funzionalità sono gestite grazie uno specifico applicativo software dedicato che si occupa dell'acquisizione delle informazioni relative ai dispositivi installati sui rotabili al fine di rappresentarne lo stato e agire su di essi in coerenza alla posizione del veicolo lungo il tracciato, anche in relazione ai dati istantanei cinematici (es. velocità).

10. INSTRADAMENTI

L'instradamento è l'azione di attraversamento dal punto iniziale al punto finale di una data rotta. Quest'ultima si definisce sulla scorta di due distinte informazioni:

- la traiettoria (cioè l'insieme dei punti percorsi) associata alla posizione del rotabile per raggiungere il punto di destinazione a partire dal punto di origine;
- il verso di percorrenza.

Per ogni instradamento consentito vi sono, poi, instradamenti con esso compatibili e incompatibili.
Gli instradamenti possibili e, per ognuno di questi, la compatibilità e l'incompatibilità con gli altri presenti, è indicata, per ogni zona, dalle relative **tabelle di incompatibilità**.
La tabella delle incompatibilità è identificata da una matrice quadrata, in cui ad ogni riga/colonna corrisponde una determinata rotta (e quindi un determinato instradamento).

All'interno della matrice, la posizione (i, j) indica la compatibilità fra la rotta i e la rotta j: se alla posizione i, j corrisponde la X, allora la tratta i è incompatibile con la rotta j, diversamente le due tratte sono compatibili.

10.1 PECULIARITÀ DELL'ESERCIZIO TRANVIARIO

È stato già precisato che la gestione della circolazione tranviaria avverrà su base oraria. L'operatore Posto Centrale di Controllo (PCC) cui sono assegnate le funzioni di supervisione , mediante il collegamento radio con ogni rotabile dovrà inviare le opportune informazioni ai conducenti.

Ogni conducente dovrà rispettare l'orario di servizio e guidare il Tram con regime di "guida a vista". Il Conducente deve pertanto avere una condotta di guida tale da poter arrestare prontamente il veicolo all'interno del tratto di visuale libera (visuale disponibile) qualora se ne manifesti la necessità. **La guida a vista è comunque integrata da dispositivi di ausilio alla condotta di guida**, a cui il conducente dovrà attenersi per la conduzione del veicolo. È bene precisare che dette informazioni non sollevano il Conducente dalle proprie responsabilità derivanti da eventuali incidenti o errori.

L'esecuzione di ogni instradamento richiede tre diverse fasi; ogni fase richiede l'espletamento di diverse azioni. Le fasi sono:

1. **Prenotazione**: può avvenire con diverse modalità, ed in particolare mediante occupazione di un CDB o transito su un loop;
2. **Verifica**: viene espletata dal PPC o dal PCC e consta nella verifica che non siano in atto prenotazioni o attuazioni di instradamenti conflittuali con quello richiesto;
3. **Attuazione**: inizia con la movimentazione del rotabile tranviario e termina con l'occupazione dell'ultimo CDB presente lungo la rotta. Durante l'attuazione avviene anche la movimentazione, da parte del PPC, delle casse di manovra elettriche.

A partire dall'istante di tempo in cui inizia l'attuazione di un instradamento sino all'istante in cui questo termina, vengono bloccati tutti gli instradamenti con esso incompatibili.

Le prenotazioni di instradamento incompatibili con quello in atto, sono prese in consegna dal PPCL, memorizzate e soddisfatte solo a conclusione dell'instradamento in atto.

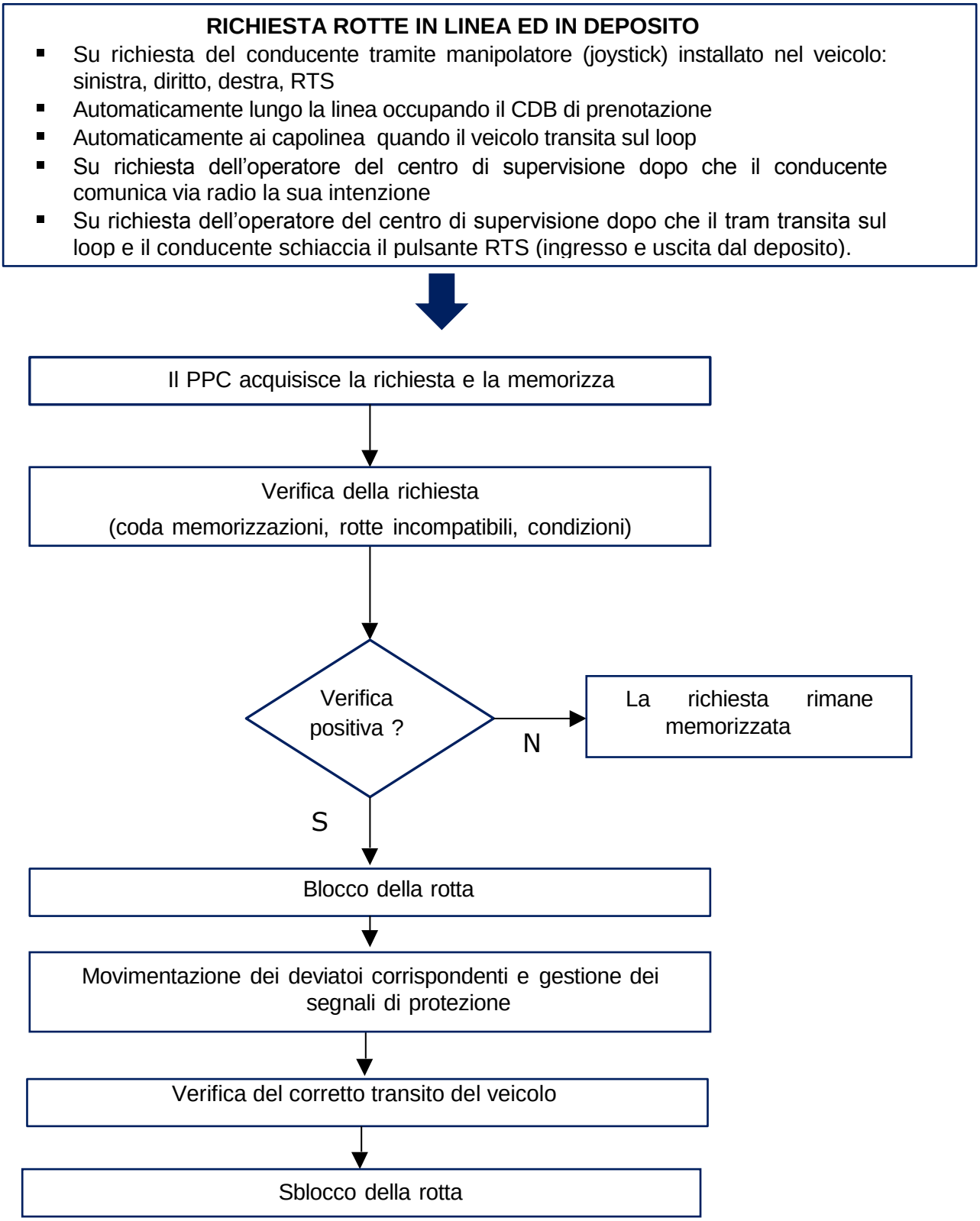


Figura 25: Flussogramma rappresentativo della logica di esecuzione dell'instradamento di un rotabile

11. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Tutti gli impianti prima descritti dovranno essere conformi alle seguenti principali norme tecniche vigenti, ed in particolare a quelli di seguito elencate.

SICUREZZA SUL LUOGO DI LAVORO

D. Lgs. 9 aprile 2008, n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n.123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

NORME ISO

ISO 9001: 2000 Sistemi di Gestione per la qualità – Requisiti

NORME UNI

UNI 7156:2008 Tranvie e tranvie veloci - Distanze minime degli ostacoli fissi dal materiale rotabile e interbinario - Altezza della linea aerea di contatto.
UNI EN 124:1995 Dispositivi di coronamento e di chiusura per zone di circolazione utilizzate da pedoni e da veicoli. Principi di costruzione, prove di tipo, marcatura, controllo di qualità
UNI EN 12368 Attrezzatura per il controllo del traffico - Lanterne semaforiche

NORME EUROPEE

D. L. 06 novembre 2007, n. 194 "Attuazione della Direttiva 2004/108/CE concernente il riavvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alla compatibilità elettromagnetica e che abroga la Direttiva 89/336/CEE".
Direttiva 2004/108/CE del Parlamento europeo e del consiglio del 15 dicembre 2004 concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alla compatibilità elettromagnetica e che abroga la Direttiva 89/336/CEE.

SISTEMA TECNOLOGICO INTEGRATO - TRAZIONE

Posto Periferico di Controllo e Posto Periferico di Rilevamento
CEI EN 50121-4 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Compatibilità elettromagnetica Parte 4: Emissione ed immunità delle apparecchiature di segnalamento e telecomunicazioni. (2007-06)
CEI EN 50122-1 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi – Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti di protezione contro lo shock elettrico. (2012-02)
CEI EN 50122-2 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Impianti fissi – Sicurezza elettrica, messa a terra e circuito di ritorno Parte 1: Provvedimenti contro gli effetti delle correnti vaganti causate da sistemi di trazione a corrente continua. (2012-02).

SISTEMA TECNOLOGICO INTEGRATO - POSTO PERIFERICO DI CONTROLLO

CEI EN 50126-1 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane La specificazione e la dimostrazione di Affidabilità, Disponibilità, Manutenibilità e Sicurezza (RAMS). (2000-03)

CEI EN 50128Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Sistemi di telecomunicazione, segnalamento ed elaborazione - Software per sistemi ferroviari di comando e di protezione. (2011-11)
CEI EN 50129Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane Sistemi di telecomunicazione, segnalamento ed elaborazione - Sistemi elettronici di sicurezza per il segnalamento. (2004-01 ed. Seconda)
CEI EN 50124-1 Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filotranviarie, metropolitane Coordinamento degli isolamenti Parte 1: Requisiti base - Distanze in aria e distanze superficiali per tutta l'apparecchiatura elettrica ed elettronica. (2001-09)

INVOLUCRI DI PROTEZIONE
CEI EN 60529Gradi di protezione degli involucri (Codice IP). (2000-06)

APPARECCHIATURE
CEI EN 60439-1 Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT) Parte 1: Regole generali (2012-09)
CEI EN 60439-3 Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per bassa tensione (quadri BT) Parte 3: Prescrizioni particolari per apparecchiature assiemate di protezione e di manovra destinate ad essere installate in luoghi dove personale non addestrato ha accesso al loro uso Quadri di distribuzione (ASD). (2001-10)
CEI EN 60947-1 Apparecchiature a bassa tensione Parte 1: Regole generali (2008- 02)
CEI EN 60947-2 Apparecchiature a bassa tensione Parte 2: Interruttori automatici (2010-10)
CEI EN 60947-3 Apparecchiatura a bassa tensione Parte 3: Interruttori di manovra, sezionatori, interruttori di manovra-sezionatori e unità combinate con fusibili. (2012-08)
CEI EN 60947-7-1 Apparecchiature a bassa tensione Parte 7-1: Apparecchiature ausiliarie - Morsetti componibili per conduttori di rame. (2010-04)

CAVI PER ENERGIA
CEI 20-67 Guida per l'uso dei cavi 0,6/1 KV. (2013-09)

APPARECCHIATURE A BASSA TENSIONE
CEI EN 60898-1 Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e similari Parte 1: Interruttori automatici per funzionamento in corrente alternata. (2013-04)

IMPIANTI ELETTRICI UTILIZZATORI DI BASSA TENSIONE (FINO A 1000 V IN C.A. E A 1500 V IN C.C.)
CEI 64-8/1 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 1: Oggetto, scopo e principi fondamentali. (2012-06)
CEI 64-8/2 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 2: Definizioni. (2012-06)
CEI 64-8/3 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua – Parte 3: Caratteristiche generali. (2012-06)

CEI 64-8/4 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 4: Prescrizioni per la sicurezza. (2012- 06)
CEI 64-8/5 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 5: Scelta ed installazione dei componenti elettrici. (2012-06)
CEI 64-8/6 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 6: Verifiche. (2012-06)
CEI 64-8/7 Impianti elettrici utilizzatori a tensione nominale non superiore a 1000 V in corrente alternata e a 1500 V in corrente continua - Parte 7: Ambienti ed applicazioni particolari. (2012-06)

GESTIONE E CONTROLLO DEL TRAFFICO E DEI TRASPORTI STRADALI
CEI 214-1/1 Dispositivi per il rilevamento della presenza o passaggio dei veicoli stradali, con principio di funzionamento a variazione di induzione elettromagnetica: spire Parte 1: Requisiti d'installazione. (1998-06)
CEI EN 50293Compatibilità elettromagnetica - Impianti semaforici - Norma di prodotto. (2001-07)

SICUREZZA DELLE APPARECCHIATURE ELETTRONICHE PER TECNOLOGIA AUDIO/VIDEO, DELL'INFORMAZIONE E DELLE TELECOMUNICAZIONI
CEI EN 60950-1 Apparecchiature per la tecnologia dell'informazione - Sicurezza Parte 1: Requisiti generali. (2010-03)

COMPATIBILITÀ ELETTROMAGNETICA
CEI EN 61000-3-2 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 3-2: Limiti - Limiti per le emissioni di corrente armonica (apparecchiature con corrente di ingresso <= 16 A per fase). (2007-04)
CEI EN 61000-3-3 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 3-3: Limiti - Limitazione delle variazioni di tensione e del flicker in sistemi di alimentazione in bassa tensione per apparecchiature con corrente nominale <= 16 A e non soggette ad allacciamento su condizione. (1997-06)
CEI EN 61000-4-2 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura Sezione 2: Prove di immunità a scarica di elettricità statica. (2010-01)
CEI EN 61000-4-3 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura - Sezione 3: Prova d'immunità sui campi elettromagnetici a radiofrequenza irradiati. (2011-11)
CEI EN 61000-4-4 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura Sezione 4: Prova di immunità a transitori/treni elettrici veloci Pubblicazione Base EMC. (2006-01)
CEI EN 61000-4-5 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura Sezione 5: Prova di immunità ad impulso. (1997-06)
CEI EN 61000-4-6 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 4: Tecniche di prova e di misura Sezione 6: Immunità ai disturbi condotti, indotti da campi a radiofrequenza. (1997-11)
CEI EN 61000-6-1 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 6-1: Norme generiche - Immunità per gli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera (2007-10)

CEI EN 61000-6-2 Compatibilità elettromagnetica (EMC) - Parte 6-2: Norme generiche - Immunità per gli ambienti industriali (2006-10)
CEI EN 61000-6-3 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 6-3: Norme generiche - Emissione per gli ambienti residenziali, commerciali e dell'industria leggera (2007-11)
CEI EN 61000-6-4 Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 6-4: Norme generiche - Emissione per gli ambienti industriali (2007-11)
CEI EN 55011Apparecchi industriali, scientifici e medicali (ISM) Caratteristiche di radiodisturbo Limiti e metodi di misura (2013)
CEI EN 55022Apparecchi per la tecnologia dell'informazione Caratteristiche di radiodisturbo Limiti e metodi di misura (2011-10)

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Becker, F. *Catenary Free Operation of Light Rail Vehicles – Topology and Operational Concept*. 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), 5-9 Sept. 2016.
2. Veyrunes, P., Duprat, P., Hourtnae J.L. *Ground-level feeding systems from rail to road*, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).
3. Mayer, L. *Impianti ferroviari - Tecnica ed Esercizio*. Cifi, 2003
4. ARST S.p.A., *Documentazione Progetto preliminare metropolitana Cagliari*.
5. Bonora G., Focacci L. *Funzionalità e Progettazione degli Impianti Ferroviari*, CIFI 2002
6. Korve, H. W., et. al.,TCRP Report 69: *Light Rail Service: Pedestrian and Vehicular Safety,* Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2001
7. Pecheux, K. K., et. al.,TCRP Synthesis 79: *Light Rail Vehicle Collisions with Vehicles at Signalized Intersections. A Synthesis of Transit Practice*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2009
8. *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (MUTCD), 2009 Edition, Federal Highway Administrator, Washington, D.C., December 2009
9. JOSÉ IGNACIO FARRÁN, *Innovative Traffic Control Practices for Light Rail Transit*, A European Perspective. Transportation Research Ciruclar (Number E-C112), January 2007. Joint International Light Rail Conference, April 9–11, 2006, St. Louis, MissouriTRB.
10. N. Meshkati, et. al., *A Study of the exposition Light-Rail's safety for Pedestrian and Drivers*, METRANS Project 05-13, Metrans transportation center, May 2007