



Ottimizzazione delle risorse per le postazioni DCO tramite regressione lineare multipla e AHP: un approccio data-driven

Multiple linear regression and AHP for Railway Traffic Control Workstations resource optimization: a data-driven approach

Luigi ELIA ^(*)
Roberto STUFANO ^(**)
Mario TARTAGLIA ^(***)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.05.2025.ART.1>)

Sommario - L'allocazione delle risorse per le postazioni di controllo del traffico ferroviario è frequentemente oggetto di controversie tra sindacati e management ferroviario. Tradizionalmente, la determinazione del personale da assegnare alle postazioni di Dirigente Centrale Operativo (DCO) è influenzata da fattori soggettivi anziché criteri oggettivi.

Questo studio propone una metodologia che trasforma tale processo in un problema tecnico, utilizzando un modello di regressione lineare multipla basato su fattori quantitativi (numero di treni nell'area di competenza, stazioni attraversate, frequenza delle interruzioni) e analizzando fattori qualitativi (sistemi di distanziamento, caratteristiche della linea, sistemi di telecomando) mediante il processo di analisi multicriterio AHP.

Integrando questi metodi, il modello fornisce un quadro completo per determinare l'allocazione ottimale delle risorse, riducendo l'influenza soggettiva e migliorando l'efficienza operativa nella gestione del traffico ferroviario.

1. Introduzione

Una gestione efficace del traffico è fondamentale per garantire operazioni ferroviarie efficienti e sicure. Con l'aumentare della complessità delle reti, sta crescendo la domanda di un controllo del traffico preciso, reattivo e sicuro. Il ruolo tradizionale del capostazione in loco sta cedendo il passo a gestori del traffico centralizzati che operano da specifiche sale di comando e controllo. In questo scenario in evoluzione, le postazioni di lavoro svolgono un

Summary - The allocation of resources for railway traffic control workstations is frequently a subject of controversy between trade unions and railway management. Traditionally, the determination of personnel to be assigned to Centralize Rail Traffic Controller workstations has been influenced by subjective factors rather than objective criteria.

This study proposes a methodology that transforms this process into a technical problem, utilizing a multiple linear regression model based on quantitative factors (number of trains in the area of competence, stations traversed, frequency of interruptions) and analyzing qualitative factors (spacing systems, line characteristics, remote control systems) through the AHP multi-criteria analysis process.

By integrating these methods, the model provides a comprehensive framework for determining optimal resource allocation, reducing subjective influence and improving operational efficiency in railway traffic management.

1. Introduction

Effective rail traffic management is essential for ensuring efficient and safe railway operations. As rail networks become increasingly complex, the need for precise, responsive, and secure traffic control grows. The traditional role of on-site station masters is being replaced by centralized traffic controllers operating from remote control rooms. In this evolving landscape, workstations play a crucial role in regulating train movements, maintaining punctuality, and preventing accidents. However, determining the optimal allocation of human resources—specifically, the number of

^(*) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A – Direzione Circolazione e Orario, Circolazione e Orario Area Roma.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A – Direzione Circolazione e Orario, Ingegneria dei Processi di Circolazione.

^(***) Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A. – Corporate Affairs – Leader of FS Research Centre.

^(*) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A – Direzione Circolazione e Orario, Circolazione e Orario Area Roma.

^(**) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A – Direzione Circolazione e Orario, Ingegneria dei Processi di Circolazione.

^(***) Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A. – Corporate Affairs – Leader of FS Research Centre.

ruolo vitale nella regolazione dei movimenti dei treni, nel mantenimento della puntualità e nella prevenzione degli incidenti. Tuttavia, definire l'allocazione ottimale delle risorse umane - in particolare, il numero di DCO necessari per turno in una determinata workstation - rimane una sfida significativa.

Il problema di allocazione delle risorse è inoltre enfatizzato da molteplici fattori quali:

- **Estensione dell'area di competenza:** Le postazioni di lavoro spesso coprono vaste aree geografiche con volumi di traffico variabili, rendendo difficile definire requisiti standardizzati.
- **Problemi di integrazione dei dati:** I dati operativi critici non sono sempre accessibili in formati adeguati, ostacolando una analisi efficace e il relativo processo decisionale.
- **Dinamiche operative complesse:** Lo sviluppo di un modello funzionale accurato richiede un'attenta selezione e calibrazione di parametri significativi, come il volume dei treni, le interruzioni e i movimenti del materiale rotabile.
- **Variazioni dei turni:** Le diverse pratiche di turnazione tra le varie giurisdizioni territoriali aggiungono un ulteriore livello di complessità.

Questo studio mira a sviluppare uno strumento di supporto decisionale per determinare il numero ottimale di operatori da assegnare a una postazione di controllo del traffico ferroviario. L'approccio proposto si basa su una metodologia razionale, indipendente da puntuali preferenze gestionali soggettive o pressioni esterne. Attraverso la progettazione di un modello di calibrazione che considera l'area di competenza, le caratteristiche operative e il carico di lavoro della postazione, questa ricerca, tramite un approccio data-driven cerca di determinare il workload e successivamente individuare la giusta allocazione delle risorse al fine di garantire il funzionamento efficiente delle postazioni di controllo.

Questo studio introduce una metodologia di calcolo unificata che consente un approccio standardizzato nella determinazione dei requisiti di personale nelle varie sale di comando e controllo gestite da Rete Ferroviaria Italiana. Questa metrica comune garantisce coerenza e comparabilità nelle decisioni di allocazione delle risorse, migliorando l'efficienza operativa complessiva di tutti i posti centrali della rete.

2. Letteratura tecnica di riferimento

2.1. Caratteristiche dell'indicatore di workload

Secondo HART [1], il carico di lavoro (*workload*) è un termine generale utilizzato per descrivere il costo necessario, per l'elemento umano dei sistemi uomo-macchina, al fine di rispettare i requisiti di un compito. Questo "costo" può riflettersi nell'esaurimento dell'attenzione, delle risorse

operators required per shift at a given workstation—remains a significant challenge.

This resource allocation problem is multifaceted and complicated by several factors:

- *Extensive territories:* Workstations often cover vast areas with varying traffic loads, making it challenging to establish standardized requirements.
- *Data integration issues:* Critical operational data are not always available in suitable formats, hindering effective analysis and decision-making.
- *Complex operational dynamics:* Developing an accurate functional model requires careful selection and calibration of key parameters, such as train volume, service interruptions, and rolling stock movements.
- *Shift variations:* Different scheduling practices across various areas of competence introduce an additional layer of complexity.

Our study aims to develop a decision-support tool for determining the optimal number of operators to assign to a traffic control workstation. The proposed approach follows a rational methodology, independent of subjective management preferences or external pressures. By designing a validation model that accounts for the area of competence, operational characteristics, and workstation workload, this research seeks to provide an evidence-based framework for assessing workload and subsequently allocating resources to ensure the efficient functioning of rail traffic control workstations.

Crucially, this study introduces a unified calculation methodology that enables a standardized approach to determining staffing requirements across the various control rooms managed by Rete Ferroviaria Italiana. This common metric ensures consistency and comparability in resource allocation decisions, enhancing overall operational efficiency across the network.

2. Literature Review

2.1. Characteristics of Workload index

According to HART [1], workload is a general term used to describe the cost of accomplishing task requirements for the human element in man-machine systems. This "cost" may manifest as the depletion of attentional, cognitive, or response resources, an inability to perform additional activities, emotional stress, fatigue, or performance declines. In summary, workload can be defined as the effort invested by a human operator in task performance.

The characteristics of effective workload indicators have been extensively studied in cognitive ergonomics and work psychology. The scientific literature has identified several key attributes that define reliable workload measurements.

According to CAIN [2], comprehensive review of mental workload literature, an effective workload indicator should exhibit five fundamental properties:

se cognitive o di risposta, nell'incapacità di svolgere attività aggiuntive, nello stress emotivo, nella fatica o nel deterioramento delle prestazioni. In sintesi, il carico di lavoro è lo sforzo investito dall'operatore umano nell'esecuzione del proprio compito.

Le caratteristiche degli indicatori efficaci del carico di lavoro sono state ampiamente studiate nell'ergonomia cognitiva e nella psicologia del lavoro. La letteratura scientifica ha identificato diversi attributi chiave che definiscono misurazioni affidabili del carico di lavoro.

Secondo CAIN [2], un indicatore efficace di *workload* dovrebbe dimostrare cinque proprietà fondamentali:

- sensibilità nel rilevare variazioni significative del carico.
- capacità diagnostica per identificare sia il tipo che la causa di suddette variazioni.
- selettività nel rispondere solo ai cambiamenti rilevanti.
- non intrusività per evitare interferenze con l'esecuzione del compito primario.
- affidabilità nel fornire misurazioni coerenti nel tempo.

REID e NYGREN [5] hanno ampliato questo quadro enfatizzando gli aspetti pratici degli indicatori del carico di lavoro quali:

- implementabilità - la facilità di misurazione e raccolta dati.
- accettabilità - la comprensibilità e l'accettazione da parte degli operatori.

Ulteriori contributi a questo campo sono venuti da WICKENS [4], che nel suo lavoro sulla progettazione e valutazione dei sistemi ha introdotto tre proprietà essenziali aggiuntive:

- validità - la misurazione accurata dei parametri previsti.
- tempestività - la fornitura di informazioni quando necessario.
- costo-efficacia - costi giustificabili di raccolta e analisi in relazione ai benefici.

In conclusione, HART e STAVELAND [3] attraverso il loro sviluppo del NASA Task Load Index (NASA-TLX) hanno enfatizzato come caratteristiche critiche degli indicatori di *workload*:

- la multidimensionalità - la considerazione di vari aspetti del carico di lavoro (mentale, fisico, temporale).
- generalizzabilità - l'applicabilità in diversi contesti e situazioni.

Queste caratteristiche formano un quadro completo per la valutazione e lo sviluppo di indicatori del carico di lavoro in vari contesti professionali.

2.2. Lavori correlati

- *Sensitivity: the ability to detect significant variations in workload.*
 - *Diagnostic capability: the capacity to identify both the type and cause of variations.*
 - *Selectivity: responsiveness only to relevant changes.*
 - *Non-intrusiveness: avoidance of interference with primary task execution.*
 - *Reliability: consistency in measurements over time.*
- REID and NYGREN [5] expanded this framework by emphasizing the practical aspects of workload indicators, such as:
- *Implementability: ease of measurement and data collection.*
 - *Acceptability: comprehensibility and acceptance by operators, considered crucial for practical application.*

Further contributions to this field came from WICKENS [4], who, in his work on system design and evaluation, introduced three additional essential properties:

- *Validity: accurate measurement of intended parameters.*
- *Timeliness: provision of information when needed.*
- *Cost-effectiveness: justification of data collection and analysis costs relative to benefits.*

A significant advancement in understanding workload indicators came from HART and STAVELAND [3] through their development of the NASA Task Load Index (NASA-TLX). Their research emphasized two critical characteristics:

- *Multidimensionality: consideration of various workload aspects (mental, physical, temporal).*
- *Generalizability: applicability across different contexts and situations.*

Together, these characteristics form a comprehensive framework for evaluating and developing workload indicators in various professional settings.

2.2. Related works

The application of regression models, particularly linear regression, has long been a cornerstone of workload estimation across various sectors. This approach quantifies workload by examining the relationship between different variables and the amount of work an operator can realistically handle.

In the healthcare sector, GATTA et al. [6] explored the use of machine learning to predict healthcare professionals' workload, highlighting the broader relevance of regression models in dynamic and cognitively demanding environments. Similarly, KEUNECKE et al. [7] applied multiple linear regression to investigate factors influencing workload in non-emergency medical transfers. Their research identified key variables such as task urgency and patient condition as primary workload drivers, measured using the NASA Task Load Index (NASA-TLX).

Workload estimation for human operators, particularly in transportation field, has been the focus of numerous ac-

L'applicazione dei modelli di regressione è da tempo un elemento fondamentale nella stima del carico di lavoro in vari settori. Questo approccio facilita la quantificazione dello stesso esaminando la relazione tra diverse variabili e la quantità di lavoro che un operatore può realisticamente gestire.

Nel settore sanitario, GATTA *et al.* [6] hanno esplorato l'uso del machine learning per prevedere il carico di lavoro dei professionisti sanitari, sottolineando la rilevanza più ampia dei modelli di regressione per stimare il carico di lavoro in ambienti dinamici e cognitivamente impegnativi. In parallelo, KEUNECKE *et al.* [7] hanno utilizzato la regressione lineare multipla per indagare i fattori che influenzano il carico di lavoro nei trasferimenti medici non di emergenza. Questa ricerca ha identificato variabili come l'urgenza del compito e le condizioni del paziente come fattori chiave del carico di lavoro, misurato attraverso il NASA Task Load Index (NASA-TLX).

La stima del carico di lavoro nel campo dei trasporti è stata oggetto di vari studi accademici. Quest'area di ricerca è fondamentale per garantire l'efficienza operativa, ottimizzare l'allocazione delle risorse e mantenere la sicurezza.

Nel dominio della gestione del traffico aereo, SMITH [8] ha confrontato diverse tecniche di regressione con altri modelli di apprendimento automatico per prevedere il carico di lavoro degli operatori. Egli ha riscontrato che i dati fisiologici, incluse le misurazioni elettroencefalografiche, potevano essere utilizzati per stimare il carico di lavoro attraverso compiti in condizioni variabili. Inoltre, i suoi risultati hanno sottolineato la robustezza dei modelli di regressione lineare nel catturare le fluttuazioni del carico di lavoro basate su diverse condizioni operative.

In un contesto urbano, ISMAEEL *et al.* [12] hanno analizzato l'autoregolazione dei conducenti nell'esecuzione di compiti secondari agli incroci, definendo il carico di lavoro attraverso variabili contestuali come lo stato di movimento e la complessità dell'incrocio. Utilizzando modelli di regressione multipla, sono stati identificati predittori significativi (es. età, condizioni meteorologiche, priorità). I risultati supportano strategie di sicurezza legate alla gestione delle distrazioni in base alle richieste di carico di lavoro.

HUANG *et al.* [13] hanno presentato un'analisi preliminare basata sulla simulazione del carico di lavoro dei regolatori della circolazione. Basandosi sui dati raccolti, i ricercatori hanno sviluppato il *Railroad Dispatcher Workload Simulation* (RDWS), un modello di simulazione a eventi discreti del flusso di lavoro degli operatori che stima la percentuale di tempo speso nelle attività durante un turno di lavoro. Lo studio sottolinea l'importanza di un approccio incentrato sul lavoratore nell'introduzione di nuove tecnologie nel settore ferroviario e fornisce una base per ulteriori ricerche sul carico cognitivo dei regolatori ferroviari e l'ottimizzazione dei loro strumenti di lavoro.

In uno studio che combina misurazioni fisiologiche

ademic studies. This research is crucial for ensuring operational efficiency, optimizing resource allocation, and maintaining safety.

In air traffic management, SMITH [8] compared multiple regression techniques with other machine learning models to predict operator workload. His findings revealed that physiological data, including electroencephalographic measurements, could be used to estimate workload across different operational conditions. Additionally, his study underscored the robustness of linear regression models in capturing workload fluctuations.

*In the broader transportation domain, ISMAEEL *et al.* [12] investigated drivers' self-regulation of secondary tasks at intersections, defining workload through contextual variables such as motion status and intersection complexity. Using multiple regression models, they identified significant predictors (e.g., age, weather conditions, and priority rules). Their findings contribute to safety strategies by linking workload demands to distraction management.*

*Focusing on the railway sector, HUANG *et al.* [13] conducted a preliminary analysis of railway dispatcher workload using simulation-based approaches. They developed the Railroad Dispatcher Workload Simulation (RDWS), a discrete-event simulation model that estimates the percentage of time dispatchers spend on various activities during a work shift. Their study highlights the importance of a human-centered approach in introducing new railway technologies and provides a basis for further research on cognitive load and work tool optimization.*

*DORRIAN *et al.* [14] combined physiological measurements with mathematical modeling to develop a fatigue prediction model for rail operators. Their model incorporates factors such as shift patterns, time of day, and cumulative sleep debt to estimate operator alertness and potential workload capacity.*

In the context of automation, NAWEED [15] developed a model predicting changes in train driver workload as automation levels increase. His model integrates both quantitative metrics and qualitative factors, offering a holistic view of workload transitions.

*ZOER *et al.* [16] proposed a comprehensive workload assessment model for train dispatchers, integrating physical, cognitive, and organizational factors. Their approach provides a multidimensional perspective on workload by considering both task demands and individual characteristics.*

*Focusing on railway signallers, PICKUP *et al.* [10] applied linear regression techniques to model the relationship between workload and various task characteristics. Their research identified key predictors of signaller workload, including the number of train movements, track layout complexity, and communication frequency. Their findings have implications for the design of signalling systems and workstation layouts.*

BONICA and GIOVINE [11] introduced a methodology for

con modellazione matematica, DORRIAN *et al.* [14] hanno sviluppato un modello di previsione della fatica per gli operatori ferroviari. Il loro modello incorpora fattori come i turni di lavoro, l'ora del giorno e il debito di sonno cumulativo per stimare l'attenzione degli operatori e la capacità di carico di lavoro potenziale.

Esplorando l'impatto dell'automazione, NAWEED [15] ha sviluppato un modello per prevedere i cambiamenti nel carico di lavoro dei macchinisti con l'aumento dei livelli di automazione nelle operazioni ferroviarie. Il modello incorpora sia metriche quantitative che fattori qualitativi per fornire una visione olistica delle transizioni del carico di lavoro.

ZOER *et al.* [16] hanno proposto un modello di valutazione del carico di lavoro completo per gli operatori ferroviari, integrando fattori fisici, cognitivi e organizzativi. Il loro approccio fornisce una visione multidimensionale del carico di lavoro, considerando sia le richieste delle attività che le caratteristiche individuali.

In uno studio focalizzato sul segnalamento ferroviario, PICKUP *et al.* [10] hanno impiegato tecniche di regressione lineare per modellare la relazione tra carico di lavoro e varie caratteristiche delle mansioni. La loro ricerca ha identificato fattori predittivi chiave del carico di lavoro dei regolatori della circolazione, includendo il numero di movimenti dei treni, la complessità della disposizione dei binari e la frequenza degli eventi comunicativi. Questo lavoro ha implicazioni per la progettazione dei sistemi di segnalamento e per la disposizione delle postazioni di lavoro.

BONICA e GIOVINE [11] hanno proposto un metodo di valutazione del carico di lavoro delle postazioni di DCO, che combina, mediante analisi multicriteria, alcuni dei principali elementi che concorrono al carico di lavoro (estensione della tratta, quantità di località comandate, tecnologia dei sistemi di comando e controllo etc.). Il modello rappresenta un primo approccio strutturato alla quantificazione del *workload* degli operatori del posto centrale incentrato sulla realtà italiana.

In merito all'utilizzo di tecniche di analisi multicriterio, in SAATY *et al.* [9] viene esplorato l'utilizzo del metodo AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e della Programmazione Lineare (PL) per l'allocazione ottimale delle risorse umane all'interno di un'organizzazione. Lo studio dimostra come l'approccio combinato AHP-PL possa fornire uno strumento efficace e potente per la risoluzione di problematiche inerenti all'allocazione delle risorse umane, consentendo di affrontare in modo integrato e ottimizzato sia fattori tangibili che intangibili.

3. Quadro di riferimento

In questo paragrafo vengono sintetizzati alcuni elementi relativi alla gestione del traffico ferroviario e rilevanti ai fini della modellazione. Gran parte delle informazioni riportate di seguito sono contenute in forma compiuta e dettagliata nei testi normativi di RFI (Rete Ferroviaria Ita-

evaluating the workload of centralize rail traffic controller workstations. Their approach employs multicriteria analysis to integrate multiple workload-contributing elements, such as line extension, number of controlled locations, and command-and-control system technology. Their model represents a significant structured approach to quantifying central operator workload, particularly in the Italian railway context.

Finally, SAATY et al. [9] explored the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Linear Programming (LP) for the optimal allocation of human resources within an organization. Their study demonstrates how the combined AHP-LP approach can serve as a powerful tool for solving human resource allocation problems, effectively integrating both tangible and intangible factors.

3. Background

In this paragraph, key elements related to railway traffic management, relevant for modeling purposes, are synthesized. Most of the information presented below is comprehensively and meticulously detailed in RFI's (Rete Ferroviaria Italiana) regulatory texts, particularly in the manual "Regolamento per la Circolazione dei Treni" [17].

RFI as the primary infrastructure manager of Italy's railway network, is responsible for ensuring the safety and regularity of rail traffic in collaboration with railway companies. The network consists of three fundamental elements:

- *Lines (single or multiple tracks).*
- *Service locations.*
- *Characteristic points along the lines.*

3.1. Lines

Single-track lines are designed for train circulation in both directions on a single available track. In the case of double-track lines, if each track allows train circulation in both directions, they are referred to as banalized double-track lines; otherwise, they are non-banalized.

On line train spacing is managed through spacing system also known as block systems, which divide lines into sections to prevent multiple trains from occupying the same segment simultaneously. The main spacing systems used in the Italian railway network include:

- *Electric Axle Counter Block (ACB).*
- *Automatic Electric Block (AB).*
- *Radio Block System (RB).*

The ACB operates by counting the vehicle axles entering and exiting a block section. In the AB system, track circuit technology is used to monitor the occupation of each block section. The RB ensures train spacing through radio-transmitted information to specially equipped trains, guaranteeing that each section is occupied by only one train at a time.

liana), in particolar modo nel manuale “Regolamento per la Circolazione dei Treni” [17].

RFI, in qualità di principale Gestore dell’Infrastruttura Ferroviaria Italiana, è responsabile con le imprese ferroviarie di garantire la sicurezza e la regolarità del traffico ferroviario. La rete è costituita principalmente da:

- Linee a uno o più binari.
- Località di Servizio (LDS).
- Altri punti caratteristici ubicati in linea.

3.1. Le Linee

Le linee a semplice binario sono attrezzate per la circolazione dei treni nei due sensi di marcia sull’unico binario disponibile. Nel caso di linee a doppio binario, se ciascun binario è attrezzato per la circolazione dei treni in entrambi i sensi di marcia si parla di linee a doppio binario banalizzate, altrimenti si dicono non banalizzate.

In linea i treni sono distanziati mediante opportuni sistemi di distanziamento, detti anche regimi di circolazione o sistemi di blocco, che dividono la linea in sezioni ed impediscono la simultanea occupazione della stessa sezione da parte di più treni. Sulla rete italiana, i sistemi di distanziamento sono:

- Blocco elettrico conta assi (ACB).
- Blocco elettrico automatico (AB).
- Blocco radio (RB).

Il ACB funziona sul principio del conteggio degli assi dei veicoli che impegnano una sezione di blocco in ingresso e in uscita. Nel AB il controllo di occupazione di una sezione di blocco è effettuato mediante la tecnologia dei circuiti di binario. Il RB assicura il distanziamento dei treni per mezzo di informazioni trasmesse via radio a bordo dei treni appositamente attrezzati, garantendo che ciascuna sezione sia impegnata da un treno per volta.

3.2. Le Località di Servizio

Le LDS ubicate lungo le linee svolgono principalmente funzioni di regolazione della circolazione ferroviaria. Un’utile classificazione prevede di distinguere le stazioni in stazioni di testa o di transito e stazioni di diramazione o non di diramazione.

Le fermate, per quanto rappresentino punti caratteristici della linea adibiti al servizio pubblico, non intervengono nel distanziamento dei treni e non sono utilizzate per effettuare incroci e/o precedenza. Esse possono essere ubicate anche nell’ambito di una stazione.

3.3. I Treni

Viene definito convoglio un complesso di uno o più veicoli ferroviari, con almeno una unità di trazione, dotato di

3.2. The Service Locations

The service locations (SL) located along railway lines primarily perform functions related to the regulation of railway traffic. A useful classification distinguishes between head or transit stations and branching/non-branching stations.

Stops, although they represent characteristic point of the line designed for public service, do not intervene in the spacing of trains and are not used to perform crossing and/or precedencies. They may also be located within the area of a station.

3.3. The Trains

A convoy is defined as a complex of one or more railway vehicles, with at least one traction unit, equipped with a braking system and driver’s cab, suitable for performing a specific railway service.

A train is a convoy that:

- *Moves with a maximum permitted speed.*
- *Is uniquely identified by an alphanumeric code.*
- *Has a scheduled date of operation.*

Within SL, convoy can move either as trains or as rolling stock (shunting movement). Shunting is a movement performed by rolling stock to carry out operations such as train marshalling, vehicle storage on yard tracks, etc..

Depending on line characteristics and rolling stock specifications, trains can operate at different speeds. The degree of heterotachicity is a key parameter in defining an operator’s workload, as an increase in this factor can escalate the complexity of reprogramming traffic in the event of anomalies. Moreover, multiple types of rail services can coexist on the same line, including passenger services, universal services, high-speed trains, and freight trains. Each service type, depending on time of day and specific traffic conditions, may be subject to different priority rules in traffic management.

3.4. Management Railway System (MRS)

A railway line operation system is a framework comprising operators, technological facilities, and procedures aimed at ensuring the safe management of train circulation within SL and, with the assistance of train spacing systems, along the line sections between them.

In general terms, operation systems are based on one of the following two functional logics:

- *Remote command and control of safety entities within SL—and, under certain technological conditions, also along line sections—by a Centralized Rail Traffic Controller (CRTC). The CRTC, physically located in a central control facility or another SL, issues remote commands and monitors the position status of safety equipment. This configuration is referred to as the “remote control operation system”.*
- *On-site supervision of SL along the line by local station*

sistema di frenatura e cabina di guida e atto a svolgere un determinato servizio ferroviario.

Un treno è un convoglio che:

- si muove con una velocità massima ammessa.
- è identificato univocamente da un codice alfanumerico.
- ha una data di effettuazione.

All'interno di una LDS un convoglio può muoversi come treno o come manovra. La manovra è un movimento effettuato da rotabili nell'ambito di una LDS per compiere le operazioni di formazione treni, ricovero di veicoli nei binari di scalo, ecc.

A seconda delle caratteristiche della linea e del materiale rotabile, i treni possono circolare a diverse velocità. Il grado di eterotachicità è un parametro da valutare nella definizione del carico di lavoro di un operatore, in quanto un aumento di questo fattore potrebbe aumentare le difficoltà di riprogrammazione del traffico in caso di anomalie. Inoltre, sulla stessa linea possono coesistere contemporaneamente più tipologie di servizi ferroviari: servizi passeggeri, servizi universali, treni ad alta velocità, treni merci, ecc. Ogni tipologia di servizio, a seconda dell'ora del giorno e delle specifiche condizioni di traffico, può essere soggetta a diverse regole di priorità nella gestione della circolazione.

3.4. Il sistema di esercizio

Un "sistema di esercizio" di una linea ferroviaria è un insieme costituito da operatori, impianti tecnologici e procedure finalizzato alla gestione in sicurezza della circolazione nelle LDS e, con l'ausilio dei sistemi di distanziamento, nei tratti di linea fra le LDS.

In termini generali, i sistemi di esercizio si basano su una delle seguenti due logiche funzionali:

- comando e controllo a distanza degli enti di sicurezza delle LDS e, sotto certe condizioni tecnologiche, anche dei tratti di linea, da parte di un Regolatore della Circolazione (DCO), ubicato fisicamente in un posto centrale o in un'altra LDS, che impartisce i comandi a distanza e rileva i controlli di posizione degli enti di sicurezza (sistema di esercizio del "comando a distanza").
- presenziamento sul posto delle LDS della linea, da parte di Regolatori della Circolazione (Dirigenti Movimento - DM) che presenziano il passaggio dei treni, comandano e controllano, ciascuno in loco, gli enti della LDS e garantiscono la funzione di distanziamento dei treni in linea tramite i sistemi di blocco (sistema di esercizio della "dirigenza locale").

Alcune stazioni delle linee esercitate in comando a distanza possono essere, permanentemente o temporaneamente, presenziate da un DM: esse si dicono "stazioni porta". In tal caso, la giurisdizione del DM è limitata ai soli

master (SM), who oversee train passage, operate and monitor safety equipment locally, and ensure train spacing along the line via block systems. This configuration is known as the "local supervision operation system".

Some stations on remotely controlled lines may be permanently or temporarily manned by a SM; these are referred to as "gateway stations". In such cases, the SM's jurisdiction is limited to train movements and shunting operations within the station itself.

With few exceptions, on locally supervised lines, the activities of SMs must be coordinated for service regularity by a qualified operator known as the Central Dispatcher (CD).

CDs are responsible for service regularity but do not intervene in the control of train routes within SL. In many control rooms, hybrid workstations exist, where a single operator, within their jurisdiction, may act as a CRTC for one portion of the network and as a CD for another.

3.5. Centralize Rail Traffic Controller (CRTC)

The CRTC occurs in the settlement of routes in SL within his area of competence equipped with specific facilities. He operates on an interlocking system linked to a remote control system (RCS).

The centralized traffic control system consists of a central control office and peripheral locations connected through a transmission channel, enabling the execution of operations that allow commands to be sent from the central control office to the periphery and the reception of feedback in the reverse direction.

The Italian railway infrastructure employs three types of RCS: CTC, SCC, and ACC-M, each offering varying degrees of automation and safety levels.

At present, the ACC-M remote control system represents the latest generation of remote command and control technology. In contrast, SCC and CTC systems exhibit certain limitations that increase their operational complexity, particularly in scenarios involving operation in degraded mode.

Peripheral locations are defined as all SL falling under the jurisdiction of the CRTC, including stations, junctions, crossover points, and other facilities.

Peripheral locations within an ACC-M remote control system are classified into three categories:

- *Multistation Peripheral Posts (PPM): these locations are not equipped with local devices, and their operational logic is allocated in the central control office.*
- *Computer-Based Interlocking Peripheral Posts (PP-ACC): these locations are equipped with Computer-Based Interlocking systems. Unlike PPMs, in case of remote control disconnection, these locations can be operated by a local SM.*
- *Relay-Based Interlocking Peripheral Posts (PP-ACEI): these peripheral locations are equipped with relay-based interlocking systems. Through a specific intermediate*

movimenti di treni o manovre nell'ambito della stazione stessa.

Salvo eccezioni, sulle linee esercitate in dirigenza locale l'attività dei DM deve essere coordinata, ai fini della regolarità dell'esercizio, da un operatore qualificato, denominato Dirigente Centrale (DC).

I DC sono responsabili della regolarità del servizio e non intervengono nel comando degli itinerari nella LDS. In molte sale di comando e controllo, ci sono postazioni di lavoro ibride in cui uno stesso operatore, nell'ambito della propria giurisdizione, ricoprire il ruolo di DCO per una porzione della rete e di DC per un'altra.

3.5. Il Dirigente Centrale Operativo (DCO)

Su determinate linee o tratti di linea, provvisti di apposite attrezzature, il DCO, da un posto centrale, interviene nella formazione degli itinerari nelle LDS situate nella sua area di competenza.

Il comando centralizzato del traffico è costituito da un posto centrale e da posti periferici collegati da un canale di trasmissione per le effettuazioni di operazioni che consentono l'invio di comandi dal posto centrale verso la periferia e la ricezione di controlli in senso inverso.

Sull'infrastruttura ferroviaria nazionale sussistono principalmente tre tipi di telecomandi CTC, SCC e ACC-M che si distinguono per un crescente grado di automazione e una differente quota parte di sicurezza garantita dal telecomando stesso.

Allo stato attuale il telecomando di tipo ACC-M rappresenta l'ultima generazione di comando a distanza. A differenza di questo, i sistemi SCC e CTC presentano alcune limitazioni che ne aumentano la difficoltà di utilizzo soprattutto nei contesti di degrado tecnologico.

Si definiscono posti periferici tutte quelle LDS ricadenti sotto la giurisdizione del DCO (stazioni, bivi, posti di comunicazione, etc). All'interno di un telecomando di tipo ACC-M si distinguono tre tipologie di posti periferici:

- PPM: tali posti non sono dotati di apparati in loco e la logica di funzionamento è allocata presso il posto centrale.
- PPACC: tali posti sono dotati di apparati in loco di tipo ACC (a logica computerizzata). Nel caso di disconnessione del telecomando, queste località, a differenza delle precedenti, possono essere abilitate da un DM sul posto.
- PPACEI: questi posti periferici sono dotati di apparato di tipo ACEI (a logica cablata). Tali PP mediante un apposito apparato statico intermedio ricevono i comandi impartiti dal posto centrale e inviano i controlli rilevati sul posto dall'apparato.

Mentre PPM e PPACC hanno modalità di gestione simili, i PPACEI presentano alcune limitazioni che li differenziano dai primi.

static interface, these locations receive commands from the central control office and send back the locally detected feedback.

While PPMs and PP-ACCs have similar management modes, PP-ACEIs present certain limitations that differentiate them from the former types.

CRTC as the traffic regulator who enables a service location, not only safely provides train movement authorizations through the signalling system or recorded communications but can also authorize yard shunting movements and grant track possessions for maintenance activities.

3.6. Shunting movements

In certain locations equipped with specific interlocking systems and integrated into a particular type of remote control, the CRTC can, in addition to authorizing shunting operations, directly command route setting. This allows the CRTC to remotely operate centralized switches, ensuring a safe path for rolling stock.

Some remotely controlled locations, managed by SCC or ACC-M, are equipped with special devices called "shunting zones" (SZ). When activated, these devices prevent the command of routes within a designated yard area. In such locations, shunting movements can only take place after the establishment of a SZ corresponding to the section of the yard where the shunting operations must occur.

3.7. Interruptions

To ensure the regular operation of railway lines and service locations, periodic maintenance activities must be conducted. Maintenance or repair work involving safety and signalling systems that could compromise operational safety is typically carried out under an interruption.

Interruptions can be either planned or unplanned, the latter occurring in response to accidental events or operational requirements. They may affect an entire section of the railway line or, in the case of double-track lines, only a single track. Generally we refer to "line interruptions" or "track interruption".

The implementation of an interruption requires a formal request from the Interruption Owner (IO) and subsequent approval by the Rail Traffic Controller (CRTC or SM). No train may proceed through an interrupted section of track until the interruption has been lifted.

In certain contexts, track interruptions are managed using the so-called "out-of-service" devices, which expedite the granting process and ensure higher safety standards.

An interruption is considered concluded only after the IO grants clearance for the resumption of traffic, followed by the CRTC/SM's reactivation of the affected line or track.

On locally controlled lines, the central dispatcher who supervises those lines, authorizes the initiation of an interruption, while SMs oversee and manage the entire procedure.

Il DCO, in quanto regolatore della circolazione che abilita una LDS, oltre che fornire in sicurezza, le autorizzazioni al movimento dei treni mediante il sistema di segnalamento o tramite comunicazione registrate, può autorizzare i movimenti di manovra sul piazzale e concedere le interruzioni.

3.6. Le Manovre

In alcune LDS attrezzate con un determinato tipo di apparato e sotto un certo tipo di telecomando, il DCO oltre che autorizzare le manovre, può materialmente comandare gli istradamenti per i convogli.

In alcune LDS, gestite con tecnologia ACCM o SCC possono essere attivate, mediante apposita funzione, le cosiddette “zone di manovra” (ZM). Tali misure preventive costruiscono una sorta di “recinto virtuale” intorno alla zona di movimentazione dei convogli, tale da isolare funzionalmente la zona dal resto del piazzale e dalle linee afferenti.

3.7. Interruzioni

Per garantire il regolare esercizio delle linee e degli impianti ferroviari, è necessario effettuare interventi periodici di manutenzione. Le attività manutentive sull'infrastruttura e su apparati di sicurezza e segnalamento, che potrebbero compromettere la sicurezza dell'esercizio, vengono eseguite in regime di interruzione.

Le interruzioni possono essere programmate o non programmate, qualora si rendano necessarie a causa di eventi accidentali o esigenze di circolazione. Le interruzioni possono interessare un'intera tratta della linea o, nel caso di linee a doppio binario, solamente uno dei binari: in generale, si parla rispettivamente di interruzioni di linea o di binario.

L'attuazione di un'interruzione si concretizza mediante una richiesta da parte dell'agente titolare dell'interruzione (ATI) e la relativa concessione da parte del regolatore della circolazione. Nessun treno può essere instradato su un tratto di binario interrotto.

In alcuni contesti l'interruzione di un binario viene realizzata mediante l'impiego dei cosiddetti dispositivi di “fuori servizio”.

L'interruzione può considerarsi conclusa solo a seguito del nullaosta dell'ATI per la ripresa della circolazione, cui consegue la riattivazione della linea (o del binario) da parte del regolatore.

Sulle linee in dirigenza locale, il DC autorizza l'avvio di un'interruzione, mentre i DM interessati gestiscono l'intera procedura.

3.8. Il Posto Centrale

RFI gestisce 15 sale di comando e controllo sul terri-

3.8. The operation control centres

RFI operates a network of 15 regional control rooms and one central operation control centre, each comprising multiple workstations. These workstations, when operated by CRTCs, manage extensive sections of the network and multiple service locations.

The operation of control rooms is a 24/7 endeavour, necessitating a well-structured shift system:

- *Workstation shifts typically range from 6 to 9 hours, with variations across different control rooms to accommodate local needs and traffic patterns.*
- *During night shifts, when traffic volume is generally lower, some workstations may be suspended or merged to optimize resource allocation.*
- *Auxiliary operators are present in each control room to support CRTCs and temporarily enable workstations as needed, providing operational flexibility.*

This shift management approach ensures continuous coverage while adapting to fluctuating workloads throughout the day.

This study aims to optimize the allocation of CRTCs to workstations by quantifying the workload necessary to manage them. While the research focuses primarily on CRTCs allocation, the findings may also provide valuable insights for dimensioning the number of auxiliary operators in control rooms, thereby contributing to the overall efficiency of railway management system.

4. Methodology

The functional form (Tab. 1) of the linear multiple regression model [25][26], can be summarized as follows:

$$f(R(A(\varphi; h_{ij}); x_{ij}); \beta) = y_{ij}$$

The logical procedure for the quantification of parameters β is reported in the following diagram (Fig. 1):

Starting from the AHP analysis of expert opinions related to the impacts of certain qualitative characteristics (es. type of spacing system, type of remote control type of track possession, etc.) on workload and combining these judgments with the infrastructural and technological characteristics of the workstations (and the network sections they manage), expressed through weighting variables, the typological adaptation coefficients (TAC) are determined. The TACs are workload amplification coefficients, functions of the qualitative characteristics of the generic workstation and the network section that it manages. Subsequently, the entire range of regressors is defined as a combination of TACs and operational characteristics of the system (number of trains in circulation, number of shunting movements, etc.). Based on the regressors and the known workload values of certain 'special' workstations (hereinafter referred to as pivot-shift workstations), the calibration process identifies the values of the model parameters, which are selected based on statistical considerations. At this point, having hypothesized the

torio ed una sala operativa nazionale, ciascuna comprendente molteplici postazioni operative. Tali postazioni, quando presidiate da DCO, gestiscono estese sezioni della rete ferroviaria e molteplici LDS.

L'operatività delle sale di comando e controllo è garantita h24, 7 giorni su 7, richiedendo pertanto un sistema di turnazione ben strutturato. In particolare:

- I turni delle postazioni operative hanno generalmente una durata compresa tra le 6 e le 9 ore, con variazioni tra le diverse sale di controllo per adattarsi alle esigenze locali e ai pattern di traffico.
- Durante i turni notturni, quando il volume di traffico è generalmente inferiore, alcune postazioni possono essere sospese o accorpate per ottimizzare l'allocazione delle risorse.
- In ogni sala di controllo sono presenti regolatori della circolazione che operano in sussidio ai DC/DCO garantendo flessibilità operativa e/o supporto al carico di lavoro.

Questo approccio alla gestione dei turni assicura una copertura continua adattandosi al contempo alle fluttuazioni dei carichi di lavoro durante l'arco della giornata.

Il presente studio si propone di ottimizzare l'allocazione degli operatori DCO sulle postazioni operative attraverso la quantificazione del carico di lavoro necessario per gestirle. Sebbene la ricerca si concentri principalmente sull'allocazione dei DCO, i risultati potrebbero fornire preziose indicazioni anche per il dimensionamento del numero di sussidi nelle sale di controllo, contribuendo così all'efficienza complessiva del sistema di gestione della circolazione.

4. Metodologia

La forma funzionale del modello (Tab. 1) di regressione lineare multipla utilizzato [25][26] può essere così sintetizzata:

$$f(R(A(\varphi; h_{ij}); x_{ij}); \beta) = y_{ij}$$

Il procedimento logico per la quantificazione dei parametri β è riportato nel seguente schema in Fig. 1:

A partire dall'analisi AHP sulle opinioni degli esperti in merito all'impatto di una data caratteristica qualitativa (es. tipo di distanziamento, tipo di telecomando, natura dell'interruzione, etc) sul carico di lavoro e combinando tali giudizi con le caratteristiche infrastrutturali e tecnologiche delle postazioni (e dei tratti di rete che gestiscono), esplicitate dalle variabili di ponderazione, vengono determinati i

functional form of the workload, it becomes straightforward to calculate the associated workload value for each workstation-shift and assign the related resources. The following paragraphs will explain the procedure in detail.

4.1. Workload function

It is defined on the main activities which can fit into CRTC tasks. With refer to *i*-th shift and *j*-th workstation, we define workload as:

$$y = \text{Train circulation load} + \text{Maintenance load} + \text{Shunting movement load}$$

For each workload, various formulations were considered and subsequently selected based on the significance values of the model parameters β and the R-squared value (goodness of fit) indicator derived from the calibration process.

Regarding the relation between workload and the number of operators per workstation, we refer to the hypothesis that 100 ± 50 units of workload represent 1 operator (allocation hypothesis).

Based on this hypothesis, and considering the relationship between workload and assigned resources to be linear, 1 operator can cover workstations with a workload value between 50 and 150 units, 2 operators can cover workstations with workload values between 100 and 300 units, and so on.

For calibration purposes, we introduce the concept of

Tabella 1 – Table 1

Elementi costitutivi del modello
Constituent elements of the model

<i>i</i>	i-esimo turno (mattina, pomeriggio, notte) <i>i</i> -th shift (morning, afternoon, night)
<i>j</i>	<i>j</i> -esima postazione di lavoro <i>j</i> -th workstation
<i>y_{ij}</i>	Carico di lavoro della postazione <i>j</i> nel turno <i>i</i> Workload of workstation <i>j</i> in shift <i>i</i>
<i>f</i> (·)	Forma funzionale del modello Model functional form
<i>R</i> (·)	Forma funzionale dei regressori Regressor function
<i>A</i> (·)	Forma funzionale dei coefficienti di adattamento tipologico Function of typological adaptation coefficients
φ	Coefficiente di magnitudo Magnitude Coefficients
<i>h_{ij}</i>	Variabile di ponderazione Weighting variables
<i>x_{ij}</i>	Variabile quantitativa Quantitative variables
β	Parametri del modello di regressione Regression model parameters

coefficienti di adattamento tipologico (TAC). I TAC sono coefficienti amplificativi del carico, funzioni delle caratteristiche qualitative della generica postazione e del tratto di rete che essa gestisce. Successivamente viene definita l'intera gamma di regressori come combinazione di TAC e caratteristiche di esercizio del sistema (numero di treni circolanti, numero di movimenti di manovra, etc). A partire dai regressori e dai valori di *workload* noti di alcune "speciali" postazioni (nel seguito nominate Postazioni Operative Pivot), mediante il processo di calibrazione vengono individuati i valori dei parametri del modello a loro volta selezionati sulla base di considerazioni statistiche. A questo punto, ipotizzata quella che è la forma funzionale del *workload* risulta agevole calcolare per ogni postazione-turno il valore di *workload* associato e assegnare le relative risorse. I paragrafi successivi esplicheranno nel dettaglio il procedimento.

4.1. Funzione di Workload

Il carico di lavoro è definito in base alle principali attività che rientrano nelle mansioni del DCO. Con riferimento alla generica postazione *j* e al generico turno *i*, definiamo il *workload* come:

$$y = \text{Carico da circolazione treni} + \text{Carico da manutenzione} + \text{Carico da manovre}$$

Per ciascun carico di lavoro, sono state considerate diverse formulazioni, successivamente selezionate sulla base dei valori di significatività dei parametri del modello e dell'indicatore R-quadro derivante dal processo di calibrazione.

Per quanto concerne la relazione tra carico di lavoro e numero di operatori per postazione, si fa riferimento all'ipotesi secondo cui 100 ± 50 unità di carico di lavoro possono essere coperte da un operatore (ipotesi di assegnazione).

Sulla base di tale ipotesi e considerando lineare la relazione tra *workload* e risorse assegnate, un operatore può presidiare postazioni con un valore di carico di lavoro compreso tra 50 e 150 unità, 2 operatori possono presidiare postazioni con valori di carico di lavoro compresi tra 100 e 300 unità, e così via.

Ai fini della calibrazione, si introduce il concetto di "Postazioni Operative Pivot" (POP). Una POP è una postazione operativa ritenuta "correttamente dimensionata" da un pool di esperti del settore. Per le POP, la relazione 1 Operatore = 100 unità di carico di lavoro consente di definire un vettore di termini noti necessario per calcolare i parametri del modello di regressione. Ogni elemento del

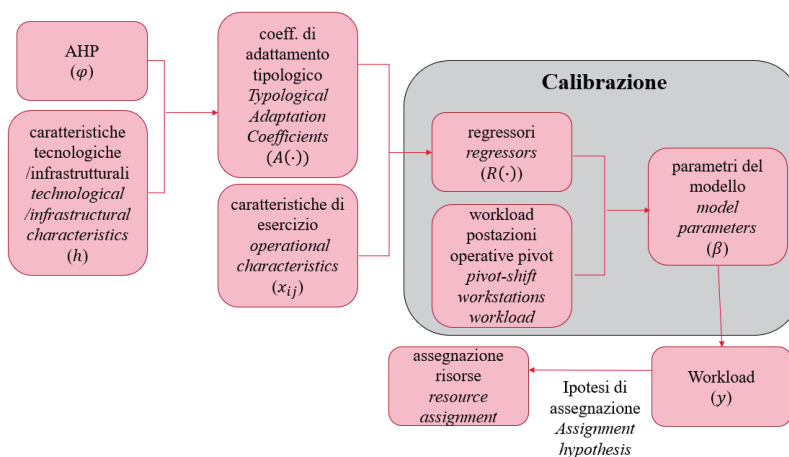


Figura 1 – Fasi del processo per la determinazione del carico di lavoro.

Figure 1 – Method phases for workload evaluation.

"pivot-shift workstations" (PSW). A PSW is a workstation deemed by a pool of experts "correctly sized" in a given work shift. For PSW, the relationship 1 Operator = 100 units of workload allow us to define a vector of known terms necessary to calculate the regression model parameters. Each element of the vector therefore represents the number of workload units assigned a priori by experts to a PWS. The model 'pivots' on these values to determine the number of resources to be allocated to the other workstations.

Experts were selected based on their experience. In many cases, these individuals were the control room manager themselves or other operators with at least 10 years of experience in the field of rail traffic management.

4.1.1. Train circulation load (TCL)

The train circulation workload is determined by the number of trains operating within the CRTC area of competence. For each train, the CRTC must grant specific movement authorization at every entry and exit point of the managed service locations. The CRTC remains responsible for monitoring the progress of all trains operating within his jurisdiction.

This workload category encompasses several sub-workloads, schematized as follows:

$$TCL = \text{In line transit load} + \text{On station transit load} + \text{Interference interruptions load}$$

Limited to the *j*-th workstation and the *i*-th shift, in defining this workload type, the following variables were used:

- nTr = Number of trains in circulation.
- Ht_{vel} = Average degree of heterotachicity.
- Ht_{cat} = Degree of service heterogeneity.
- nSL_{CRTC} = Average number of service locations, within CRTC's area of competence and enabled by the CRTC, crossed by trains.

vettore rappresenta quindi il numero di unità di *workload*, assegnato a priori dagli esperti, ad una POP. Su tali valori il modello “fa perno” per la determinazione del numero di risorse da assegnare alle altre postazioni.

Gli “esperti” sono stati selezionati in base alla loro esperienza: in molti casi essi erano gli stessi responsabili di sala o altri operatori con almeno 10 anni di esperienza in ambito di gestione della circolazione ferroviaria.

4.1.1. Carico da circolazione treni (TCL)

Il carico di lavoro relativo alla circolazione dei treni è determinato dal numero di treni circolanti nell’area di competenza del DCO: per ciascun treno, il DCO deve concedere specifiche autorizzazioni al movimento in ingresso e in uscita dalle LDS gestite. Egli mantiene inoltre la responsabilità del monitoraggio della circolazione di tutti i treni nella propria giurisdizione.

Questa categoria di carico di lavoro comprende diversi sotto-carichi, schematizzati come segue:

$$TCL = \text{Carico in linea} + \text{Carico in stazione} + \text{Carico da interferenza interruzioni}$$

Con riferimento alla generica postazione *j* e al generico turno *i*, nella definizione di questa tipologia di carico di lavoro sono state utilizzate le seguenti variabili:

- nTr = Numero di treni in circolazione.
- $H_{t_{vel}}$ = Grado medio di eterotachicità
- $H_{t_{cat}}$ = Grado di eterogeneità del servizio.
- nSL_{CRTC} = Numero medio di impianti di servizio abilitati dal DCO attraversati dai treni.
- nSL_{DISP} = Numero medio di impianti di servizio non abilitati dal DCO (ma ricadenti nella propria giurisdizione) attraversati dai treni.
- $nSL = nSL_{CRTC} + nSL_{DISP}$. Numero medio di impianti di servizio attraversati dai treni.
- $IntDuration$ = Durata media delle interruzioni.

Per quanto concerne il grado medio di eterotachicità, questo è stato calcolato come media ponderata, rispetto al numero di treni in circolazione, dei gradi di eterotachicità delle singole tratte ricadenti nella giurisdizione. Definiamo tratta una porzione della linea, all’interno della giurisdizione del DCO, delimitata da due LDS (fermate escluse).

$$HT_{vel} = \frac{\sum_{t=1}^k HT_{vel,t} \cdot nTr_t}{\sum_{t=1}^k nTr_t}$$

Con:

- t = generica tratta.
- k = numero di tratte.
- $HT_{vel,t}$ = grado medio di eterotachicità su ciascuna tratta t .
- nTr_t = numero di treni su ciascuna tratta t .

Il grado medio di eterotachicità su ciascuna tratta è

- nSL_{DISP} = Average number of service locations, within CRTC’s area of competence but NOT enabled by the CRTC, crossed by trains.
- $nSL = nSL_{CRTC} + nSL_{DISP}$. Average number of service locations, within CRTC’s area of competence, crossed by trains.
- $IntDuration$ = Average duration of track possessions.

Regarding the average degree of heterotachicity, this was calculated as a weighted average, with respect to the number of trains in circulation, of the degrees of heterotachicity of the individual sections falling within the jurisdiction. We define a section as a portion of the line, within the CRTC’s jurisdiction, bounded by two service location (stops excluded)

$$HT_{vel} = \frac{\sum_{t=1}^k HT_{vel,t} \cdot nTr_t}{\sum_{t=1}^k nTr_t}$$

With:

- t = generic section.
- k = number of sections.
- $HT_{vel,t}$ = average degree of heterotachicity on each section t .
- nTr_t = number of trains on each section t .

The average degree of heterotachicity on each section is calculated as the normalized mean of the differences in travel times of all trains running on the section in the reference shift.

$$HT_{vel,t} = 1 - \frac{1}{2\mu_x} \left[\frac{\sum_{ti=1}^{nTr_t} \sum_{tj=1}^{nTr_t} |x_{ti} - x_{tj}|}{nTr_t(nTr_t - 1)} \right]$$

With:

- ti, tj = generic train.
- μ_x = mean of the train travel times.
- x_i = travel time of the i -th train on the t -th section.
- x_j = travel time of the j -th train on the t -th section.

Regarding the average degree of service heterogeneity, it was calculated as the weighted average, with respect to the number of circulating trains, of the degrees of service heterogeneity of the individual sections t falling within jurisdiction j .

$$HT_{cat} = \frac{\sum_{t=1}^k HT_{cat,t} \cdot nTr_t}{\sum_{t=1}^k nTr_t}$$

With:

- $HT_{cat,t}$ = average degree of service heterogeneity of the individual section t .

The degree of service heterogeneity of single section was calculated thanks to Gini’s formula [27].

$$HT_{cat,t} = 1 - \left[\frac{c}{c-1} \left[1 - \sum_{r=1}^c f_r^2 \right] \right]$$

With:

- r = generic service class
- c = number of service classes (commuters, universal service, high-speed service, freight, service trains).

calcolato come media normalizzata delle differenze nei tempi di percorrenza di tutti i treni circolanti sulla sezione nel turno di riferimento.

$$HT_{vel,t} = 1 - \frac{1}{2\mu_x} \left[\frac{\sum_{ti=1}^{nTr_t} \sum_{tj=1}^{nTr_t} |x_{ti} - x_{tj}|}{nTr_t(nTr_t - 1)} \right]$$

Con:

- t_i, t_j = generico treno.
- μ_x = media dei tempi di percorrenza.
- x_i = tempo di percorrenza dell'i-esimo treno sulla -esima tratta.
- x_j = tempo di percorrenza del j-esimo treno sulla -esima tratta.

Relativamente al grado medio di eterogeneità del servizio, esso è stato calcolato come media ponderata, rispetto al numero di treni circolanti, dei gradi di eterogeneità del servizio delle singole tratte ricadenti nella giurisdizione.

$$HT_{cat} = \frac{\sum_{t=1}^k HT_{cat,t} \cdot nTr_t}{\sum_{t=1}^k nTr_t}$$

Con:

- $HT_{cat,t}$ = grado di eterogeneità del servizio della singola tratta t .

Il grado di eterogeneità del servizio della singola tratta è stato calcolato mediante la formula di Gini [27].

$$HT_{cat,t} = 1 - \left[\frac{c}{c-1} \left[1 - \sum_{r=1}^c f_r^2 \right] \right]$$

Con:

- r = generica classe di servizio.
- c = numero di classi di servizio (regionali, servizio universale, alta velocità, merci, treni di servizio).
- f_r = frequenza relativa delle occorrenze delle classi.

Per costruzione, questi coefficienti sono compresi tra 0 e 1, dove 1 rappresenta il massimo grado di eterotachicità/eterogeneità.

4.1.1.1. Carico in linea

Questo carico è influenzato dal numero di treni circolanti nell'intera area di competenza del DCO. Può dipendere dal grado medio di eterotachicità e/o dal livello di eterogeneità del servizio.

4.1.1.2. Carico in stazione

Questo carico è correlato al transito dei treni nelle LDS nell'area di competenza del DCO.

4.1.1.3. Carico da interferenza interruzioni

Al netto della pianificazione a lungo termine, tale carico, proporzionale alla durata delle interruzioni, può ulteriormente mettere a dura prova il DCO nell'esercizio delle sue funzioni nel breve periodo.

4.1.2. Carico da manutenzione (ML)

Il carico da manutenzione è correlato alla concessione

- f_r = relative frequency of the occurrences of the classes.

By construction, these coefficients are limited between 0 and 1, where 1 represents the maximum degree of heterotachicity/heterogeneity.

4.1.1.1. In line transit load

This load is influenced by the number of trains circulating in the entire CRTC's area of competence. It can depend on the average degree of heterotachicity and/or the level of service heterogeneity.

4.1.1.2. On station transit load

This load is related to the transit of trains through the service locations in CRTC's area of competence.

4.1.1.3. Interference interruptions load

This load includes the duration of track possessions, which, net of long-term planning, can further stress the CRTC in the short term in the exercise of its functions.

4.1.2. Maintenance load (ML)

The maintenance workload is directly associated with the granting of interruptions. The implementation of advanced technological systems can mitigate the impact of maintenance activities on the overall operational workload. For the quantification of this workload, the number of granted and concluded interruptions ($nIntTic$) has been utilized as a key parameter.

4.1.3. Shunting movement load (SML)

In quantifying this type of workload, the number of scheduled shunting movements within CRTC-enabled service locations (nSM) was assessed.

4.2. Typological adaptation coefficients

A certain type of spacing system can influence the circulation workload to a greater extent than another type of block system. Similarly, the different nature of an interruption (scheduled or unscheduled) can alter the CRTC's workload.

These and other effects were taken into account through appropriate typological adaptation coefficients (TAC), which, by incorporating a series of qualitative characteristics, modulate the above-mentioned workloads accordingly.

For the quantification of TACs, a formulation is proposed in the following paragraphs that models them as factors that increase a workload, and they are a function of:

- **Representative Variables X:** Variables that represent a specific qualitative aspect and are themselves functions of appropriate weighting variables and upper-level magnitude coefficients. These variables have a value greater than or equal to 1 by construction. The value is 1 when the variable does not admit further modulation. In summary, by representative variable in this work, we mean the quantification of a certain qualitative aspect related

di interruzioni. La presenza di dispositivi tecnologici può ridurre l'impatto del carico da manutenzione sul *workload* totale. Nella definizione di questo tipo di carico è stato utilizzato il numero di concessioni e cessazioni di interruzioni effettuate dall'operatore (*nIntTic*).

4.1.3. Carico da manovre (SML)

Nel definire questo tipo di carico è stato valutato il numero di movimenti di manovra programmati nelle LDS abilitate da DCO (*nSM*).

4.2. Coefficienti di adattamento tipologico

Un certo tipo di sistema di distanziamento può influenzare il carico di lavoro da circolazione in misura maggiore rispetto a un altro tipo di regime di circolazione. Analogamente, la diversa natura di un'interruzione (programmata o non programmata) può influire diversamente sul carico di lavoro del DCO.

Questi e altri effetti sono stati presi in considerazione tramite opportuni coefficienti di adattamento tipologico (TAC) che, incorporando una serie di caratteristiche qualitative, modulano di conseguenza i carichi di lavoro sopra menzionati.

Per la quantificazione dei TAC, viene proposta, nei paragrafi successivi, una formulazione che li modella come fattori accrescitivi di un carico, e sono funzione di:

- Variabili rappresentative *X*: variabili che rappresentano uno specifico aspetto qualitativo e sono esse stesse funzioni di appropriate variabili di ponderazione e coefficienti di magnitudo di livello superiore. Queste variabili hanno un valore maggiore o uguale a 1 per costruzione; il valore è 1 quando per la variabile non viene prevista un'ulteriore modulazione. In sintesi per variabile rappresentativa si intende, in questo lavoro, la quantificazione di un determinato aspetto qualitativo legato ad una specifica postazione di lavoro, che può influenzare la determinazione del *workload*.
- Coefficienti di magnitudo φ : coefficienti che rappresentano il giudizio degli esperti in merito all'impatto di un certo fattore qualitativo sull'aumento del carico di lavoro. Il valore medio di questi coefficienti è stato quantificato tramite una specifica analisi AHP (Analytic Hierarchy Process).

Per modulazione intendiamo le caratterizzazioni di una determinata variabile rappresentativa. Ed esempio, ma si vedrà meglio nei paragrafi successivi, la variabile rappresentativa "Regime di Circolazione-Blocco automatico" prevede due modulazioni ovvero: Blocco Automatico su doppio binario e Blocco automatico su semplice binario. Conseguentemente la variabile rappresentativa "Regime di Circolazione-Blocco automatico-Doppio binario" prevede a sua volta due modulazioni: binario banalizzato e binario non banalizzato. In contrasto, la variabile rappresentativa "Regime di Circolazione-Blocco automati-

to a specific workstation, which can influence the determination of the workload.

- Magnitude Coefficients φ : Coefficients that represent the experts' judgment regarding the impact of a certain qualitative factor on the increase in workload. The average value of these coefficients was quantified through a specific Analytical Hierarchy Process (AHP) survey.

By modulation, we mean the characterizations of a certain representative variable. For example, as will be better explained in the following paragraphs, the representative variable 'Spacing system-Automatic Block' provides for two modulations, namely: Automatic Block on double track and Automatic Block on single track. Consequently, the representative variable 'Spacing system-Automatic Block-Double track' in turn provides for two modulations: banalized track and non-banalized track. In contrast, the representative variable 'Spacing system-Automatic Block-Single track' does not allow for modulations as the single track is always banalized.

In general, the functional form of a TAC, at a given level proposed in this work is as follows:"

$$A_q = \frac{\sum_{p=1}^r \varphi_{q+1,p} \cdot X_{q+1,p} \cdot h_{q+1,p}}{MIN(\varphi_{q+1,p}) \cdot \sum_{p=1}^r h_{q+1,p}}$$

Where:

- q = generic level of hierarchy.
- A_q = value of the TAC at level q .
- p = generic qualitative characteristic considered relevant to the determination of the TAC.
- r = number of qualitative characteristics considered relevant to the determination of the TAC.
- $X_{q+1,p}$ = value of the generic qualitative characteristic p at $q+1$ level, considered relevant to the determination of the TAC (representative variable).
- $\varphi_{q+1,p}$ = value of the generic magnitude coefficient associated with $X_{q+1,p}$.
- $h_{q+1,p}$ = value of the generic weighting variables associated with $X_{q+1,p}$.

From the proposed functional form, we can observe that in the numerator there is a linear combination of representative variables, weighting variables and magnitude coefficients, with the latter "weighting" the representative variables, while in the denominator there is a supra-normalization factor that makes the TAC greater than 1, representing it as an actual amplifying coefficient of the workload related to qualitative aspects of the workstation and/or the portion of the network it manages.

We specify that the TACs, representing a synthesis of all representative variables positioned on the same branch of the hierarchy, are always placed at level $q = 0$ of the hierarchy itself.

When there is no dimensional homogeneity among the weighting variables associated with the representative variables, the TAC formula reduces to:

co-Semplice binario” non ammette modulazioni in quanto il semplice binario è sempre banalizzato.

In generale, la forma funzionale di un TAC, ad un dato livello q proposta in questo lavoro è la seguente:

$$A_q = \frac{\sum_{p=1}^r \varphi_{q+1,p} \cdot X_{q+1,p} \cdot h_{q+1,p}}{MIN(\varphi_{q+1,p}) \cdot \sum_{p=1}^r h_{q+1,p}}$$

Con:

- q = generico livello della gerarchia
- A_q = valore del TAC a livello q
- p = generica caratteristica qualitativa considerata rilevante alla determinazione del TAC
- r = numero di caratteristiche qualitative considerate rilevanti alla determinazione del TAC
- $X_{q+1,p}$ = valore della generica caratteristica qualitativa p a livello $q+1$ considerata rilevante alla determinazione del TAC (variabile rappresentativa).
- $\varphi_{q+1,p}$ = valore del generico coefficiente di magnitudo associato a $X_{q+1,p}$.
- $h_{q+1,p}$ = valore della generica variabile di ponderazione associata a $X_{q+1,p}$.

Dalla forma funzionale proposta, possiamo notare che a numeratore è presente una combinazione lineare di variabili rappresentative, variabili di ponderazione e coefficienti di magnitudo, con questi ultimi che “pesano” le variabili rappresentative, mentre a denominatore è presente un fattore di sovrannormalizzazione che rende il TAC maggiore di 1 rappresentandolo come un effettivo coefficiente amplificativo del carico legato ad aspetti qualitativi della postazione e/o della porzione di rete che gestisce.

Si precisa che i TAC, rappresentando una sorta di sintesi di tutte le variabili rappresentative poste su uno stesso ramo della gerarchia, sono posti sempre a livello $q = 0$ della gerarchia stessa.

Quando tra le variabili di ponderazione associate alle variabili rappresentative non vi è omogeneità dimensionale, la formula del TAC si riduce a:

$$A_q = \frac{\sum_{p=1}^r \varphi_{q+1,p} \cdot X_{q+1,p}}{MIN(\varphi_{q+1,p})}$$

Come già accennato nei paragrafi precedenti i valori dei coefficienti di magnitudo derivano dall’analisi AHP, mentre per i valori delle variabili rappresentative viene proposta una formulazione analoga a quella utilizzata per i TAC:

$$X_{q+1,p} = \frac{\sum_{m=1}^c \varphi_{q+2,p,m} \cdot X_{q+2,p,m} \cdot h_{q+2,p,m}}{MIN(\varphi_{q+2,p,m}) \cdot \sum_{m=1}^c h_{q+2,p,m}}$$

Con:

- m = generica modulazione della variabile rappresentativa $X_{q+1,p}$
- c = numero delle modulazioni della variabile rappresentativa $X_{q+1,p}$

$$A_q = \frac{\sum_{p=1}^r \varphi_{q+1,p} \cdot X_{q+1,p}}{MIN(\varphi_{q+1,p})}$$

As mentioned in the previous paragraphs, the values of the magnitude coefficients derive from the AHP analysis, while for the values of the representative variables, a formulation similar to that used for the TACs is proposed:

$$X_{q+1,p} = \frac{\sum_{m=1}^c \varphi_{q+2,p,m} \cdot X_{q+2,p,m} \cdot h_{q+2,p,m}}{MIN(\varphi_{q+2,p,m}) \cdot \sum_{m=1}^c h_{q+2,p,m}}$$

with:

- m = generic modulation of representative variable $X_{q+1,p}$
- c = number of modulations of representative variable $X_{q+1,p}$
- $X_{q+2,p,m}$ = value of m modulation of representative variable $X_{q+1,p}$
- $\varphi_{q+2,p,m}$ = value of generic magnitude coefficient associated with m modulation of representative variable $X_{q+1,p}$
- $h_{q+2,p,m}$ = value of weighting variables associated with m modulation of representative variable $X_{q+1,p}$

4.3. Analytic Hierarchy Process (AHP) - Overview

The AHP is a structured technique for organizing and analyzing complex decisions, particularly in multi-criteria decision-making scenarios. Developed by T. L. SAATY in the 1970s [18][19] and the subject of further studies in the years to follow [20][21][22][23][24], AHP provides a comprehensive and rational framework for structuring a problem, representing and quantifying its elements, relating those elements to overall goals, and evaluating alternative solutions.

AHP decomposes a decision-making problem into a hierarchy of more easily comprehended sub-problems, each of which can be analysed independently. The elements of the hierarchy can relate to any aspect of the decision problem—tangible or intangible, carefully measured or roughly estimated, well or poorly understood—and anything at all that applies to the decision at hand.

Once the hierarchy is established, the experts systematically evaluate various elements through pairwise comparisons, assessing their impact on the element positioned above them in the hierarchy. In making these comparisons, the experts may rely on concrete data; however, they typically use their judgment to assess the relative significance and importance of the elements.

The AHP converts these evaluations to numerical values that can be processed and compared over the entire scope of the problem. A numerical weight or priority is derived for each element, enabling diverse and often incommensurable elements to be compared to one another in a rational and consistent manner.

4.3.1. AHP implementation

A structured AHP survey instrument was developed to quantify the relative weights of magnitude coefficients. At

- $X_{q+2,p,m}$ = valore della modulazione della variabile rappresentativa $X_{q+1,p}$
- $\phi_{q+2,p,m}$ = valore del coefficiente di magnitudo associato alla modulazione m della variabile rappresentativa $X_{q+1,p}$
- $h_{q+2,p,m}$ = valore della generica variabile di ponderazione associata alla modulazione m della variabile rappresentativa $X_{q+1,p}$

4.3. Analytic Hierarchy Process (AHP) – Overview

La AHP è una tecnica strutturata per analizzare e organizzare decisioni complesse, in scenari decisionali multi-criteriali. Sviluppato da T. L. SAATY negli anni Settanta [18][19] ed oggetto di ulteriori studi negli anni a seguire [20][21][22][23][24], la AHP fornisce un quadro completo e razionale per strutturare un problema, rappresentare e quantificare i suoi elementi, relazionarli agli obiettivi generali e valutare soluzioni alternative.

La AHP scompone un problema decisionale in una gerarchia di sotto-problemi più facilmente comprensibili, ciascuno analizzabile indipendentemente. Gli elementi della gerarchia possono riferirsi a qualsiasi aspetto del problema decisionale - tangibile o intangibile, accuratamente misurato o grossolanamente stimato, ben compreso o poco chiaro - e qualsiasi elemento pertinente alla decisione in esame.

Una volta costruita la gerarchia, un pool di esperti valuta sistematicamente i vari elementi confrontandoli reciprocamente a coppie, in relazione al loro impatto su un elemento superiore nella gerarchia. Nell'effettuare i confronti, gli esperti possono utilizzare dati concreti sugli elementi, ma tipicamente si affidano ai loro giudizi circa il significato e l'importanza relativa degli stessi.

La AHP converte tali valutazioni in valori numerici processabili e comparabili nell'intero spettro del problema. Viene derivato un peso o una priorità numerica per ciascun elemento, permettendo il confronto di elementi diversi e spesso incommensurabili in modo razionale e coerente.

4.3.1. Implementazione dell'AHP

È stata progettata una specifica indagine AHP per valutare il valore dei coefficienti di magnitudo. Per ciascun livello della gerarchia, un panel di esperti è stato invitato a valutare l'impatto (in termini di carico di lavoro sulla postazione) di un elemento rispetto ad un altro.

Ogni quesito dell'indagine è stato strutturato secondo il seguente formato: "In che misura l'elemento A è più impattante sulla gestione del traffico rispetto all'elemento B?".

Agli esperti è stata offerta la possibilità di rispondere utilizzando nove giudizi comparativi, ai quali sono stati assegnati valori numerici come illustrato nella seguente Tab. 2:

Inoltre, agli esperti è stata concessa la facoltà di aste-

each hierarchical level, domain experts evaluated the pairwise relative impacts of elements on workstation operational load.

The survey employed standardized pairwise comparison questions formatted as: 'What is the relative impact of element A versus element B on traffic management workload?'

Respondents provided assessments using a nine-point comparative scale, with numerical values assigned according to the standardized AHP methodology as detailed in the following table.

Furthermore, the experts were also granted the option to abstain from expressing a preference if they deemed their knowledge and expertise insufficient to provide a consistent judgement (Tab. 2).

The final magnitude coefficients were obtained as average of corresponding magnitude coefficients derived from each expert's interviews.

The hierarchical layer, into which a specific qualitative element that is considered to influence the workload is decomposed, is called a "level". For instance, the train spacing system belongs to level 1 in the context of determining the TAC for in line transit load. Subsequently, the block system types (automatic, axle-counting, radio) belong to level 2 of the hierarchy, while the distinction between single and double track belongs to level 3, and so forth. At each level, it is possible to identify groups that represent aggregations of characteristics attributable to the same representative variable of lower levels.

4.3.2. Hierarchy

Experts were thus asked to express comparative judgments between elements within the same group and not between elements from different groups. For example, the question was posed: "How much do you consider that, under equal conditions, traffic management with SCC remote control technology is more demanding compared to ACC-M technology?" as the types of remote control are in the same group, but the question "How much do you consider that, under equal conditions, traffic management on a non-banalized double-track line with axle-counting block system is more demanding compared to equipment with CTC remote control?" was not posed, as these two properties do not belong to the same group.

For each group, $\frac{n(n-1)}{2}$ questions were asked, where n represents the number of elements in the group. The hierarchy upon which the AHP investigation is constructed, with indication of the levels and groups (rectangles), as well as the formulation of TAC for each level, constitute model assumptions and are presented below (Fig. 2).

4.3.2.1. Train circulation load

The following are the hierarchical diagrams relating to train circulation load.

4.3.2.1.1. In line transit load

The development of the hierarchical branch relating to the in-line load is shown below (cfr Fig. 2).

nersi dall'esprimere una preferenza qualora ritenessero insufficienti le proprie conoscenze e competenze per fornire un giudizio coerente.

I coefficienti di magnitudo finali sono stati ottenuti come media dei corrispondenti coefficienti di magnitudo derivati dalle interviste di ciascun esperto.

Per "livello" si intende il layer gerarchico in cui viene scomposto un determinato elemento qualitativo che si ritiene possa influenzare il carico. Ad esempio, il sistema di distanziamento appartiene al livello 1 nell'ambito della determinazione del TAC del carico da linea. A sua volta i tipi di blocco (automatico, conta-assi, radio) appartengono al livello 2 della gerarchia, mentre la distinzione in binario semplice o doppio appartiene al livello 3 e così via. Ad ogni livello è possibile trovare dei gruppi che rappresentano aggregazioni di caratteristiche ascrivibili ad una stessa variabile rappresentativa di livello inferiore.

4.3.2. Gerarchia

Agli esperti è stato richiesto di esprimere giudizi comparativi tra gli elementi all'interno dello stesso gruppo e non tra elementi di gruppi differenti. Ad esempio, è stata posta la domanda: "Quanto ritieni che, a parità di condizioni, la gestione della circolazione con tecnologia di telecomando SCC sia più impegnativa rispetto a tecnologia ACC-M?" in quanto le tipologie di telecomando sono nello stesso gruppo, ma non è stata posta la domanda "Quanto ritieni che, a parità di condizioni, la gestione della circolazione su una linea a doppio binario Non banalizzato con blocco conta-assi sia più impegnativa rispetto ad un attrezzaggio con telecomando CTC?" in quanto il queste due proprietà non sono nello stesso gruppo.

Per ciascun gruppo, sono state formulate $\frac{n(n-1)}{2}$ domande, dove n rappresenta il numero di elementi nel gruppo. La gerarchia su cui è stata costruita l'indagine AHP, con indicazione dei livelli e dei gruppi (rettangoli) così come la formulazione dei TAC per ogni livello e delle variabili rappresentative, sono presentati in Fig. 2.

4.3.2.1. Carico da circolazione treni

Di seguito vengono riportati gli schemi delle gerarchie inerenti al carico da circolazione treni.

Tabella 2 – Table 2

AHP: Giudizi comparativi
AHP: Comparative judgements

Giudizio Judgement	Valore Value
Estremamente meno impattante <i>Extremely less impactful</i>	1/9
Molto meno impattante <i>Much less impactful</i>	1/7
Meno impattante <i>Less impactful</i>	1/5
Leggermente meno impattante <i>Slightly less impactful</i>	1/3
Ugualmente impattante <i>Equally impactful</i>	1
Leggermente più impattante <i>Slightly more impactful</i>	3
Più impattante <i>More impactful</i>	5
Molto più impattante <i>Much more impactful</i>	7
Estremamente più impattante <i>Extremely more impactful</i>	9

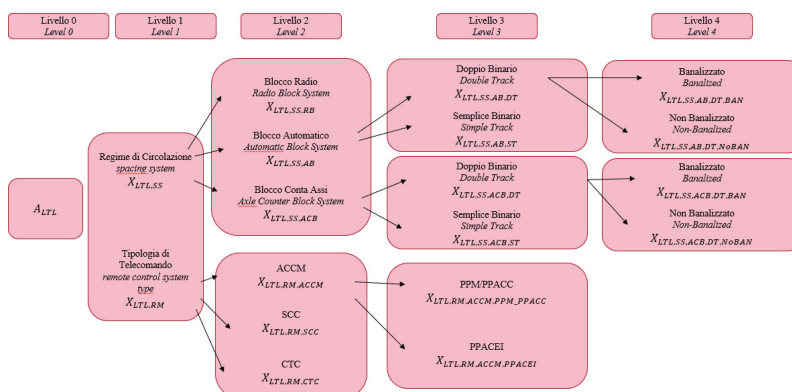


Figura 2 – AHP Carico da circolazione treni, Carico in linea.
Figure 2 – AHP Train circulation load, In line transit load.

The functional form of the TAC relating to the in-line load is shown in Tab. 3.

The functional form of the representative variables is shown in Tab. 4.

The functional form of the representative variables, and is shown in Tab. 5.

The functional form of the representative variables is shown In Tab. 6.

4.3.2.1.2. On station transit load

The development of the hierarchical branch relating to the load in station is shown in Fig. 3.

4.3.2.1.1. Carico in linea

Come evidenziato (cfr Fig. 2) viene riportato lo sviluppo del ramo gerarchico relativo al carico in linea.

Di seguito (Tab.3), viene riportata la forma funzionale del TAC relativo al carico in linea.

Quindi (Tab.4), viene riportata la forma funzionale delle variabili rappresentative $X_{LTL,SS}$ e $X_{LTL,RM}$.

Infine (Tab. 5), viene riportata la forma funzionale delle variabili rappresentative $X_{LTL,SS,AB}$, $X_{LTL,SS,ACB}$ e $X_{LTL,RM,ACCM}$.

The functional form of the TAC relating to the load in station is shown below (Tab. 7).

The functional form of the representative variables and is shown below (Tab. 8).

4.3.2.1.3. Interference interruptions load

The development of the hierarchical branch relating to the interruption interference load is shown below (Fig. 4).

The functional form of the TAC relating to the interruption interference load is shown below (Tab. 9).

Tabella 3 – Table 3

TAC – Carico in linea – Livello 0
Typological Adaptation Coefficients – In line transit load – Level 0

$$A_{LTL} = \frac{\varphi_{LTL,SS} \cdot X_{LTL,SS} + \varphi_{LTL,RM} \cdot X_{LTL,RM}}{MIN(\varphi_{LTL,SS}; \varphi_{LTL,RM})}$$

$A_{LTL} =$	TAC per carico in linea In line transit load TAC
$\varphi_{LTL,SS} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione. Spacing system magnitude coefficients
$\varphi_{LTL,RM} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla tipologia di telecomando. Remote control magnitude coefficients.
$X_{LTL,SS} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione. Spacing system representative variables.
$X_{LTL,RM} =$	Variabile rappresentativa della tipologia di telecomando. Remote control representative variables.

Tabella 4 – Table 4

Variabili rappresentative – Carico in linea – Livello 1
Representative Variables – In line transit load – Level 1

$m =$	Modulazione del regime di circolazione = Blocco Automatico (AB), Blocco contaassi (ACB), Blocco Radio (RB). Modulation of spacing system = Automatic Block System (BA), Axle Counter Block System (ACB), Radio Block System (RB).
$\varphi_{LTL,ss,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione . Magnitude coefficient related to spacing system m.
$X_{LTL,ss,m} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione . Representative variable of spacing system m.
$h_{LTL,ss,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete organizzati con regime di circolazione . Length of network sections equipped with spacing system m.

$$X_{LTL,SS} = \frac{\sum_{m=1}^3 \varphi_{LTL,ss,m} \cdot X_{LTL,ss,m} \cdot h_{LTL,ss,m}}{MIN(\varphi_{LTL,ss,m}) \cdot \sum_{m=1}^3 h_{LTL,ss,m}}$$

$$X_{LTL,RM} = \frac{\sum_{m=1}^3 \varphi_{LTL,rm,m} \cdot X_{LTL,rm,m} \cdot h_{LTL,rm,m}}{MIN(\varphi_{LTL,rm,m}) \cdot \sum_{m=1}^3 h_{LTL,rm,m}}$$

$m =$	Modulazione della tipologia di telecomando =CTC, SCC, ACCM. Modulation of remote control system =CTC, SCC, ACCM.
$\varphi_{LTL,rm,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla tipologia di telecomando . Magnitude coefficient related to remote control system m
$X_{LTL,rm,m} =$	Variabile rappresentativa della tipologia di telecomando . Representative variable of remote control system m.
$h_{LTL,rm,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete coperti dalla tipologia di telecomando . Length of network sections equipped with remote control system m.

Variabili rappresentative – Carico in linea – Livello 2
 Representative Variables – In line transit load – Level 2

$X_{LTL,SS,AB} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione AB. <i>Representative variable of spacing system type Automatic Block System</i>
$m =$	Modulazione del regime di circolazione AB=Doppio binario (DT), semplice binario (ST). <i>Modulation of spacing system type Automatic Block System =double track (DT), simple track (ST).</i>
$\varphi_{SS,AB,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione AB su modulazione . <i>Magnitude coefficient related to spacing system type Automatic Block System with m-modulation</i>
$X_{LTL,SS,AB,m} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione AB su modulazione . <i>Representative variable of spacing system type Automatic Block System with m-modulation</i>
$h_{LTL,SS,AB,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete organizzati in regime di circolazione AB e modulazione <i>Length of network sections equipped with spacing system type Automatic Block System and m-modulation</i>

$$X_{LTL,SS,AB} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{LTL,SS,AB,m} \cdot X_{LTL,SS,AB,m} \cdot h_{LTL,SS,AB,m}}{MIN(\varphi_{LTL,SS,AB,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{LTL,SS,AB,m}}$$

$$X_{LTL,SS,ACB} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{LTL,SS,ACB,m} \cdot X_{LTL,SS,ACB,m} \cdot h_{LTL,SS,ACB,m}}{MIN(\varphi_{LTL,SS,ACB,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{LTL,SS,ACB,m}}$$

$X_{LTL,SS,ACB} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione ACB. <i>Representative variable of spacing system type Axle Counter Block System</i>
$m =$	Modulazione del regime di circolazione ACB=Doppio binario (DT), semplice binario (ST). <i>Modulation of spacing system type Axle Counter Block System =double track (DT), simple track (ST).</i>
$\varphi_{SS,ACB,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione ACB su modulazione . <i>Magnitude coefficient related to spacing system type Axle Counter Block System with m-modulation.</i>
$X_{LTL,SS,ACB,m} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione ACB su modulazione . <i>Representative variable of spacing system type Axle Counter Block System with m-modulation</i>
$h_{LTL,SS,ACB,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete organizzati in regime di circolazione ACB e modulazione . <i>Length of network sections equipped with spacing system type Axle Counter Block System with m-modulation</i>

$$X_{LTL,SS,ACB} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{LTL,SS,ACB,m} \cdot X_{LTL,SS,ACB,m} \cdot h_{LTL,SS,ACB,m}}{MIN(\varphi_{LTL,SS,ACB,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{LTL,SS,ACB,m}}$$

$X_{LTL,RM,ACCM} =$	Variabile rappresentativa della tipologia di telecomando ACCM. <i>Representative variable of remote control system type ACCM</i>
$m =$	Modulazione della tipologia di telecomando ACCM = posto periferico tipo PPM/PPACC, posto periferico tipo PPACCI. <i>Modulation of remote control system type ACCM = PPM/PPACC, PPACCI.</i>
$\varphi_{LTL,RM,ACCM,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla tipologia di telecomando ACCM su modulazione . <i>Magnitude coefficient related to remote control system type ACCM with m-modulation</i>
$X_{LTL,RM,ACCM,m} =$	Variabile rappresentativa della tipologia di telecomando ACCM su modulazione . <i>Representative variable of remote control system type ACCM with m-modulation</i>
$h_{LTL,RM,ACCM,m} =$	Numero di LDS, sotto telecomando ACCM, di tipo . <i>Number of m -type service locations equipped with remote control system type ACCM</i>

Si noti che in Tab. 6 viene riportata la forma funzionale delle variabili rappresentative $X_{LTL,SS,AB,DT}$ e $X_{LTL,SS,ACB,DT}$.

The functional form of the representative variables and is shown below (Tab. 10).

4.3.2.1.2. Carico in stazione

Per coerenza (Fig. 3) viene riportato lo sviluppo del ramo gerarchico relativo al carico in stazione.

Quindi (Tab. 7) viene riportata la forma funzionale del TAC relativo al carico in stazione.

4.3.2.1.3. Interruption interference load

The development of the hierarchical branch relating to the interruption interference load is shown below (Fig. 4).

The functional form of the TAC relating to the interruption interference load is shown below (Tab. 9).

Tabella 6 – Table 6

Variabili rappresentative – Carico in linea – Livello 3
 Representative Variables – In line transit load – Level 3

$$X_{LTL,SS,AB,DT} = \frac{\sum_{p=1}^2 \varphi_{LTL,SS,AB,DT,m} \cdot X_{LTL,SS,AB,DT,m} \cdot h_{LTL,SS,AB,DT,m}}{MIN(\varphi_{LTL,SS,AB,DT,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{LTL,SS,AB,DT,m}}$$

$X_{LTL,SS,AB,DT} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione AB su doppio binario. <i>Representative variable of spacing system type Automatic Block System on double track</i>
$m =$	Modulazione del regime di circolazione AB su doppio binario (DT)= blocco banalizzato (BAN), blocco non banalizzato (NoBan). <i>Modulation of spacing system type Automatic Block System on double track =banalized block, non-banalized block</i>
$\varphi_{LTL,SS,AB,DT,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione AB su doppio binario con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to spacing system type Automatic Block System on double track with m-modulation</i>
$X_{LTL,SS,AB,DT,m} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione AB su doppio binario con modulazione <i>Representative variable of spacing system type Automatic Block System on double track with m-modulation</i>
$h_{LTL,SS,AB,DT,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete organizzati con regime di circolazione AB su doppio binario con modulazione . <i>Length of network sections equipped with spacing system type Automatic Block System on double track with m-modulation</i>

$$X_{LTL,SS,ACB,DT} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{LTL,SS,ACB,DT,m} \cdot X_{LTL,SS,ACB,DT,m} \cdot h_{LTL,SS,ACB,DT,m}}{MIN(\varphi_{LTL,SS,ACB,DT,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{LTL,SS,ACB,DT,m}}$$

$X_{LTL,SS,ACB,DT} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione ACB su doppio binario. <i>Representative variable of spacing system type Axle Counter Block System on double track</i>
$m =$	Modulazione del regime di circolazione ACB su doppio binario (DT)= blocco banalizzato (BAN), blocco non banalizzato (NoBan). <i>Modulation of spacing system type Axle Counter Block System on double track =banalized block, non-banalized block</i>
$\varphi_{LTL,SS,ACB,DT,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato al regime di circolazione ACB su doppio binario con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to spacing system type Axle Counter Block System on double track with m-modulation</i>
$X_{LTL,SS,ACB,DT,m} =$	Variabile rappresentativa del regime di circolazione ACB su doppio binario con modulazione . <i>Representative variable of spacing system type Axle Counter Block System on double track with m-modulation</i>
$h_{LTL,SS,ACB,DT,m} =$	Lunghezza dei tratti di rete organizzati con regime di circolazione ACB su doppio binario con modulazione . <i>Length of network sections equipped with spacing system type Axle Counter Block System on double track with m-modulation.</i>

Infine (Tab. 8), viene riportata la forma funzionale delle variabili rappresentative $X_{STL,H}$ e $X_{STL,T}$.

4.3.2.1.3. Carico da interferenza interruzioni

Per quanto evidenziato (Fig. 4) viene riportato lo sviluppo del ramo gerarchico relativo al carico da interferenza interruzioni.

Di seguito (Tab. 9) viene riportata la forma funzionale del TAC relativo al carico da interferenza interruzioni.

Quindi (Tab. 10), viene riportata la forma funzionale delle variabili rappresentative $X_{II,IntShd}$ e $X_{II,IntNoShd}$.

The functional form of the representative variables and is shown below (Tab. 10).

4.3.2.2. Maintenance load

Following, (Fig. 5), the development of the hierarchical branch related to the maintenance load is reported.

Below (Tab. 11), the functional form of the TAC related to the maintenance load is reported.

Indeed (Tab. 12), the functional form of the representative variable is reported.

4.3.2.2. Carico da manutenzione

Proseguendo nella analisi, (Fig. 5), viene riportato lo sviluppo del ramo gerarchico relativo al carico da manutenzione.

Di seguito (Tab. 11), viene riportata la forma funzionale del TAC relativo al carico da manutenzione.

Infine, (Tab. 12), viene riportata la forma funzionale della variabile rappresentativa $X_{M,ImCRCT}$.

4.3.2.3. Carico da manovre

A seguire (Fig. 6), viene riportato lo sviluppo del ramo gerarchico relativo al carico da manovre.

Quindi (Tab. 13), viene riportata la forma funzionale del TAC relativo al carico da manovre.

4.4. Calibrazione

Per ciascuna tipologia di carico, sono stati considerati possibili regressori mutualmente esclusivi che, come menzionato, sono stati successivamente selezionati in base al livello di significatività statistica ($p\text{-value} < 0,05$) e al valore R-quadro.

Un p-value inferiore a un livello di significatività prescelto (comunemente 0,05) suggerisce che il coefficiente corrispondente è statisticamente significativo. Un valore R-quadro più elevato indica un miglior adattamento del modello ai dati.

4.5. Regressori

A seguire (Tab. 14, Tab. 15, Tab. 16, Tab. 17, Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20), per ciascuna tipologia di carico, per ogni postazione j-esima e per ogni turno i-esimo, sono riportati i possibili regressori, successivamente selezionati con i criteri menzionati in precedenza. Con riferimento al carico in stazione sono stati considerati sia i regressori che differenziano il carico per LDS abilitate da DCO da quelle non abilitate da DCO, sia i regressori in cui tale distinzione non viene fatta.

5. Acquisizione dati

5.1. Dati sulla circolazione e sull'infrastruttura

Ad eccezione dei dati relativi al numero di movimenti di manovra nelle LDS gestite dai DCO, tutte le informazioni, sia relative alla circolazione che all'infrastruttura, sono state estratte e rielaborate dalla Piattaforma Integra-

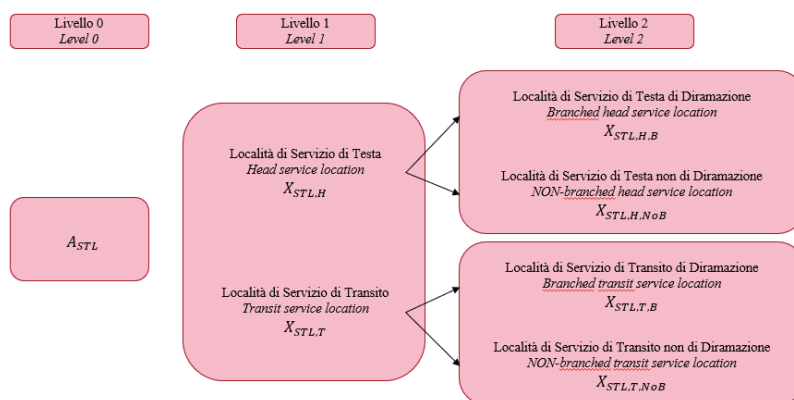


Figura 3 – AHP Carico da circolazione treni, Carico in stazione
Figure 3 – AHP Train circulation load, On station transit load

Tabella 7 – Table 7

TAC – Carico in stazione – Livello 0
Typological Adaptation Coefficients – On station transit load – Level 0

$$A_{STL} = \frac{\varphi_{STL,H} \cdot h_{STL,H} \cdot X_{STL,H} + \varphi_{STL,T} \cdot h_{STL,T} \cdot X_{STL,T}}{MIN(\varphi_{STL,H}; \varphi_{STL,T}) \cdot (h_{STL,H} + h_{STL,T})}$$

$A_{STL} =$	TAC per carico in stazione On station transit load TAC
$\varphi_{STL,H} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla presenza di LDS di testa. Head service location magnitude coefficients.
$\varphi_{STL,T} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla presenza di LDS di transito. Transit service location magnitude coefficients.
$h_{STL,H}$	Numero di LDS di testa. Number of head service location.
$h_{STL,T}$	Numero di LDS di transito. Number of transit service location.
$X_{STL,H}$	Variabile rappresentativa della presenza di LDS di testa. Head service location representative variables.
$X_{STL,T}$	Variabile rappresentativa della presenza di LDS di transito. Transit service location representative variables.

4.3.2.3. Load from maneuvers

Below (Fig. 6), the development of the hierarchical branch relating to the load from maneuvers is reported.

Finally (Tab. 13), the functional form of the TAC relating to the load from maneuvers is reported.

4.4. Calibration

For each type of load, possible regressors (self-excluding) were considered which, as mentioned, were then selected for the level of statistical significance ($p\text{-value} < 0.05$) and R-square value.

A p-value less than a chosen significance level (commonly 0.05) suggests that the corresponding coefficient is significant. A higher R-squared value suggests a better fit of the model to the data.

Variabili rappresentative – Carico in stazione – Livello 1
 Representative Variables – On station transit load – Level 1

$$X_{STL,H} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{STL,H,m} \cdot X_{STL,H,m} \cdot h_{STL,H,m}}{MIN(\varphi_{STL,H,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{STL,H,m}}$$

$m =$	Tipologia di LdS di testa= LDS di testa diramata (B), LDS di testa NON diramata (NoB). <i>Typology of head service station = Branched head service location (B), NON-branched head service location (NoB).</i>
$\varphi_{STL,H,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla presenza di LDS di testa con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to the presence of head service station with m-modulation.</i>
$X_{STL,H,m} =$	Variabile rappresentativa della presenza di LDS di testa con modulazione . <i>Representative variable of the presence of head service station with m-modulation.</i>
$h_{STL,H,m} =$	Numero di LDS di testa con modulazione . <i>Number of head service stations with m-modulation.</i>

$$X_{STL,T} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{STL,T,m} \cdot X_{STL,T,m} \cdot h_{STL,T,m}}{MIN(\varphi_{STL,T,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{STL,T,m}}$$

$m =$	Tipologia di LdS di transito= LDS di transito diramata (B), LDS di transito NON diramata (NoB). <i>Typology of transit service station = Branched transit service location (B), NON-branched transit service location (NoB).</i>
$\varphi_{STL,T,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alla presenza di LDS di transito con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to the presence of transit service station with m-modulation.</i>
$X_{STL,T,m} =$	Variabile rappresentativa della presenza di LDS di transito con modulazione . <i>Representative variable of the presence of transit service station with m-modulation.</i>
$h_{STL,T,m} =$	Numero di LDS di transito con modulazione . <i>Number of transit service stations with m-modulation.</i>

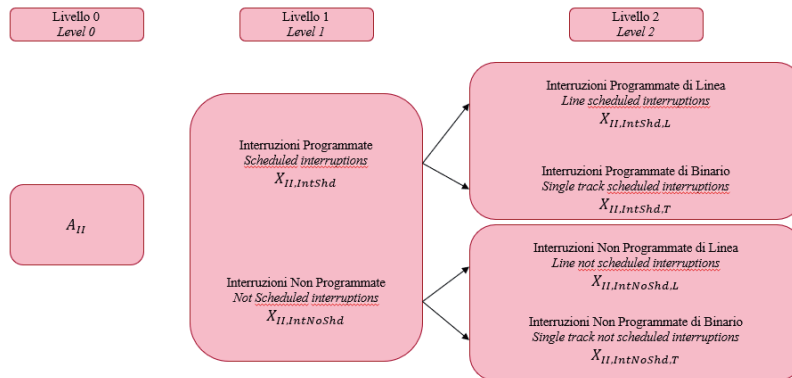


Figura 4 - AHP Carico da circolazione treni, Carico da interferenza interruzioni
 Figure 4 – AHP Train circulation load, Interference interruptions load

ta di Circolazione (PIC). PIC è un database aziendale in cui viene archiviata la maggior parte delle informazioni concernenti la circolazione ferroviaria.

In riferimento all'intervallo temporale di osservazione, sono stati considerati diversi periodi, avendo cura di escludere osservazioni anomale. A titolo esemplificativo, non sono stati inclusi periodi di chiusure temporanee di linee, variazioni temporanee nei volumi di traffico ordinario o periodi durante i quali si siano verificate modifiche nella configurazione di una postazione di lavoro.

4.5. Regressors

Following, (Tab. 14, Tab. 15, Tab. 16, Tab. 17, Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20), for each typology of workload, for each j-th position and for each i-th shift, the potential regressors are presented, subsequently selected according to the criteria mentioned previously. With reference to the on station workload, both regressors differentiating the load for service location enabled by CRCT and those not enabled, and regressors where this distinction is not made, were considered.

5. Data collection

5.1. Circulation and Infrastructure Data

Except for data related to the number of shunting movements in SL managed by the CRTCs, all information, both pertaining to circulation and infrastructure, was extracted and reprocessed from the integrated circulation platform (PIC). PIC is a database where the majority of the information related to train circulation is archived.

Regarding the reference time frame, various observation periods were considered, with careful exclusion outlier ob-

Tabella 9 – Table 9

TAC – Carico da interferenza interruzioni – Livello 0
 Typological Adaptation Coefficients – Interference interruptions load – Level 0

$$A_{II} = \frac{\varphi_{II,IntShd} \cdot h_{II,IntShd} \cdot X_{II,IntShd} + \varphi_{II,IntNoShd} \cdot h_{II,IntNoShd} \cdot X_{II,IntNoShd}}{MIN(\varphi_{II,IntShd}; \varphi_{II,IntNoShd}) \cdot (h_{II,IntShd} + h_{II,IntNoShd})}$$

$A_{II} =$	TAC per carico da interferenza interruzioni <i>Interference interruptions load TAC</i>
$\varphi_{II,IntShd} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni programmate. <i>Scheduled interruptions magnitude coefficients.</i>
$\varphi_{II,IntNoShd} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni NON programmate. <i>Not Scheduled interruptions magnitude coefficients.</i>
$h_{II,IntShd} =$	Durata delle interruzioni programmate. <i>Duration Scheduled interruptions.</i>
$h_{II,IntNoShd} =$	Durata delle interruzioni NON programmate. <i>Duration Not Scheduled interruptions.</i>
$X_{II,IntShd} =$	Variabile rappresentativa delle interruzioni programmate. <i>Scheduled interruptions representative variables.</i>
$X_{II,IntNoShd} =$	Variabile rappresentativa delle interruzioni NON programmate. <i>Not Scheduled interruptions representative variables.</i>

Tabella 10 – Table 10

Variabili rappresentative – Carico da interferenza interruzioni – Livello 1
 Representative Variables – Interference interruptions load – Level 1

$$X_{II,IntShd} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{II,IntShd,m} \cdot X_{II,IntShd,m} \cdot h_{II,IntShd,m}}{MIN(\varphi_{II,IntShd,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{II,IntShd,m}}$$

$m =$	Tipologia di interruzioni programmate = interruzioni programmate di linea (L), interruzioni programmate di binario (T). <i>Typology of scheduled interruption = Line scheduled interruptions (L), Single track scheduled interruptions (T).</i>
$\varphi_{II,IntShd,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni programmate con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to scheduled interruption with m-modulation</i>
$X_{II,IntShd,m} =$	Variabile rappresentativa delle interruzioni programmate con modulazione . <i>Representative variable of related to scheduled interruption with m-modulation</i>
$h_{II,IntShd,m} =$	Durata delle interruzioni programmate con modulazione . <i>Duration of scheduled interruptions with m-modulation</i>

$$X_{II,IntNoShd} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{II,IntNoShd,m} \cdot X_{II,IntNoShd,m} \cdot h_{II,IntNoShd,m}}{MIN(\varphi_{II,IntNoShd,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{II,IntNoShd,m}}$$

$m =$	Tipologia di interruzioni NON programmate = interruzioni NON programmate di linea (L), interruzioni NON programmate di binario (T). <i>Typology of not scheduled interruption = Line not scheduled interruptions (L), Single track not scheduled interruptions (T).</i>
$\varphi_{II,IntNoShd,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni NON programmate con modulazione . <i>Magnitude coefficient related to not scheduled interruption with m-modulation</i>
$X_{II,IntNoShd,m} =$	Variabile rappresentativa delle interruzioni NON programmate con modulazione . <i>Representative variable of related to not scheduled interruption with m-modulation</i>
$h_{II,IntNoShd,m} =$	Durata delle interruzioni NON programmate con modulazione. <i>Duration of not scheduled interruptions with m-modulation</i>

In generale, sulla base delle considerazioni già menzionate, della natura dei dati da mappare e della loro disponibilità/accessibilità su PIC, i periodi di osservazione oscillano da un minimo di 2 a un massimo di 24 mesi.

Tutti i dati di circolazione (numero di treni, numero di interruzioni, etc.) sono stati successivamente utilizzati nel

servazioni. For instance, periods of temporary line closures, temporary variations in ordinary traffic volumes, or periods during which changes in the configuration of a workstation occurred were not included.

Based on these methodological constraints and the nature, availability, and accessibility of PIC data, the observa-

modello in termini di flusso per turno giornaliero (mattina, pomeriggio, notte).

5.2. Attuale allocazione delle risorse sulle postazioni

L'attuale allocazione del personale per ciascuna sala di controllo territoriale, per ogni postazione di lavoro e per ogni turno, è stata ottenuta consultando rappresentanti territoriali.

Date le specifiche peculiarità di ciascuna control room, nel tempo sono stati sottoscritti vari e molteplici accordi sindacali, e conseguentemente la configurazione dei turni risulta mediamente eterogenea sul territorio nazionale.

Difatti, i turni in una determinata postazione potrebbero non coincidere con quelli di un'altra, o nel caso di postazioni abilitate da più operatori, gli orari di inizio e fine turno degli operatori, pur garantendo la continuità del servizio, potrebbero non essere coincidenti.

Quest'ultimo aspetto complica particolarmente l'identificazione di un'estensione univoca del turno o, viceversa, l'identificazione del numero di risorse dato un turno di estensione fissa.

Grazie ai vari riferimenti territoriali, selezionati in base alla loro esperienza pluriennale, per ciascuna sala di controllo, sono state identificate alcune postazioni/turni pivot. Queste ultime, secondo il parere degli stessi

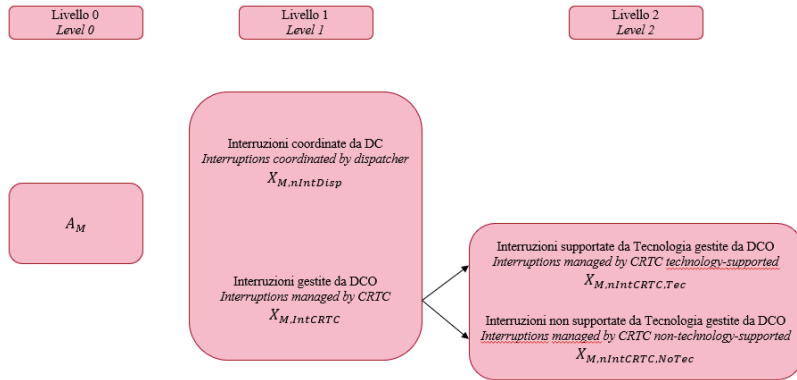


Figura 5 – AHP Carico da manutenzione
Figure 5 – AHP Maintenance load

Tabella 11 – Table 11

TAC – Carico da manutenzione – Livello 0

Typological Adaptation Coefficients – Maintenance load – Level 0

$$A_M = \frac{\varphi_{M,IntDisp} \cdot h_{M,IntDisp} \cdot X_{M,IntDisp} + \varphi_{M,IntCRCT} \cdot h_{M,IntCRCT} \cdot X_{M,IntCRCT}}{MIN(\varphi_{M,IntDisp}; \varphi_{M,IntCRCT}) \cdot (h_{M,IntDisp} + h_{M,IntCRCT})}$$

$A_M =$	TAC per carico da manutenzione ML TAC
$\varphi_{M,IntDisp} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni coordinate da DC. Interruptions coordinated by central dispatcher magnitude coefficients.
$\varphi_{M,IntCRCT} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni gestite da DCO. Interruptions managed by CRCT magnitude coefficients.
$h_{M,IntDisp}$	Numero di interruzioni coordinate da DC. Number of Interruptions coordinated by central dispatcher.
$h_{M,IntCRCT}$	Numero di interruzioni gestite da DCO. Number of Interruptions managed by CRCT.
$X_{M,IntDisp}$	Variabile rappresentativa delle interruzioni coordinate da DC. Interruptions coordinated by central dispatcher representative variables.
$X_{M,IntCRCT}$	Variabile rappresentativa delle interruzioni gestite da DCO. Interruptions managed by CRCT representative variables.

Tabella 12 – Table 12

Variabili rappresentative – Carico da manutenzione – Livello 1

Representative Variables – Maintenance load – Level 1

$$X_{M,IntCRCT} = \frac{\sum_{m=1}^2 \varphi_{M,IntCRCT,m} \cdot X_{M,IntCRCT,m} \cdot h_{M,IntCRCT,m}}{MIN(\varphi_{M,IntCRCT,m}) \cdot \sum_{m=1}^2 h_{M,IntCRCT,m}}$$

$m =$	caratteristiche delle interruzioni gestite da DCO = supportate da tecnologia (Tec), non supportate da tecnologia (NoTec). Characteristics of interruptions managed CRCT = technology-supported (Tec), non-technology-supported (NoTec).
$\varphi_{M,IntCRCT,m} =$	Coefficiente di magnitudo legato alle interruzioni gestite da DCO con modulazione. Magnitude coefficient related to interruptions managed by CRCT with m-modulation.
$X_{M,IntCRCT,m} =$	Variabile rappresentativa delle interruzioni gestite da DCO con modulazione. Representative variable of interruptions managed by CRCT with m-modulation.
$h_{M,IntCRCT,m} =$	Numero delle interruzioni gestite da DCO con modulazione. Number of interruptions managed by CRCT with m-modulation.

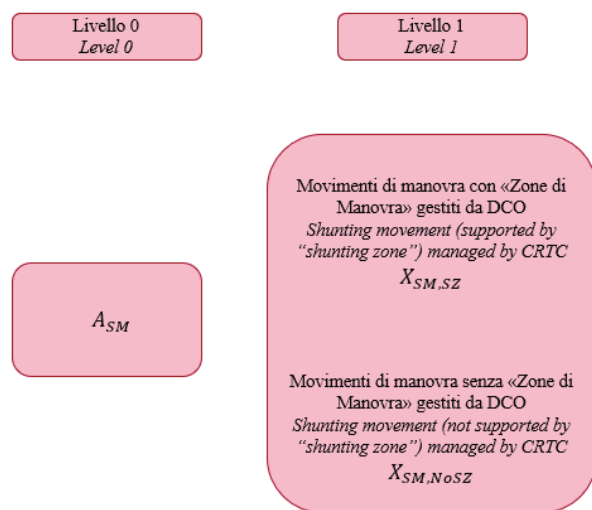


Figura 6 – AHP Carico da manovre
Figure 6 – AHP Shunting movement load

esperti, per specifici turni, sono state considerate correttamente dimensionate e conseguentemente utilizzate come benchmark di riferimento per la calibrazione del modello.

Tali postazioni pivot sono state selezionate seguendo il principio di eterogeneità per aspetti riguardanti:

- composizione del carico di lavoro;

tion windows ranged from 2 to 24 months.

All circulation metrics (train frequency, service interruptions, etc.) were subsequently normalized to daily shift intervals (morning, afternoon, night) for model integration.

5.2. Current Resource Allocation Data

The current personnel allocation for each regional operation control centre, for each workstation, and for each shift were obtained by consulting regional representatives.

Given the peculiarities of each traffic control room, over time various and multiple trade union agreements have been signed, and consequently the shift rotation is on average heterogeneous across the different control rooms.

In fact, the shifts on a given workstation may not coincide with the shifts of another, or in the case of workstations enabled by more than one person, the start and end times of the operators' shifts may not coincide.

This latter aspect particularly complicates the identification of a univocal shift extension or, conversely, the identification of the number of resources for a fixed shift extension.

Under the guidance of regional representatives, certain pivot workstations-shifts (PWS) were identified for each traffic control room. These workstations, in the opinion of the same representatives, for specific shifts, were considered well-sized and consequently used as a reference benchmark to calibrate the model.

Tabella 13 – Table 13

TAC – Carico da manovre – Livello 0
Typological Adaptation Coefficients – Shunting movement load – Level 0

$$A_{SM} = \frac{\varphi_{SM,SZ} \cdot h_{SM,SZ} \cdot X_{SM,SZ} + \varphi_{SM,NoSZ} \cdot h_{SM,NoSZ} \cdot X_{SM,NoSZ}}{MIN(\varphi_{SM,SZ}; \varphi_{SM,NoSZ}) \cdot (h_{SM,SZ} + h_{SM,NoSZ})}$$

$A_M =$	TAC per carico da manovre SML TAC
$\varphi_{SM,SZ} =$	Coefficiente di magnitudo legato ai movimenti di manovra con “zone di manovra” gestiti da DCO <i>Shunting movement (supported by “shunting zone”) managed by CRTC magnitude coefficients.</i>
$\varphi_{SM,NoSZ} =$	Coefficiente di magnitudo legato ai movimenti di manovra senza “zone di manovra” gestiti da DCO <i>Shunting movement (not supported by “shunting zone”) managed by CRTC magnitude coefficients.</i>
$h_{SM,SZ} =$	Numero dei movimenti di manovra con “zone di manovra” gestiti da DCO <i>Number of Shunting movement (supported by “shunting zone”) managed by CRTC.</i>
$h_{SM,NoSZ} =$	Numero dei movimenti di manovra senza “zone di manovra” gestiti da DCO <i>Number of Shunting movement (not supported by “shunting zone”) managed by CRTC.</i>
$X_{SM,SZ} =$	Variabile rappresentativa dei movimenti di manovra con “zone di manovra” gestiti da DCO. <i>Shunting movement (supported by “shunting zone”) managed by CRTC representative variables.</i>
$X_{SM,NoSZ} =$	Variabile rappresentativa dei movimenti di manovra senza “zone di manovra” gestiti da DCO <i>Shunting movement (not supported by “shunting zone”) managed by CRTC representative variables.</i>

- infrastruttura;
- numero di operatori.

Il campione utilizzato per la calibrazione rappresenta il 17% delle postazioni-turno analizzate.

5.3. Descrizione del campione

Le caratteristiche relative al carico e all'infrastruttura della rete ferroviaria sono altamente eterogenee fra i territori; conseguentemente, il numero di postazioni DCO all'interno delle sale di controllo varia, da un minimo di 2 a un massimo di 15.

Attualmente, la rete ferroviaria gestita da RFI comprende circa 17.000 chilometri di binari, con oltre il 50% su doppio binario. Più dell'80% della rete è gestito tramite controllo remoto: nel 58% dei casi si tratta di controllo remoto di tipo CTC, nel 25% di tipo SCC e nel 17% di tipo ACCM (quest'ultimo è principalmente concentrato nei territori di Bologna, Milano e Roma).

Le sale di controllo territoriali gestiscono e monitorano più di 3.000 LDS, il 50% delle quali ricade nelle giurisdizioni delle sale delle principali città italiane (Milano, Torino, Roma, Bologna e Napoli).

La percentuale di LDS dove è possibile effettuare incroci o precedenza in ciascun territorio varia tra il 50% e il 76% delle località stesse.

Ogni giorno in Italia, RFI gestisce circa 10.000 treni: di questi, approssimativamente il 78% costituisce traffico regionale, il 4% traffico Alta Velocità, il 2% servizio universale, il 5% traffico merci e la parte rimanente è traffico di servizio. Rispetto al traffico giornaliero medio gestito dalle postazioni DCO, circa il 48% di questo si concentra nel turno pomeridiano, il 38% nel turno mattutino e il rimanente 16% nel turno serale. Il solo territorio di Milano conta il 25% di tutti i treni circolanti nel paese. I valori più bassi sono registrati nei territori di Cagliari, Reggio Calabria, Bari, Palermo e Pescara, dove il dato aggregato supera di poco il 12% dei treni circolanti. Di seguito (Fig. 7), viene riportata la distribuzione dei volumi circolanti tra le diverse sale.

Mediamente, per ogni postazione, un treno attraversa circa 7 LDS (fermate escluse), con un massimo di 19 e un minimo di 2. Considerando solo le LDS direttamente gestite dal DCO, il numero medio di LDS attraversate

Tabella 14 – Table 14

Regressori Carico da circolazione treni, Carico in linea
Regressors Train circulation load, In line transit load

$R_{LTL,1} = A_{LTL} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{LTL,2} = A_{LTL} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{LTL,3} = A_{LTL} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{LTL,4} = A_{LTL} \cdot nTr$
$R_{LTL,5} = nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{LTL,6} = nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{LTL,7} = nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{LTL,8} = nTr$

Tabella 15 – Table 15

Regressori Carico da circolazione treni, Carico in stazione (tutte le LDS)
Regressors Train circulation load, On station transit load (All Service location)

$R_{SLT,1} = A_{STL} \cdot nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT,2} = A_{STL} \cdot nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT,3} = A_{STL} \cdot nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT,4} = A_{STL} \cdot nSL \cdot nTr$
$R_{SLT,5} = A_{STL} \cdot nSL$
$R_{SLT,6} = nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT,7} = nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT,8} = nSL \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT,9} = nSL \cdot nTr$
$R_{SLT,10} = nSL$

Tabella 16 – Table 16

Regressori Carico da circolazione treni, Carico in stazione (LDS abilitate da DCO)
Regressors Train circulation load, On station transit load (Service location managed by CRTC)

$R_{SLT_CRTC,1} = A_{STL} \cdot nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_CRTC,2} = A_{STL} \cdot nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT_CRTC,3} = A_{STL} \cdot nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_CRTC,4} = A_{STL} \cdot nSL_{CRTC} \cdot nTr$
$R_{SLT_CRTC,5} = A_{STL} \cdot nSL_{CRTC}$
$R_{SLT_CRTC,6} = nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_CRTC,7} = nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT_CRTC,8} = nSL_{CRTC} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_CRTC,9} = nSL_{CRTC} \cdot nTr$
$R_{SLT_CRTC,10} = nSL_{CRTC}$

These PSW were selected following the principle of heterogeneity with respect to:

- workload composition;
- infrastructure;
- number of operators.

The sample used for calibration represents 17% of the workstation-shift analyzed.

5.3. Sample Description

The infrastructure and traffic load characteristics across the railway network exhibit substantial heterogeneity among

Tabella 17 – Table 17
 Regressori Carico da circolazione treni, Carico in stazione (LDS non abilitate da DCO)
 Regressors Train circulation load, On station transit load (Service location not managed by CRTC)

$R_{SLT_DISP,1} = A_{STL} \cdot nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_DISP,2} = A_{STL} \cdot nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT_DISP,3} = A_{STL} \cdot nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_DISP,4} = A_{STL} \cdot nSL_{DISP} \cdot nTr$
$R_{SLT_DISP,5} = nSL_{DISP}$
$R_{SLT_DISP,6} = nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel}) \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_DISP,7} = nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{vel})$
$R_{SLT_DISP,8} = nSL_{DISP} \cdot nTr \cdot (1 + HT_{cat})$
$R_{SLT_DISP,9} = nSL_{DISP} \cdot nTr$
$R_{SLT_DISP,10} = nSL_{DISP}$

Tabella 18 – Table 18
 Regressori Carico da circolazione treni, Carico da interferenza interruzioni
 Regressors Train circulation load, Interference interruptions load

$R_{II,1} = A_{II} \cdot nTr \cdot IntDuration$
$R_{II,2} = nTr \cdot IntDuration$

Tabella 19 – Table 19
 Regressori Carico da manutenzione
 Regressors Maintenance load

$R_{M,1} = A_M \cdot nIntTic$
$R_{M,2} = nIntTic$

Tabella 20 – Table 20
 Regressori Carico da manovre
 Regressors Shunting movement load

$R_{SM,1} = A_{SM} \cdot nSM$
$R_{SM,2} = nSMR_{SM,2} = nSM$

territories, resulting in varying numbers of CRTC's workstations within control rooms, ranging from 2 to 15.

The railway network currently managed by RFI encompasses approximately 17,000 kilometers of track, with over 50% consisting of double-track lines. Remote control systems govern more than 80% of the network, distributed as follows: 58% utilizing CTC, 25% employing SCC, and 17% operating under ACCM (predominantly concentrated in the Bologna, Milan, and Rome territories).

The territorial control rooms manage and monitor in excess of 3,000 railway service locations, with 50% of these falling under the jurisdiction of control rooms in major Italian metropolitan areas (Milan, Turin, Rome, Bologna, and Naples).

The proportion of SL capable of accommodating train crossing or overtaking operations varies by territory, ranging from 50% to 76% of total locations.

RFI manages approximately 10,000 daily train movements across Italy, comprising approximately 78% regional traffic, 4% high-speed services, 2% universal service, 5% freight transport, and the remainder consisting of service traffic. The daily traffic distribution, with regard to trains managed from CRCTs workstations, across shifts shows approximately 48% concentration during the afternoon shift, 38% during the

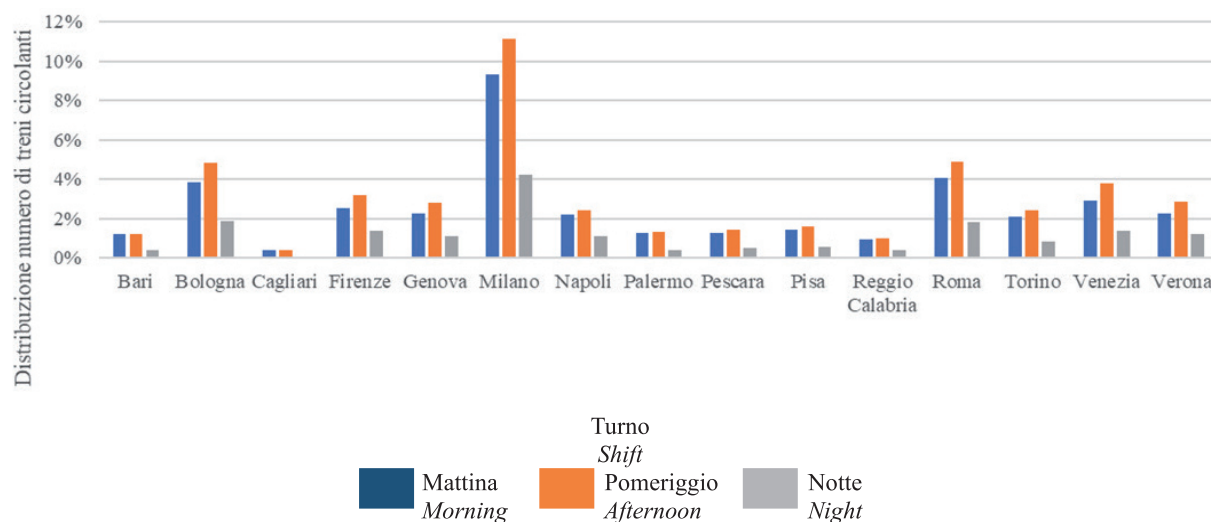


Figura 7 – Distribuzione numero treni circolanti
 Figure 7 – Distribution of number trains movements

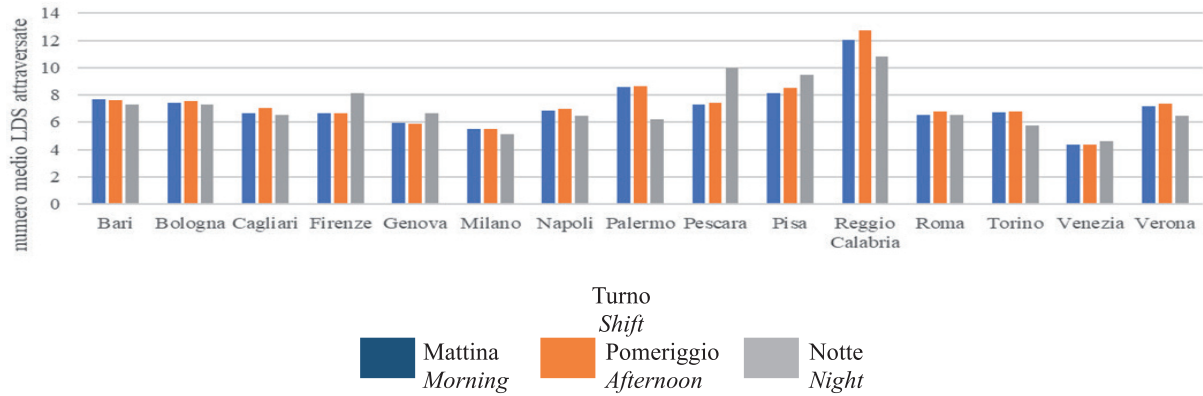


Figura 8 – Distribuzione numero medio di LDS attraversate
 Figure 8 – Distribution of average number of service locations traversed

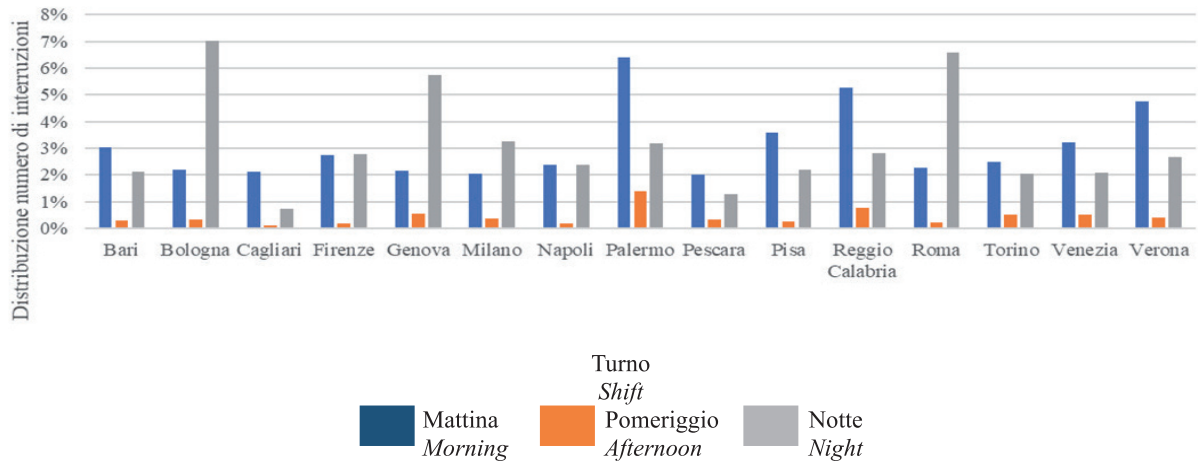


Figura 9 – Distribuzione numero interruzioni.
 Figure 9 – Distribution of interruptions number.

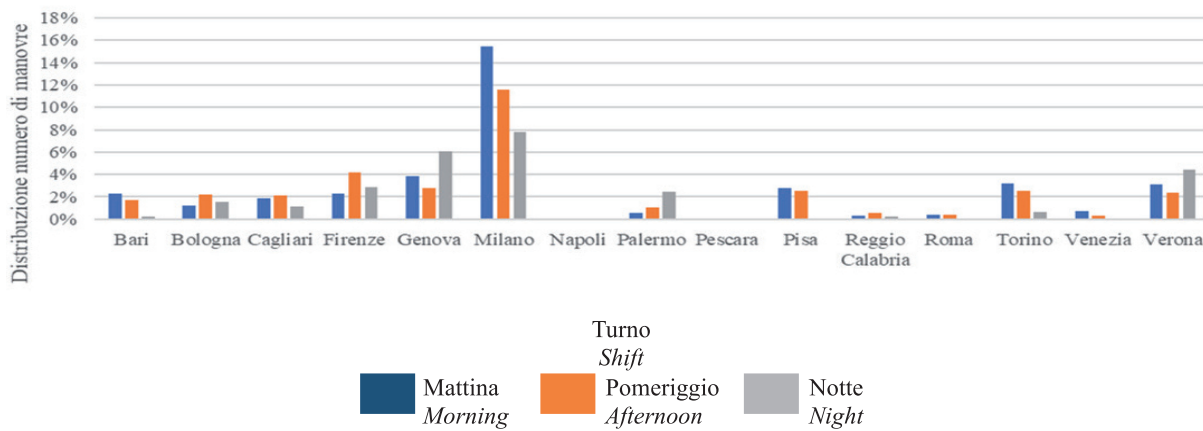


Figura 10 – Distribuzione numero manovre
 Figure 10 – Distribution of shunting movements number

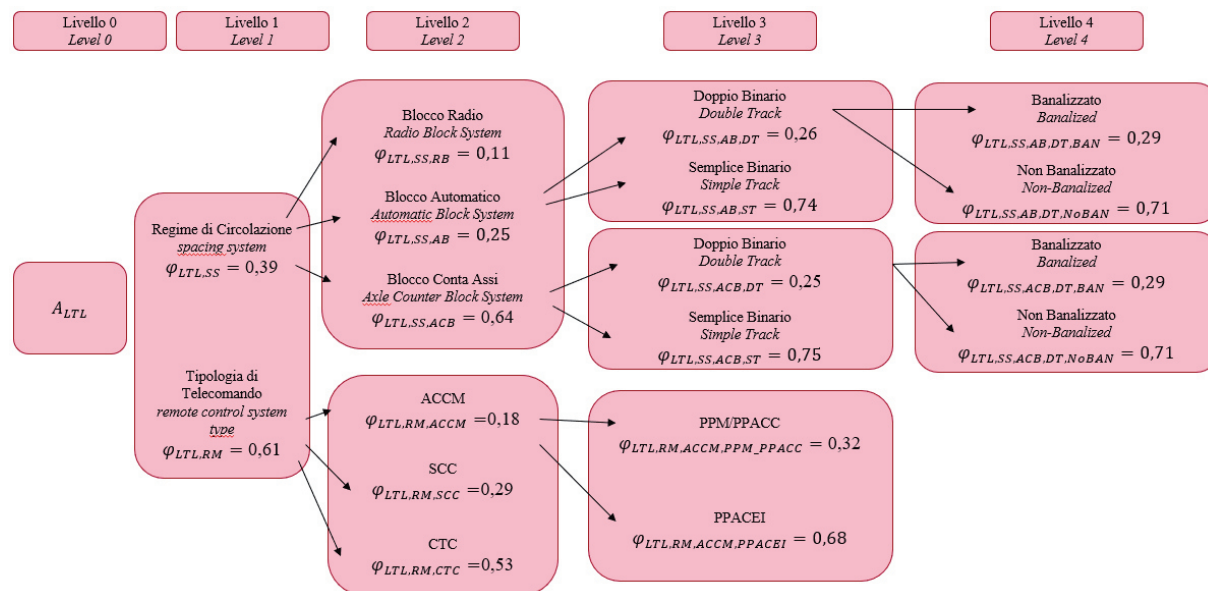


Figura 11 – Coefficienti di magnitudo AHP Carico da circolazione treni, Carico in linea
 Figure 11 – AHP magnitude coefficients Train circulation load, In line transit load

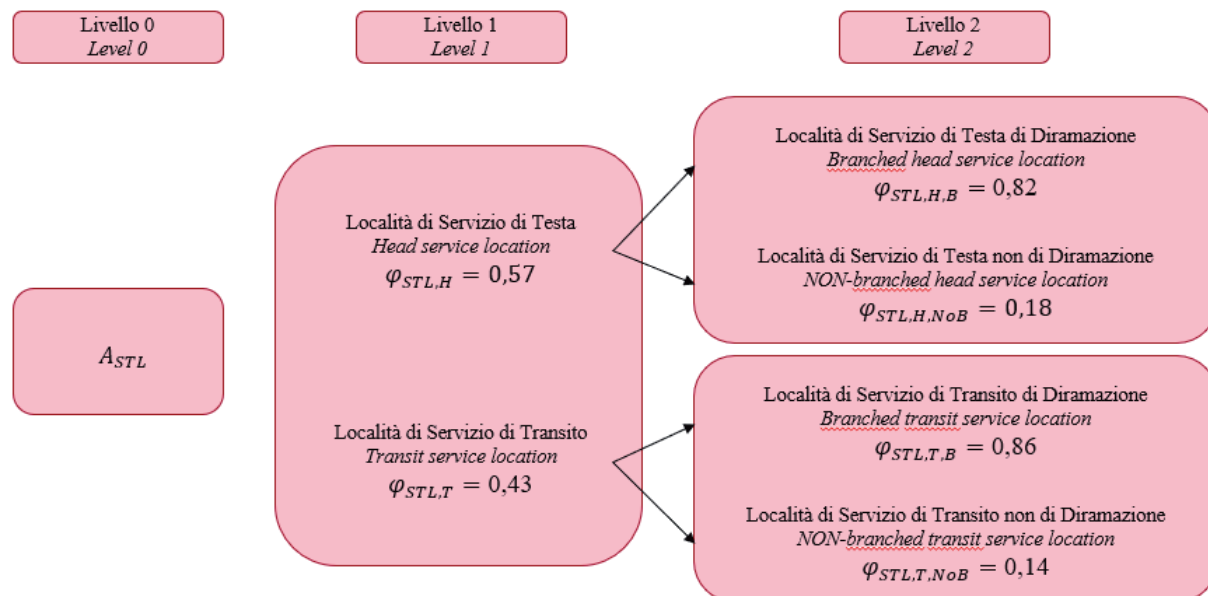


Figura 12 – Coefficienti di magnitudo AHP Carico da circolazione treni, Carico in stazione
 Figure 12 – AHP magnitude coefficients Train circulation load, On station transit load

diminuisce a 4,8. Di seguito (Fig. 8), viene riportata la distribuzione del numero medio di LDS attraversate dai treni.

Il livello medio di eterotachicità è del 17%, mentre il grado medio di eterogeneità del traffico è del 47%. I valori più alti sono raggiunti nei territori di Milano, Bologna e Venezia.

morning shift, and the remaining 16% during the evening shift. The Milan territory alone accounts for 25% of the nation's total train movements. The lowest volumes are recorded in the territories of Cagliari, Reggio Calabria, Bari, Palermo, and Pescara, collectively representing slightly over 12% of total train movements. Below (Fig. 7), distribution of the volume of circulating train among regional control room.

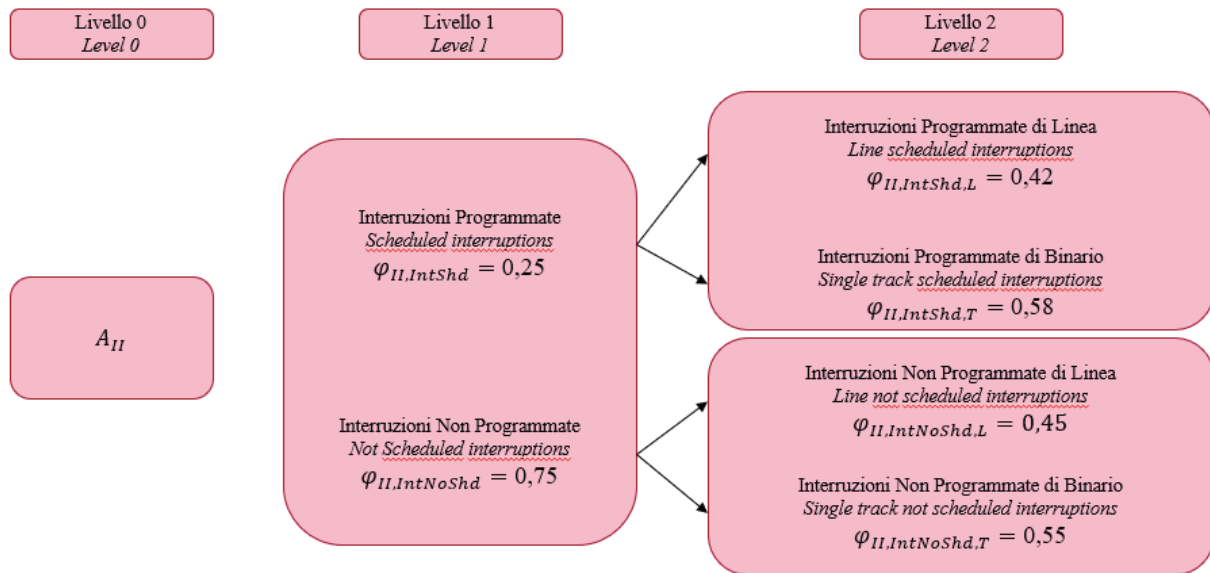


Figura 13 – Coefficienti di magnitudo AHP Carico da circolazione treni, Carico da interferenza interruzioni
Figure 13 – AHP magnitude coefficients Train circulation load, Interference interruptions load

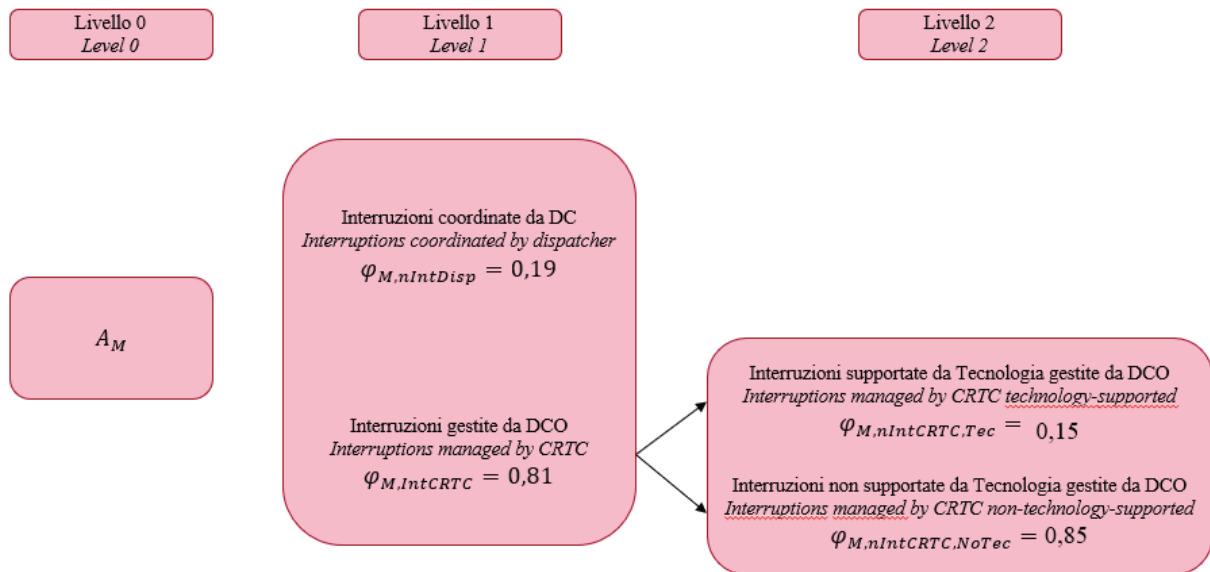


Figura 14 – Coefficienti di magnitudo AHP Carico da manutenzione
Figure 14 – AHP magnitude coefficients Maintenance load

Riguardo alle interruzioni gestite tramite le postazioni, a livello nazionale, si contano in media 730 interruzioni al giorno concesse quasi interamente durante i turni mattutino e serale. A differenza del transito dei treni, la frequenza di concessione delle interruzioni, nonché la distribuzione delle durate, è più omogenea sul territorio. Di seguito (Fig. 9), viene riportata la distribuzione del numero di interruzioni tra le sale di controllo.

On average, for each workstation, a train passes through approximately 7 service locations, with a maximum of 19 and a minimum of 2. Considering only the service locations directly managed by CRTC, the average number of service locations traversed decreases to 4.8. Below (Fig. 8), the distribution of average number of SL crossed by train.

Heterotachicity levels average 17%, while traffic heterogeneity indices exhibit a mean value of 47%. Peak values

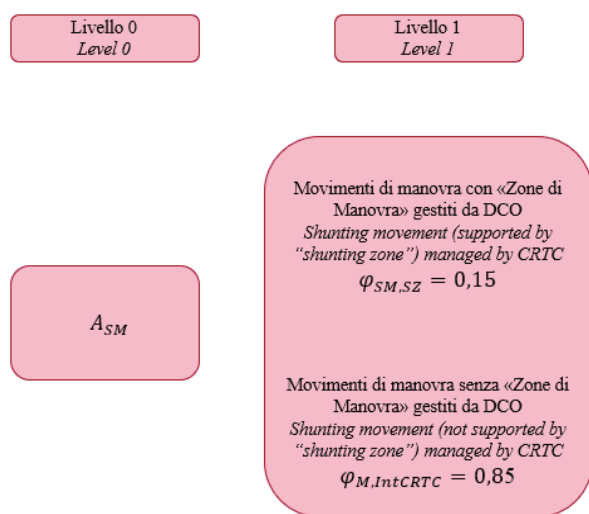


Figura 15 – Coefficienti di magnitudo AHP Carico da manovre

Figure 15 – AHP magnitude coefficients Shunting movements load

Per quanto concerne i movimenti di manovra programmati, direttamente gestiti dal DCO, si registra mediamente un'operazione di manovra per turno per postazione. La maggior parte delle operazioni di manovra avviene al mattino, il 35% nel pomeriggio e il rimanente 26% di notte. Il 36% di tutti i movimenti di manovra gestiti dal DCO si verifica nel territorio di Milano, seguito da Genova con il 13%. A conferma, (cfr. Fig. 10) viene riportata la distribuzione dei volumi delle manovre effettuate nelle sale circolazione.

are observed in the Milan, Bologna, and Venice territorial jurisdictions.

Track possession analysis reveals a national average of 730 daily interruptions, predominantly distributed across morning and evening operational periods. In contrast to train movement patterns, both the temporal distribution and duration of track possessions demonstrate greater territorial homogeneity. Below (Fig. 9), the distribution of volume of track possessions among the regional control room.

Analysis of CRTC-managed scheduled shunting operations indicates a mean frequency of one movement per shift per workstation. The temporal distribution reveals 39% of operations occurring during morning shifts, 35% during afternoon periods, and 26% during night shifts. Spatial analysis demonstrates that the Milan territory accounts for 36% of total CRTC-managed shunting movements, followed by Genoa at 13%. According to that condition (ref. Fig. 10) the distribution of volume of shunting movements among the regional control room.

5.4. Campione dell'indagine AHP

The Analytic Hierarchy Process (AHP) survey, conducted with the specifications mentioned previously, was administered via an electronic form to 26 experts in the railway sector. The results were collected in a spreadsheet and subsequently processed in order to calculate the value of the magnitude coefficients.

6. Results

6.1. AHP outcomes

The outcomes (ref. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15), in alignment with the hierarchy utilized for the con-

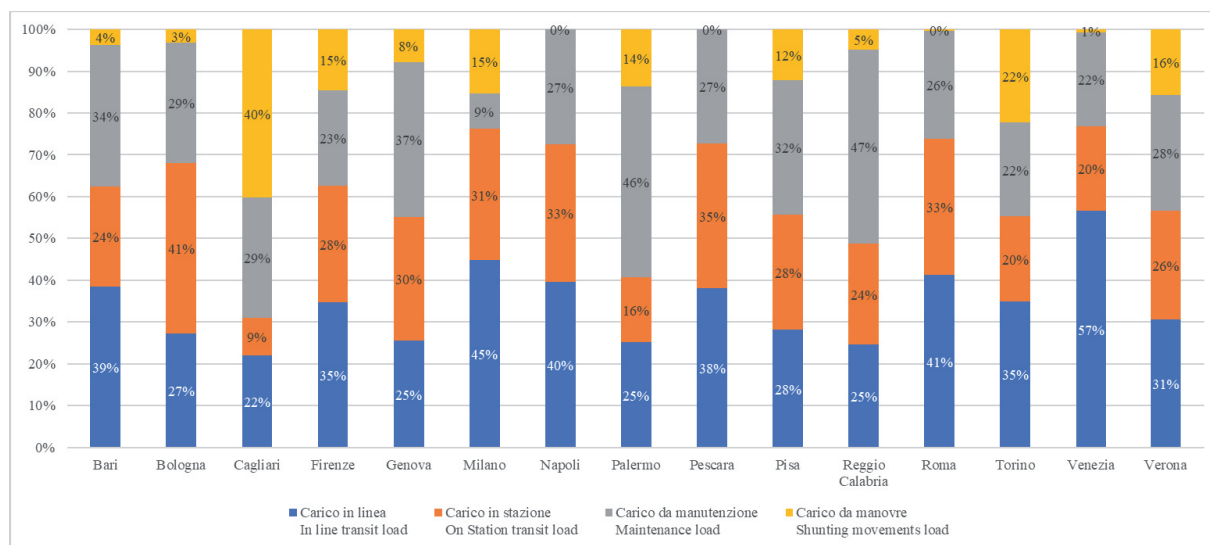


Figura 16 – Distribuzione percentuale delle tipologie di carico
Figure 16 – Percentage distribution of load types

5.4. Campione dell'indagine AHP

L'indagine AHP, condotta con le specifiche menzionate in precedenza, è stata somministrata, mediante un modulo elettronico, a 26 esperti del settore ferroviario. I risultati sono stati raccolti in un foglio di calcolo e successivamente elaborati al fine di calcolare il valore dei coefficienti di magnitudo.

6. Risultati

6.1. Risultati dell'analisi AHP

I risultati (cfr. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15), in linea con la gerarchia utilizzata per la costruzione dell'indagine AHP, si riporta il valore dei coefficienti di magnitudo. Si può notare che per ogni aggregazione di caratteristiche ascrivibili ad una stessa variabile rappresentativa, la somma dei coefficienti di magnitudo è pari a 1. Si ricorda inoltre che maggiore è il valore del coefficiente è maggiore è stato ritenuto l'impatto di un determinato elemento qualitativo sulla amplificazione del workload.

6.2. Risultati del modello di regressione

Per ogni tipo di carico, in base agli indicatori di significatività statistica, sono stati selezionati i regressori e riportati di seguito (Tab. 21).

Relativamente al carico da interruzioni non è stato preso in considerazione alcun regressore in quanto, dalla calibrazione, tutti i possibili regressori ascrivibili al suddetto carico non hanno mostrato la necessaria significatività statistica.

Si può notare inoltre che né il grado di eterotachicità né il livello di eterogeneità del traffico sono risultati significativi.

Di seguito (Tab. 22), viene riportato il dettaglio della calibrazione.

L'analisi dimostra generalmente una buona capacità predittiva del modello (R Square>0,8), supportata da un'eccellente significatività statistica (il P-value di tutti i regressori è molto basso) (Tab. 21).

Si può osservare che i coefficienti, come atteso, sono tutti positivi, significando che all'aumentare di questi, aumenta anche il valore del carico di lavoro previsto.

Inoltre, l'analisi ha rivelato che solo per il carico di linea e da manovra, le caratteristiche qualitative del carico,

Regressori selezionati
Selected regressors

Tabella 21 – Table 21

Regressori selezionati Selected regressors	Formulazione Formula
Carico in linea In line transit load	$R_{LTL,4} = A_{LTL} \cdot nTr$
Carico in stazione On station transit load	$R_{STL,9} = nSL \cdot nTr$
Carico da manutenzione Maintenance load	$R_{M,2} = nIntTic$
Carico da manovre Shunting movements load	$R_{SM,1} = A_{SM} \cdot nSM$

Risultati della calibrazione
Calibration results

Tabella 22 – Table 22

Regression Statistics				
R Square	0,89			
Adj - R square	0,86			
Standard Error	55,02			
Observation	57			
Significance F	4,47E-24			
	Parametri del modello Model parameters (β)	Standard Error	t-Stat	P-Value
$R_{LTL,4}$	0,066	0,013	5,033	5,91E-06
$R_{STL,9}$	0,084	0,016	5,098	4,7E-06
$R_{M,2}$	7,531	1,506	5,001	6,63E-06
$R_{SM,1}$	4,947	1,444	3,427	0,001

struction of the AHP survey, the values of the magnitude coefficients are reported. It can be observed that for each aggregation of characteristics attributable to the same representative variable, the sum of the magnitude coefficients equals 1. It is further noted that the greater the value of the coefficient, the greater the impact of a specific qualitative element on workload amplification has been deemed to be.

6.2. Regression model outcomes

For each type of load, based on the statistical significance indicators, the regressors were selected and reported below (Tab. 21).

Regarding the interruption workload, no regressors were taken into consideration as, from the calibration, all possible regressors attributable to the aforementioned workload did not demonstrate the necessary statistical significance.

It can furthermore be observed that neither the degree of heterotachicity nor the level of traffic heterogeneity proved to be significant.

modellate attraverso l'analisi AHP, sono risultate statisticamente significative.

6.3. Validazione

Noti i valori dei parametri del modello β , riprendendo la forma funzionale esposta nel paragrafo 4, è agevole calcolare per ogni postazione i e turno j il valore di *workload* y_{ij} utilizzando la seguente formula lineare:

$$y_{ij} = \beta_{LTL,A} \cdot R_{LTL,A} + \beta_{SLT,9} \cdot R_{SLT,9} + \beta_{M,2} \cdot R_{M,2} + \beta_{SM,1} \cdot R_{SM,1}$$

Relativamente all'ipotesi fatta sul rapporto tra valore del carico di lavoro e risorse assegnate per postazione-turno (ipotesi di assegnazione), l'applicazione del modello sull'intera popolazione di postazioni-turno mostra che l'86% delle postazioni-turno sono correttamente dimensionate o leggermente sovradimensionate, e solo il 14% risulta leggermente sottodimensionato.

È interessante notare che, dal confronto con i referenti locali, le postazioni-turno risultate sottodimensionate sono regolarmente presidiate da operatori di sussidio che compensano efficacemente il carico di lavoro aggiuntivo.

Riepilogando (Fig. 16), si riporta la distribuzione delle tipologie di carico tra le sale di controllo.

7. Conclusioni e raccomandazioni

7.1. Conclusioni della ricerca

Lo studio presenta un approccio esaustivo per stimare il carico di lavoro degli operatori del traffico ferroviario attraverso un modello ibrido che combina regressione (Tab. 22) lineare multipla e analisi multicriterio AHP. Incorporando fattori quantitativi e qualitativi, il modello fornisce un'analisi olistica del carico di lavoro nelle postazioni di controllo. Questo quadro metodologico consente un'allocatione razionale delle risorse, garantendo il numero corretto di operatori per turno per gestire efficacemente i flussi di traffico e affrontare le complessità operative. L'applicazione della AHP per la quantificazione dei fattori qualitativi, basata sulle valutazioni degli esperti, che hanno lavorato essi stessi su quelle postazioni, assicura che il modello rifletta accuratamente le reali esigenze operative.

In linea con le caratteristiche richieste per gli indicatori di carico di lavoro, identificate nella letteratura tecnica, il modello proposto incorpora attributi essenziali per una misurazione efficace del *workload*. Specificamente, esso dimostra sensibilità riflettendo accuratamente le variazioni del carico di lavoro tra turni e postazioni. Inoltre, la capacità diagnostica del modello consente l'identificazione precisa dei predittori del carico, come l'intensità del traffico o le interruzioni, soddisfacendo il requisito di comprensione dei fattori alla base della quantificazione del *workload*. Mantiene inoltre la non-invasività, utilizzando dati operativi esistenti per evitare impatti sulle prestazioni delle attività on the job. La sua affidabilità è dimostrata dalla coerenza dei risultati, rispetto alla sensibilità degli

Below (Tab. 22), the calibration details are reported.

The analysis generally demonstrates a good predictive capability of the model, supported by excellent statistical significance (Tab. 21).

We can observe that the coefficients, as expected, are all positive, meaning that as these increase, the predicted workload value also increases.

Furthermore, the analysis revealed that only for the In-Line Transit Load and Shunting, the qualitative characteristics of the load, modelled through AHP analysis, were found to be statistically significant.

6.3. Validation

Given the known values of the model parameters β , referring back to the functional form presented in paragraph 4, it is straightforward to calculate for each position i and shift j the workload value y_{ij} using the following linear formula:

$$y_{ij} = \beta_{LTL,A} \cdot R_{LTL,A} + \beta_{SLT,9} \cdot R_{SLT,9} + \beta_{M,2} \cdot R_{M,2} + \beta_{SM,1} \cdot R_{SM,1}$$

Regarding the hypothesis on the relationship between workload value and resources assigned per workstation-shift (allocation hypothesis), the application of the model on entire population of workstation-shifts shows that 86% of the workstation-shifts are correctly sized or slightly oversized, and only 14% are slightly undersized.

It is interesting to note that, from comparison with the local contacts, the workstation-shifts that are found to be undersized are regularly staffed by auxiliary operators who effectively compensate for the additional workload.

The distribution of load types between control rooms is shown in Fig. 16.

7. Conclusions and recommendations

7.1. Conclusion of Research

This study presents a comprehensive approach to estimating railway traffic operators' workload through a hybrid model combining multiple linear regression (Tab. 22) and the AHP. By incorporating quantitative and qualitative factors, the model provides a holistic analysis of workload at control workstations. This methodological framework enables precise resource allocation, ensuring the right number of operators per shift to manage traffic flows effectively and address operational complexities. The application of AHP for qualitative factor weighting, based on input from workstation staff, ensures that the model accurately reflects real operational demands.

In line with established workload indicator criteria identified in the technical literature, the proposed workload model embodies essential attributes for effective workload measurement. Specifically, it demonstrates sensitivity by accurately reflecting variations in workload across shifts and workstation. The model's diagnostic capability allows for precise identification of load contributors, such as traffic intensity or operational interruptions, meeting the requirement for under-

addetti ai lavori, garantendo una base teorica stabile per una corretta allocazione delle risorse.

In sintesi, la ricerca fornisce un metodo innovativo e standardizzato per determinare il fabbisogno ottimale nelle postazioni di controllo, allineandosi alle esigenze di un sistema di gestione del traffico ferroviario modernizzato e centralizzato. Stabilendo una base razionale per l'allocazione delle risorse, questo modello ha il potenziale di definire nuovi standard di efficienza ed efficacia nell'industria ferroviaria, orientando future decisioni in merito al personale delle sale di controllo e alla gestione del carico di lavoro.

7.2. Significatività della ricerca

La significatività della ricerca risiede nell'approccio oggettivo e data-driven al problema dell'allocazione delle risorse, un processo questo tradizionalmente privo di standardizzazione in ambito ferroviario. Trasformando l'assegnazione delle risorse in una valutazione oggettiva, il modello minimizza l'influenza dei bias gestionali e delle pressioni esterne. Lo studio contribuisce alla definizione di uno strumento critico per razionalizzare le valutazioni circa il carico di lavoro e ottimizzare il personale assegnato alle postazioni in sale di controllo diversificate, fungendo potenzialmente da base per un'implementazione più ampia nel settore ferroviario.

7.3. Raccomandazioni per ricerche future

Ricerche future potrebbero migliorare il modello differenziando le stime del carico di lavoro in funzione delle caratteristiche di orario e infrastrutturali delle LDS. Un ulteriore perfezionamento potrebbe migliorare la quantificazione del carico di lavoro legato all'interferenza delle interruzioni sul *workload* finale. Nota inoltre l'eventualità che una stessa postazione possa gestire sistemi di telecomando realizzati da fornitori differenti, un'ulteriore espansione del modello potrebbe inglobare anche aspetti di sicurezza legati a interfacce grafiche differenti con cui uno stesso operatore potrebbe operare durante un turno di lavoro.

Un ulteriore implementazione del modello potrebbe riguardare la determinazione di specifici coefficienti di sicurezza da applicare ai valori di *workload* risultanti, funzione degli eventi anomali che si verificano durante la gestione del traffico ferroviario.

Future analisi di sensitività potrebbero infine far comprendere meglio l'effettivo impatto delle caratteristiche qualitative su *workload* finale.

standing workload sources. It also maintains non-intrusiveness, leveraging existing operational data to avoid impacting task performance. Additionally, the reliability of the model is evidenced by its consistent accuracy across the different workstations and shifts analyzed, ensuring a stable basis for resource allocation across railway environments.

In summary, this research provides a novel, standardized method for determining optimal staffing at railway control workstations, aligning with the needs of a modernized, centralized rail traffic management system. By establishing a rational basis for resource allocation, this model has the potential to set new standards for efficiency and effectiveness in the railway industry, guiding future decisions in control room staffing and workload management.

7.2. Significance of Research

The significance of this research lies in its data-driven, impartial approach to resource allocation, a process traditionally lacking standardization in the railway industry. By transforming resource assignment into an objective assessment, the model minimizes the influence of management biases and external pressures. This study thus contributes a critical tool for rationalizing workload assessments and optimizing workstation staffing across diverse control room environments, potentially serving as a foundation for broader implementation within the railway sector.

7.3. Recommendations for Future Research

Future research could enhance the model by differentiating workload estimates based on the scheduling and infrastructural characteristics of service locations. Further refinement could improve the quantification of workload related to the interference of interruptions on the final workload. Additionally, considering the possibility that a single workstation may manage remote control systems provided by different suppliers, a further expansion of the model could incorporate safety aspects related to different graphical interfaces that the same operator might interact with during a work shift.

Another potential implementation of the model could involve the determination of specific safety coefficients to be applied to the resulting workload values, based on the occurrence of anomalous events during railway traffic management.

Future sensitivity analyses could further enhance the understanding of the actual impact of qualitative characteristics on the final workload, as well as consolidate the assumptions regarding the hierarchy structure of the AHP investigation and the functional form for determining typological adaptation coefficients.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] HART S. G., WICKENS C. D. (1990), "Workload assessment and prediction. In *MANPRINT: an approach to systems integration*" (pp. 257-296), Dordrecht: Springer Netherlands.

- [2] CAIN B. (2007), "A review of the mental workload literature.", DTIC Document.
- [3] HART S. G., (1988), "Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research.", Human mental workload, Elsevier.
- [4] WICKENS C.D., HOLLANDS J.G., BANBURY S., PARASURAMAN R. (2013), "Engineering Psychology and Human Performance" (4th ed.), Psychology Press.
- [5] REID G. B., NYGREN T. E. (1988), "The subjective workload assessment technique: A scaling procedure for measuring mental workload." In Advances in psychology, Vol. 52, pp. 185-218, North-Holland.
- [6] GATTA R., VALLATI M., PIROLA I., LENKOWICZ J., TAGLIAFERRI L., CAPPELLI C., CASTELLANO M. (2020), "An empirical analysis of predictors for workload estimation in healthcare." In Computational Science-ICCS 2020: 20th International Conference, Amsterdam, The Netherlands, June 3-5, 2020, Proceedings, Part I 20 (pp. 304-311). Springer International Publishing.
- [7] KEUNECKE J. G., GALL C., BIRKHOLZ T., MORITZ A., EICHE C., PROTTENGEIER J. (2019), "Workload and influencing factors in non-emergency medical transfers: a multiple linear regression analysis of a cross-sectional questionnaire study." BMC health services research, 19:1-11.
- [8] SMITH A. M. (2015), "Robust Models for Operator Workload Estimation."
- [9] SAATY T. L., PENIWATI K., SHANG J. S. (2007), "The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story.", Mathematical and Computer Modelling, 46(7-8):1041-1053.
- [10] PICKUP L., WILSON J. R., NORRIS B. J., MITCHELL L., MORRISROE G. (2005), "The Integrated Workload Scale (IWS): a new self-report tool to assess railway signaller workload.", Applied Ergonomics, 36(6):681-693.
- [11] BONICA C., GIOVINE V. (2018), "La valutazione del carico di lavoro delle postazioni di Dirigente Centrale Operativo.", Ingegneria Ferroviaria, 73(6).
- [12] ISMAEEL R., HIBBERD D., CARSTEN O., JAMSON S. (2020), "Do drivers self-regulate their engagement in secondary tasks at intersections? An examination based on naturalistic driving data.", Accident Analysis & Prevention, 137:105464.
- [13] HUANG L., CUMMINGS M. L., NNEJI V. C. (2018), "Preliminary analysis and simulation of railroad dispatcher workload.", In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 62, No. 1, pp. 691-695). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.
- [14] DORRIAN J., ROACH G. D., FLETCHER A., DAWSON D. (2007), "Simulated train driving: fatigue, self-awareness and cognitive disengagement.", Applied ergonomics, 38(2):155-166.
- [15] NAWEED A. (2014), "Investigations into the skills of modern and traditional train driving.", Applied ergonomics, 45(3):462-470.
- [16] ZOER I., SLUITER J. K., FRINGS-DRESEN M. H. (2014), "Psychological work characteristics, psychological workload and associated psychological and cognitive requirements of train drivers." Ergonomics, 57(10):1473-1487.
- [17] Rete Ferroviaria Italiana (2024), "Regolamento per la Circolazione dei Treni."
- [18] SAATY T. L. (1980), "The Analytic Hierarchy Process.", McGraw-Hill, New York.
- [19] SAATY T. L. (1990), "How to make a decision: The analytic hierarchy process.", European Journal of Operational Research, 48(1):9-26.
- [20] VAIDYA O. S., KUMAR S (2006), "Analytic hierarchy process: An overview of applications", European Journal of Operational Research, 169(1):1-29.
- [21] FORMAN E. H., GASS S. I. (2001), "The analytic hierarchy process—an exposition.", Operations Research, 49(4):469-486.
- [22] ISHIZAKA A., LABIB A. (2011), "Review of the main developments in the analytic hierarchy process.", Expert Systems with Applications, 38(11):14336-14345.
- [23] SAATY T. L. (2008), "Decision making with the analytic hierarchy process.", International Journal of Services Sciences, 1(1):83-98.
- [24] ZAHEDI F. (1986), "The analytic hierarchy process—a survey of the method and its applications.", Interfaces, 16(4):96-108.
- [25] WASSERMAN L (2004), "All of statistics: A concise course in statistical inference.", Springer.
- [26] JAMES G., WITTEN D., HASTIE T., TIBSHIRANI R. (2013), "An introduction to statistical learning: With applications in R.", Springer.
- [27] PLATA-PÉREZ L., SÁNCHEZ-PÉREZ J., SÁNCHEZ-SÁNCHEZ F. (2015), "An elementary characterization of the Gini index.", Mathematical Social Sciences, 74, 79-83.