



## Analisi della disponibilità di una rete di comunicazione radiomobile con riferimento ad applicazioni ferroviarie

### *Analysis of a radio mobile communication network availability with reference to railway applications*

Maria CATALDO <sup>(\*)</sup>  
 Giuseppe FAZIO <sup>(\*\*)</sup>  
 Mauro GIACONI <sup>(\*\*)</sup>  
 Diego SCHIAVONI <sup>(\*\*\*)</sup>  
 Fabio SENESI <sup>(\*\*\*)</sup>

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.0708.2023.ART.2>)

**Sommario** - RFI e l'Università di Roma Tor Vergata hanno avviato nel 2018 una ricerca sul sistema radiomobile che potrebbe sostituire il GSM-R. All'inizio dello studio, LTE era un ottimo candidato per questo ruolo; tuttavia, il proseguimento della ricerca e la rapida maturazione del 5G hanno modificato la prospettiva applicativa a favore di quest'ultima tecnologia. Segnaliamo che il risultato di questo studio può essere utilizzato, per l'utilità metodologica, come base per le valutazioni RAMS del sistema 5G. L'obiettivo di questo lavoro di ricerca è quello di eseguire un'analisi di affidabilità e selezionare il modello LTE (*Long term Evolution*) più adatto in base alle esigenze del Gestore dell'infrastruttura italiana (RFI-Rete Ferroviaria Italiana). Attraverso lo strumento Isograph, questo lavoro di ricerca ha progettato 6 modelli di rete LTE. Il Modello 5 consente alla rete LTE di avere un'architettura ridondante nelle parti centrali, di essere distribuita su diversi nodi (geografici) e di lavorare nell'area del *pool*. In conclusione, questo lavoro di ricerca mostra che il Modello 5 è un equilibrio adeguato che unisce, oltre al valore del *down-time* totale, l'elevata disponibilità e la possibilità di avere un'architettura di rete ridondante. Tali vantaggi consentono a RFI (Rete Ferroviaria Italiana) di soddisfare i requisiti di sicurezza dell'ERTMS.

### 1. Introduzione

La principale letteratura si è ampiamente occupata dell'affidabilità e della disponibilità dei sistemi sin dagli anni '50, tuttavia l'analisi dell'affidabilità per le reti di comunicazione non è stata studiata a fondo [8]. L'obiettivo di questo lavoro di ricerca è quello di colmare questa la-

**Summary** - RFI and the University of Rome Tor Vergata launched in 2018 a research on the mobile radio system that could replace the GSM-R. At the start of the study, LTE was a strong candidate for this role; however, the continuation of research and the rapid maturation of 5G have changed the application perspective in favour of the latter technology. We point out that the result of this study can be used for the methodological utility as basis for RAMS evaluations of the 5G system. The goal of this research work is to perform a reliability analysis and select the most suitable LTE (*Long term Evolution*) model according to Italian Infrastructure Manager's (RFI-Rete Ferroviaria Italiana) needs. Through the Isograph tool, this research work has designed 6 LTE network models. Model 5 allows the LTE network to have a redundant architecture in the core parts, to be deployed to different (geographical) nodes and to work in the pool area. In conclusion, this research work shows that Model 5 is an adequate balance that combines, besides the value of total down-time, the high availability and the possibility to have a redundant network architecture. Those advantages enable RFI (Rete Ferroviaria Italiana) to satisfy the safety requirements of ERTMS.

### 1. Introduction

The mainstream literature has widely dealt with the reliability and availability of systems since 1950s, however the reliability and availability analysis for communication network for railways has not been thoroughly investigated [8]. The goal of this research work is to bridge this gap relative to mobile radio network by investigating reliability analyses for an LTE network applied to a railway system

<sup>(\*)</sup> Dottore di ricerca, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma "Tor Vergata" e RFI Inc.

<sup>(\*\*)</sup> Facoltà di Ingegneria, Università di Roma "Tor Vergata".

<sup>(\*\*\*)</sup> Direzione Tecnica Rete Ferroviaria Italiana.

<sup>(\*)</sup> PhD, Faculty of Engineering, University of Rome "Tor Vergata" and RFI Inc.

<sup>(\*\*)</sup> Faculty of Engineering, University of Rome "Tor Vergata".

<sup>(\*\*\*)</sup> Technical Direction Rete Ferroviaria Italiana.

cuna relativa alla rete radio mobile indagando analisi di affidabilità per una rete LTE applicata a un sistema ferroviario e selezionare il modello LTE più adatto in base alle esigenze del Gestore dell'infrastruttura italiano, con particolare importanza alla disponibilità dell'intera rete.

In questa prospettiva, l'affidabilità dei singoli componenti è solo il punto di partenza per realizzare un'architettura di rete ridondante che garantisca la disponibilità desiderata.

Le analisi di affidabilità sono state presentate e discusse con un team di ingegneri di RFI coinvolti nella tecnologia dei sistemi di telecomunicazione.

Dal 2004, la ferrovia ha adottato il GSM-R come standard mobile internazionale per la comunicazione ferroviaria europea. La rete GSM-R si interfaccia con il sistema di segnalamento ferroviario, che è l'ETCS, ed entrambi fanno parte dell'ERTMS. Lo sviluppo della tecnologia ferroviaria porterà all'implementazione dell'ERTMS sull'intera infrastruttura europea. Il sistema europeo di controllo dei treni (ETCS) è il principale sistema di segnalamento per la funzionalità di controllo dei treni. In futuro, ETCS sarà fornito sulla rete mobile di nuova generazione (FRMCS) [3]. Il sistema globale per le comunicazioni mobili-ferrovie (GSM-R) fornisce attualmente la comunicazione tra gli elementi ETCS. Il GSM-R, attualmente in vigore, è stato sviluppato appositamente per la comunicazione ferroviaria, ma è ormai una tecnologia obsoleta con limiti noti, soprattutto nelle prestazioni dei meccanismi di trasmissione dati e video [4].

L'uso inefficiente delle risorse di rete, la mancanza di capacità e il supporto limitato per la comunicazione dati a banda larga sono i principali problemi del GSM-R, principalmente perché il GSM-R è stato progettato per la comunicazione vocale, la capacità di comunicazione dati è molto limitata tramite GPRS. Le tecnologie alternative orientate ai pacchetti offrono una straordinaria flessibilità in termini di applicazioni, grandi capacità per considerevoli risorse radio e per l'incremento delle tecnologie trasmissive. Le nuove tecnologie di rete sono allo studio per sostituire il GSM-R in futuro, soprattutto perché si ritiene che il supporto per il GSM-R terminerà nel 2030 (come indicato dal GSM-R Industry Group) [2][12][13][14]. È importante che le ferrovie gestiscano la fine del GSM-R e riducano la possibilità che il sistema radio non sia disponibile per il funzionamento dei treni dopo questo appuntamento. La scelta del nuovo standard per le telecomunicazioni (FRMCS) deve basarsi su uno studio di fattibilità esaustivo in grado di garantire l'efficacia del sistema di comunicazione mobile ferroviario [4].

Sono stati condotti diversi studi sui FRMCS. Una delle possibilità era l'LTE [3]. Il successore del GSM-R sarà il 5G. All'inizio di questo lavoro di ricerca, l'LTE era considerata la tecnologia più aggiornata [1][10]. Questo lavoro di ricerca è rilevante perché non solo ha approfondito l'analisi di affidabilità per la rete LTE [9] ma ha anche posto le basi per l'analisi di affidabilità del 5G, per la quale

## Acronimi Acronyms

Acronimo Acronym	Significato Meaning
E-UTRAN	<i>Evolved UTRAN</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
FRMCS	<i>Future Railway Mobile Communication System</i>
FT	<i>Fault Tree</i>
LTE	<i>Long Term evolution</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failure</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair</i>
MTBR	<i>Mean Time Between Repair</i>
MME	<i>Mobile Management Entity</i>
NE	<i>Network Element</i>
NW	<i>Network</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PDN-GW	<i>Packet Data Network</i>
RBD	<i>Reliability Block Diagrams</i>
RFI	<i>Rete Ferroviaria Italiana (Italian Railway Infrastructure Manager)</i>
UE	<i>User Equipment</i>

and select the most suitable LTE model according to Italian Infrastructure Manager's needs, with particular importance to the availability of the all network. In this perspective, the reliability of the individual components is only the starting point for creating a redundant network architecture that ensures the desired availability. The analyses have been presented to and discussed with a RFI's team of engineers involved in Telecommunication system technology. Since 2004, the railway has adopted the GSM-R as the international mobile standard for European railway communication. The GSM-R network interfaces with the railway signalling system, which is the ETCS, and both are parts of the ERTMS. The railway technology development will lead to the implementation of the ERTMS on the entire European infrastructure. The European Train Control System (ETCS) is the leading signaling system for train control functionality. In the future, ETCS will be provided over new generation (FRMCS) mobile network [3]. The Global System for Mobile Communications-Railways (GSM-R) currently provides communication between the ETCS elements. GSM-R, which is currently in place, was developed specifically for railway communication, but is now an outdated technology with known limitations, es-

devono ancora essere effettuati i test sul campo. L'architettura e le funzioni del modello di rete 5G sono molto simili a LTE, pertanto questo lavoro di ricerca può essere facilmente e rapidamente adattato al 5G perché le due reti sono una naturale evoluzione dell'altra. Le caratteristiche e le funzioni di questa rete (5G) sono architettonicamente molto simili a quelle del LTE, per il quale esistono dati operativi in campo e le cui performance di disponibilità sono sicuramente paragonabili a quelle del 5G.

Per questo motivo, questa analisi della disponibilità del LTE è una premessa naturale per una corrispondente analisi per il 5G, probabilmente con caratteristiche migliori, quando saranno disponibili i dati operativi di questo sistema.

## 2. Modelli

Questo lavoro di ricerca ha analizzato diversi strumenti e alla fine ha deciso di utilizzare il tool Isograph [6], perché Isograph fornisce un sistema che è modellato in un formato grafico di facile comprensione e consente l'analisi per l'affidabilità, manutenibilità, classe di disponibilità e sicurezza, utilizzando un pacchetto software, come Availability Workbench, HAZOP +, NAP e AttackTree [6][5]. Utilizzano modelli di affidabilità, come FT e RBD, per prevedere l'affidabilità e il costo del ciclo di vita del sistema. In questo lavoro di ricerca è stato utilizzato il Network Block Diagram.

La rete LTE è stata progettata per l'ambito ferroviario. Sono state individuate le componenti ferroviarie e la rete è stata caratterizzata per architettura e design. I dati per ogni componente sono stati forniti da un fornitore internazionale, selezionando i valori caratteristici per ogni elemento ferroviario. I collegamenti ottici si trovano tra eNodeB e MME, tra eNodeB e SGW e tra MME e SGW.

Il primo modello Fig. 1 è stato progettato con un'archi-

tecipally in the performance of data transmission mechanisms and video [4].

Inefficient use of network resources, a lack of capacity and limited support for broadband data communication are the main problems of GSM-R, mainly because the GSM-R was designed for voice communication, there is very limited capacity data packed communication using GPRS. Alternative packet-oriented technologies offer extraordinary flexibility in terms of applications, large capacities for considerable radio resources and for the increase of transmission technologies. The new network technologies are under consideration to replace GSM-R in the future, especially because support for GSM-R is deemed to come to an end in 2030 (as indicated by the GSM-R Industry Group) [2][12][13][14]. It is important for railways to manage the end of GSM-R and mitigate the possibility of the radio system being unavailable for train operation after this appointment. The choice of the new standard for telecommunications must be based on an exhaustive feasibility study capable of guaranteeing the effectiveness of the railway mobile communication system [4]. Several studies investigating FRMCS have been carried out. One of the possibilities was the LTE [3]. The successor of GSM-R shall be the 5G. When this research work began, the LTE was regarded as the most updated technology [1][10]. This research work is relevant because it has not only analyzed in depth the reliability analysis for the LTE network [9] but it has also laid the groundwork for the reliability analysis of the 5G, for which the on-field tests are still to be carried out. The architecture and the functions of the 5G network model are very similar to LTE therefore this research work can be easily and quickly adapted to 5G because the two networks are a natural evolution of the other.

The characteristics and functions of this network (5G) are architecturally very similar to those of LTE, for which there are operational data in the field and whose availability performance is certainly comparable with those of 5G.

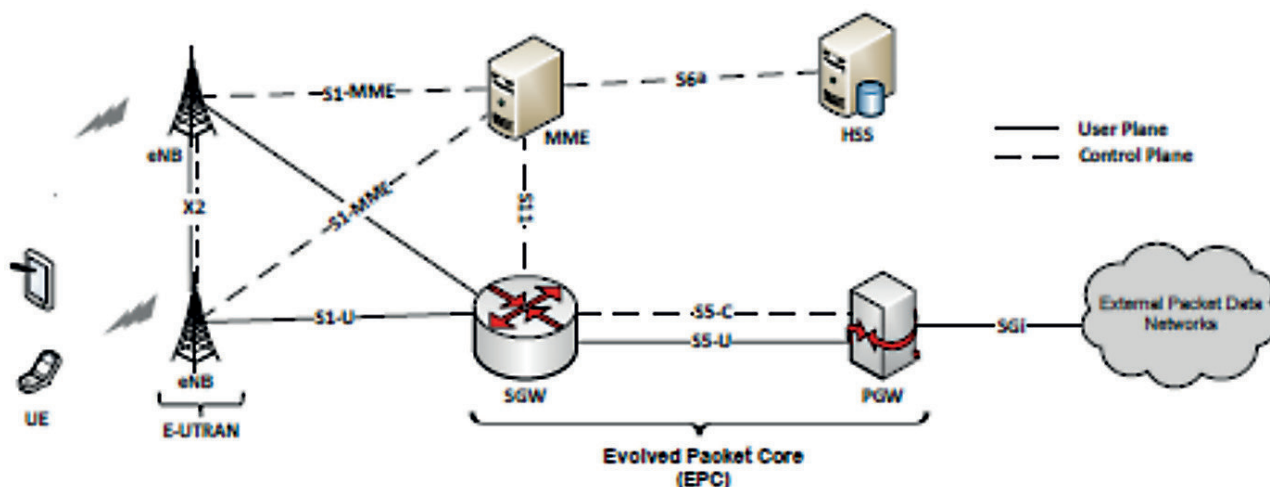


Figura 1 – Architettura LTE Modello 1.  
Figure 1 – Model 1 LTE Architecture.



tettura LTE standard. Le parti della rete che compongono l'EPC sono *Serving Gateway* (SGW), *PDN Gateway* (PGW), *Mobility Management Entity* (MME). L'UE si collega all'eNB e i dati vengono instradati all'SGW e al PGW mentre il controllo del traffico viene eseguito dall'MME. Il ruolo dell'MME è molto importante perché gestisce la connessione di rete. In particolare, MME è il principale nodo di segnalazione nell'EPC. L'MME è coinvolto nell'autenticazione e autorizzazione dell'UE, nella configurazione della sessione UE e per la mobilità. SGW e PGW sono coinvolti nell'inoltro dei dati, nella mobilità IP e nel controllo QoS sui dati.

Le misurazioni sono state effettuate utilizzando modelli appositamente costruiti come segue:

- Il Modello 1 include 1 eNodeB, 1 MME, 1 S-GW, 1 PDN-GW.
- Il Modello 2 include 1 eNodeB, 1 MME, 2 S-GW, 1 PDN-GW.
- Il Modello 3 include 1 eNodeB, 2 MME, 2 S-GW, 1 PDN-GW.
- Il Modello 4 include 1 eNodeB, 2 MME, 1 S-GW, 1 PDN-GW.
- Il Modello 5 include 1 eNodeB, 2 MME, 2 S-GW, 2 PDN-GW.
- Il Modello 6 include 1 eNodeB, 2 MME, 1 S-GW, 2 PDN-GW.

LTE è il primo esempio di rete che introduce, in modo sistematico, un'area *pool*. Non è solo un problema di ridondanza ma un problema più "filosofico", legato alla distribuzione delle risorse. LTE applica un approccio condiviso di *pool* di risorse ed è quindi adatto per la distribuzione delle risorse nell'area del *pool*. Il primo modello è stato progettato partendo da un modello caratterizzato da un'architettura standard LTE. Gli altri modelli sono stati progettati duplicando alcuni specifici elementi di rete seguendo la "filosofia" LTE, ovvero mettendo alcuni dispositivi di rete in *hot standby* e successivamente i risultati sono stati confrontati. Di seguito alcune ipotesi e considerazioni sulla rete LTE per il sistema ferroviario:

Il sistema di telecomunicazioni ferroviarie (attualmente è il GSM-R, mentre per il futuro consideriamo FRMCS) deve interfacciarsi con il segnalamento ferroviario (ETCS) e il valore del tempo totale di inattività del modello LTE non deve pregiudicare l'intero sistema ERTMS, perché deve rimanere in un determinato intervallo come spiegato nei paragrafi seguenti.

I modelli che questo lavoro di ricerca propone, come dettagliato nei paragrafi seguenti, hanno una classe di disponibilità pari a 4 (99.99) [7].

Questo lavoro di ricerca ha analizzato, con un team di ingegneri RFI, la possibilità di avere una rete ferroviaria LTE con una classe di disponibilità pari a 5 (99.999). Dopo un'analisi più approfondita questo lavoro di ricerca è giunto alla conclusione che per il Gestore dell'Infrastruttura italiano è sufficiente disporre di un sistema *fault tol-*

*For this reason, this analysis of LTE availability is a natural premise for a corresponding analysis for 5G, probably with better characteristics, when the operational data of this system will be available.*

## 2. Models

*This research work has analysed different tools and it has finally decided to use the Isograph tool [6], because Isograph provides a system that is modelled in an easy-to-understand graphical format and it allows analysis for reliability, maintainability, availability class and security, using a software package, such as Availability Workbench, HAZOP +, NAP and AttackTree [5][6]. They utilize the reliability models, such as FT and RBD, to predict the reliability, and life cycle cost of the system. In this research work Network Block Diagram has been used. The LTE network for railway scope has been designed.*

*The Railway components have been identified, the network has been characterized for architecture and design.*

*Optical links are located between eNodeB and MME, between eNodeB and SGW and between MME and SGW.*

*The first model Fig. 1 has been designed with a standard LTE architecture. The parts of the network that make up the EPC are Serving Gateway (SGW), PDN Gateway (PGW), Mobility Management Entity (MME). The UE connects to the eNB, and the data is routed to the SGW and the PGW while the traffic control is done by the MME. The role of the MME is very important because it manages the network connection. Notably, MME is the main signalling node in the EPC. The MME is involved in authenticating and authorizing the UE, configuring the UE session and for mobility. SGW and PGW are involved in data forwarding, IP mobility and QoS control on the data.*

*Measurements were taken using purpose-built models as following:*

- *Model 1 includes 1 eNodeB, 1 MME, 1 S-GW, 1 PDN-GW.*
- *Model 2 includes 1 eNodeB, 1 MME, 2 S-GW, 1 PDN-GW.*
- *Model 3 includes 1 eNodeB, 2 MME, 2 S-GW, 1 PDN-GW.*
- *Model 4 includes 1 eNodeB, 2 MME, 1 S-GW, 1 PDN-GW.*
- *Model 5 includes 1 eNodeB, 2 MME, 2 S-GW, 2 PDN-GW.*
- *Model 6 includes 1 eNodeB, 2 MME, 1 S-GW, 2 PDN-GW.*

*LTE is the first example of a network that introduces, in a systematic way, a pool area. It is not only an issue of redundancy but a more "philosophical" issue, related to resources deployment. The LTE applies a shared pool of resources approach, and it is therefore suitable for the distribution of resources in the pool area. The first model has been designed starting from a model characterized by an LTE standard architecture. The other models have been de-*

*rant*, che è un equilibrio adeguato che unisce l'elevata disponibilità e la possibilità di avere un'architettura di rete ridondante (*core parts*).

## 2.1. Risultati

Prima di confrontare i parametri risultanti dei diversi modelli con gli ingegneri di RFI, questo lavoro di ricerca trae le seguenti considerazioni:

1. I modelli sono stati progettati tenendo in considerazione una Classe di Disponibilità 4, ovvero "4 nove". Il primo parametro che questo lavoro di ricerca ha considerato è la Classe di disponibilità.
2. La classe di disponibilità è un parametro importante, ma non è molto sensibile a piccoli cambiamenti. Il parametro più sensibile è invece il *down time* totale.
3. Considereremo dapprima il contesto del lavoro di ricerca in cui i modelli sono stati progettati e sviluppati. La rete di telecomunicazioni, oggetto di questo lavoro di ricerca, si applica ad una rete ferroviaria.
4. In questo studio di ricerca abbiamo tenuto conto delle esperienze fatte da altri paesi adattandole alle esigenze delle ferrovie italiane [15].

La rete LTE (attualmente la rete GSM-R, e in futuro il FRMCS) si interfaccia con il sistema di segnalamento ferroviario, che è l'ETCS, entrambi fanno parte dell'ERTMS. Esiste, quindi, il probabile rischio che un guasto alla rete possa comportare un'interruzione dell'intero traffico ferroviario limitato al territorio servito.

Per il sistema ETCS è accettabile avere un *down time* totale di 8 minuti all'anno per *blocking faults*, cioè guasti che impediscono il traffico ferroviario limitatamente all'area servita. Pertanto, il tempo di inattività totale dell'intera rete deve tenere conto di tale valore.

Dopo aver effettuato un'analisi di affidabilità con lo strumento Isograph, i risultati ottenuti sono riportati di seguito nella Tab. 1, i dati per ogni componente sono stati forniti da un fornitore internazionale, selezionando i valori caratteristici per ogni elemento ferroviario in assenza di specifiche internazionali.

Confrontando i diversi modelli, il tempo di inattività totale diminuisce da 1.016 ore all'anno (Modello 1) a 0,1457 ore all'anno (Modello 5). Nel Modello 1 il tempo di inattività totale è di 1.016 ore all'anno, se aggiungiamo un altro componente nella rete principale (SG-GW), il valore del tempo di inattività totale diminuisce. Nel Modello 2, il progetto fornisce 2 S-GW e il tempo di inattività totale scende a 0,6458 ore all'anno. Aggiungendo un ulteriore MME, come nel Modello 3, il valore totale del tempo di inattività migliora ulteriormente, scendendo a un valore totale di 0,2254 ore all'anno. Rispetto al Modello 4, nel Modello 6 è stato aggiunto un ulteriore PDN-GW, tuttavia il tempo di inattività totale è ancora superiore al requisito obbligatorio di 8 minuti all'anno. Il modello che presenta il valore di *down time* totale più basso è il Modello 5, dove il tempo scende a 0,1457 ore all'anno (8 minuti all'anno).

*signed by duplicating some specific network elements following LTE "philosophy", meaning putting some network devices in hot standby and later the results have been compared. The following are some assumptions and considerations about the LTE network for railway system:*

*The railway telecommunication system (currently it is the GSM-R, whereas for the future we consider the FRMCS) has to interface with the railway signaling (ETCS) and the total down time value of the LTE model shall not jeopardize the entire ERTMS system, because it shall remain in a given range as explained in the following paragraphs.*

*The models that this research work study proposes, as detailed in the following paragraphs, have a availability class equal to 4 (99.99) [7].*

*This research work has analyzed, with a RFI team of engineers, the possibility to have an LTE railway network with an availability class equal to 5 (99.999). After a deeper analysis this research work has come to the conclusion that for the Italian Infrastructure Manager it is sufficient to have a fault tolerant system, which is an adequate balance that combines the high availability and the possibility to have a redundant network architecture (core parts).*

## 2.1. Numerical results

*Before comparing the resulting parameters of the different models with RFI engineers, this research work draws the following considerations:*

1. *The models have been designed taking into consideration an Availability class 4, meaning "4 nines". The first parameter that this research work has considered is the availability Class.*
2. *Availability Class is an important parameter, but it is not very sensitive to small changes. The most sensitive parameter is instead the total down time.*
3. *We shall at first consider the research work context in which models have been designed and developed. The telecommunication network, considered by this research work, applies to a railway network.*
4. *In this research study we have taken into account the experiences of other countries [15], adapting them to the needs of the Italian railways.*

*The LTE network (currently the GSM-R network, and in the future the FRMCS) interfaces with the railway signaling system, which is the ETCS, both are parts of the ERTMS. Therefore, there is the likely risk that a fault in the network may bring to a disruption of the entire rail traffic limited to the area served.*

*For the system ETCS it is acceptable to have a total down time of 8 minutes per year for blocking faults, meaning faults that impede rail traffic limited to the area served. Therefore, the total down time of the entire network has to take that value into account.*

*After carrying out a reliability analysis with the Isograph Tool, the results obtained are shown below in Tab. 1, the data*

Tabella 1 – Table 1

Comparazione dei sei modelli sulla base dei parametri dell'analisi di affidabilità  
*The six models compared on the bases of the reliability analysis parameters*

Parametro <i>Parameter</i>	Modello 1 <i>Model 1</i>	Modello 2 <i>Model 2</i>	Modello 3 <i>Model 3</i>	Modello 4 <i>Model 4</i>	Modello 5 <i>Model 5</i>	Modello 6 <i>Model 6</i>
Indisponibilità <i>Unavailability</i>	0,000116	7,372E-05	2,573E-05	4,227E-05	1,663E-05	4,288E-05
Numero previsto di guasti (FITS) <i>Number expected failures (FITS)</i>	0,2921	0,1724	0,1549	0,2746	0,07516	2,439E+04
Inaffidabilità <i>Unreliability</i>	0,2533	0,1584	0,1435	0,2402	0,07241	0,1923
MTBF (hrs) <i>MTBF (hrs)</i>	2,999E+04	5,08E+04	5,654E+04	3,19E+04	1,165E+05	4,101E+04
MTTR (hrs) <i>MTTR (hrs)</i>	3,48	3,745	1,455	1,348	1,938	1,759
Total down time (hrs) <i>Total down time (hrs)</i>	1,016	0,6458	0,2254	0,3703	0,1457	0,3757
Affidabilità <i>Reliability</i>	0,7467	0,8416	0,8565	0,7598	0,9276	0,8077
Classe di disponibilità <i>Availability Class</i>	4	4	4	4	4	4

Confrontando i diversi modelli, il Modello 5 ha il miglior design: due MME, due S-GW e due PDN-GW. Il modello 5 ha un'architettura ridondante nelle parti principali e può essere distribuito a diversi nodi di rete (geografici) che possono funzionare nell'area del *pool*.

Se si verifica un guasto in uno dei nodi dell'area *pool*, quell'architettura consente al nodo ancora operativo di continuare a garantire il servizio. Il valore del tempo di fermo totale del Modello 5 è coerente con il valore massimo del tempo di fermo totale consentito da ETCS.

Se un elemento di rete, come MME, si guasta, è necessario che l'altro elemento della coppia ancora funzionante, in questo caso l'altro MME, sopporti non solo il proprio carico di traffico ma anche quello dell'MME danneggiato. È quindi fondamentale disporre di un modello di affidabilità che garantisca che l'elemento rimanente sia in grado di elaborare da solo l'intero carico di traffico. Nel modello questo principio è stato applicato. L'architettura standard di LTE consente la distribuzione delle risorse; tuttavia, non considera il problema del carico di traffico. Per questi motivi, questo studio di ricerca ha analizzato e progettato una rete LTE che considera entrambi i due aspetti fondamentali della distribuzione delle risorse e del carico di traffico, che è la "filosofia" alla base di questo progetto. Questo può essere fatto da un accurato dimensionamento della rete LTE.

Dopo aver confrontato i diversi modelli in base all'architettura più adatta per il sistema ferroviario, è stata fatta un'ulteriore analisi sul rapporto costi-benefici degli stessi modelli. Il fornitore internazionale ha fornito i prezzi dei diversi componenti della rete e abbiamo confrontato ogni

for each component have been provided by an international supplier, selecting the characteristic values for each railway element in the absence of international specification.

Comparing the different models, the total down time decreases from 1,016 hrs per year (Model 1) to 0,1457 hrs per year (Model 5). In Model 1 the total down time is 1,016 hrs per year, if we add another component in the core network (SG-GW), the value of total down time decreases. In Model 2, the design provides 2 S-GW and the total down time drops to 0,6458 hrs per year. Adding an additional MME, as in Model 3, the total down time value further improves, dropping to a total value of 0,2254 hrs per year. In comparison with Model 4, an additional PDN-GW has been added in Model 6, however the total down time is still higher than the mandatory requirement of 8 minutes per year. The model that presents the lowest total down time value is Model 5, where time decreases to 0,1457 hrs per year (8 minutes per year).

Comparing the different models, Model 5 has the best design: two MME, two S-GW and two PDN-GW. Model 5 has a redundant architecture in the core parts and can be deployed to different (geographical) network nodes that can work in the pool area.

If a fault occurs in one of the nodes of the pool area, that architecture allows the node that is still operating to continue guaranteeing the service. The total down time value of the Model 5 is coherent with the maximum total down time value allowed by ETCS.

If a network element, such as MME, becomes faulty, it is necessary that the other pair element that is still func-



Tabella 2 – Table 2

Prezzi relativi  
Relative prices

	M1
M1	M1/M1=1
M2	M2/M1=1,15
M3	M3/M1=1,31
M4	M4/M1=1,15
M5	M5/M1=1,47
M6	M6/M1=1,31

modello considerando i relativi prezzi. Questo lavoro di ricerca è partito dal Modello 1 e per ogni modello abbiamo fatto un rapporto tra il prezzo del Modello X (X da 2 a 6) sul Modello 1 e così via, come mostrato nella Tab. 2.

M2/M1, M4/M1 e M6/M1, M3/M1 hanno lo stesso prezzo relativo perché i prezzi degli elementi di rete SG-W, MME e PDN-GW sono gli stessi. Il prezzo relativo più alto è quello di M5/M1, che è 1,47. Dal punto di vista tecnico, il Modello 5 è il modello che meglio soddisfa la richiesta di avere un *down time* totale annuo massimo di 8 minuti.

Abbiamo analizzato i risultati ottenuti non solo in relazione ai relativi prezzi ma anche considerando la migliore architettura di rete, e abbiamo successivamente discusso questi risultati con un team di ingegneri di RFI. Abbiamo riscontrato che anche a fronte di un rialzo del prezzo relativo scegliendo il modello 5, RFI preferisce il Modello 5 perché, dal punto di vista tecnico, è più in linea con le esigenze ferroviarie.

Riassumiamo i vantaggi del Modello 5 e perché è stato scelto come candidato più adatto come FRMCS.

- La Model 5 ha un'architettura ridondante nelle parti principali e può essere distribuita a diversi nodi di rete (geografici) che possono lavorare nell'area del *pool*.
- Il tempo di inattività totale è di 0,1457 ore all'anno (8 minuti all'anno).
- Il valore del tempo di fermo totale è coerente con il valore massimo del tempo di fermo totale consentito da ETCS, che è di 8 minuti all'anno per i guasti bloccanti.

### 3. Conclusione

Questo lavoro di ricerca servirà come base per studi futuri per estendere l'analisi alla rete 5G per la ferrovia. Da un punto di vista funzionale, 5G e LTE sono simili, ma al momento non sappiamo fino a che punto condividano somiglianze con riferimento all'analisi dell'affidabilità. Mentre l'analisi dell'affidabilità in LTE fa riferimento a un HW specifico, nel caso del 5G opera anche tramite il cloud

tioning, in this case the other MME, do not only bears its own traffic load but also that of the damaged MME. It is therefore crucial to have a reliability model that guarantees that the remaining element is able to process the whole traffic load alone. In the model this principle has been applied. The standard architecture of LTE allows the resource distribution; however, it does not consider the traffic load issue. For these reasons, this research work study has analysed and designed an LTE network that considers both the two fundamental issues of resources distribution and traffic load, which is the "philosophy" behind this project. This can be made by an accurate dimensioning of the LTE network.

After comparing the different models based on the most suitable architecture for the railway system, a further analysis has been made about the cost-benefit of the same models. The international supplier has provided the prices of the different components of the network and we have compared each model by considering the relative prices. This research work started from the Model 1 and for each model we have made a ratio of the price of the Model X (X from 2 to 6) on Model 1 and so on, as shown in Tab. 2.

M2/M1, M4/M1 and M6/M1, M3/M1 have the same relative price because the prices of the network elements SG-W, MME and PDN-GW are the same. The highest relative price is that of M5/M1, which is 1,47. From a technical point of view, Model 5 is the model that best satisfies the request of having a maximum total down time per year of 8 minutes.

We have analysed the results obtained not only in relation to the relative prices but also considering the best network architecture, and we have after discussed these results with a team of RFI engineers. We have found that even if there is a rise in the relative price by choosing the model 5, RFI prefers the Model 5 because, from the technical point of view, it is more in line with the railway needs.

We summarize the advantages of Model 5 and why it was chosen as the most suitable candidate as FRMCS.

- Model 5 has a redundant architecture in the core parts and can be deployed to different (geographical) network nodes that can work in the pool area.
- The total down time is 0,1457 hrs per year (8 minutes per year).
- The total down time value is coherent with the maximum total down time value allowed by ETCS, which is 8 minutes per year for blocking faults.

### 3. Conclusions

This research work will serve as a base for future studies for extending the analysis to 5G network for the railway. From a functional point of view, 5G and LTE are similar, but we are currently not aware to what extent they share similarities with reference to the reliability analysis. While the reliability analysis in LTE refers to a specific HW, in the

[11]. In questo caso, l'analisi dell'affidabilità si sposta sul SW e per questo motivo potrebbe avere diversi modelli di guasto dopo LTE. Pertanto, uno sviluppo futuro di questo lavoro di ricerca in campo ferroviario può essere il confronto dell'analisi di affidabilità di questo modello, che si basa su LTE, con un'analisi di affidabilità del 5G che opera con la virtualizzazione, tecnica di *networking* definito dal software e *cloud computing*.

*case of 5G, it operates also via the cloud [11]. In this case, the reliability analysis shift to the SW and for this reason it might have different fault models following LTE. Therefore, a future development of this research work in the railway field may be the comparison of the reliability analysis of this model, which is based on LTE, with a reliability analysis of the 5G that operates with virtualization, technique of software-defined networking and cloud computing.*

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Evaluation of ETCS performance with LTE as alternative railway communication network using OPNET, Sniady, Aleksander; Soler, José, DTU, 2013.
- [2] ETSI TR 103 333 V1.1.1 System Reference document (SRDoc); GSM-R networks evolution, ETSI, (2017-02).
- [3] J. CALLE-SANCHEZ, M. MOLINA-GARCIA, J.I. ALONSO (2012), "*Top Challenges of LTE to become Next Generation Railway Communication System*", Department of Signal, Systems and Radiocomunications, ETSIT, Technical University of Madrid, Spain, COMPRAIL.
- [4] Study on the Architecture of On-Board Radio Communication Equipment, Conference ERA 2017.
- [5] W. AHMEDA, O. HASANA, U. PERVEZA, J. QADIRB (2016), "*Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks*", December, Journal of Network and Computer Applications.
- [6] Isograph, <http://www.isograph.com/>.
- [7] M. CABARKAPA, D. MIJATOVIC, N. KRAJNOVIC (2011), "*Network Topology Availability Analysis*", Telfor Journal.
- [8] L. MIRTSKHULAVA, N. ANANIASHVILI, R. KAKUBAVA, G. GUGUNASHVILI (2014), "*Internet Reliability and Availability Analysis Using Markov Method*", International Conference on Computer Modeling and Simulation.
- [9] S. SESIA, I. TOUFIK, M. BAKER (2009), "*LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*", (eds), Wiley.
- [10] H.R. CHAYON, H. RAMIAH (2018), "*Key challenges and potential application of LTE advanced*, Department of Electrical Engineering", Faculty of Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 2018, Conference Paper Radio resource management by CoMP.
- [11] M. CATALDO, L. DI DIO LA LEGGIA, G. FAZIO, M. GIACONI, D. SCHIAVONI, F. SENESI (2021), "*Radio communication System in railways: development scenario*", March 2021, Ingegneria Ferroviaria.
- [12] EN 50126 Railway Applications (2000), "*The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety*", (RAMS), CEI.
- [13] EN50129 Railway applications (2004), "*Communication, signalling and processing systems– Safety related electronic systems for signalling*", CEI.
- [14] EN50128 Railway applications (2002), "*Communication, signalling and processing systems - Software for railway control and protection systems*", CEI.
- [15] Development of KRTCS (Korean Radio Based Train Control System) for Conventional & High Speed Railway, Key-seo, Lee, Chairman, Railway Signal Research Association Kyung-hwan, Hwang, Senior Engineer, Railway Signal Research Association Hak-sun, Yun, Director, Korea Rail Network Authority Kang-gyoo, Lee, General manager, Korea Rail Network Authority Dong-il, Sung, Senior manager, Korea Rail Network Authority Yeon-hwa, Kim, Asst. Engineer, Railway Signal Research Association, 2017, IRSE.