



## Modellistica e simulazione dei Circuiti di Binario

### *Modeling and simulation of Track Circuits*

*Giuliano MARANO<sup>(\*)</sup>*

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.05.2024.ART.1>)

**Sommario** – I Circuiti di Binario (CdB) sono particolari circuiti elettrici composti in parte dalle rotaie dei binari. In essi vengono fatti circolare segnali elettrici tramite i quali è possibile determinare lo stato di libero (assenza rotabile) o occupato (presenza rotabile) all'interno di una porzione di binario controllato. Essi pertanto rappresentano un fondamentale elemento del Sotto-sistema Strutturale Comando Controllo e Segnalamento (CCS) il cui funzionamento ha un notevole impatto sulla sicurezza e sulla regolarità dell'esercizio ferroviario. Nel presente articolo verrà affrontato il problema di una corretta modellizzazione matematica del CdB e dell'impostazione di una corretta simulazione ai fini delle problematiche di interesse da analizzare. La trattazione analizzerà diversi casi studio di interesse per i sistemi di Classe B rimandandone ulteriori a successive pubblicazioni dell'autore.

Il metodo qui esposto, esclusa la parte di modellistica elettrica del binario, consiste in un metodo generale messo a punto dall'autore durante la sua esperienza sull'argomento.

#### **1. Modellistica e simulazione elettrica del binario**

##### **1.1. Cenni sui Circuiti di Binario**

Il Circuito di Binario è un circuito elettrico in parte costituito dal binario stesso, o meglio dalle rotaie che compongono questo. Ad un CdB si associa una sezione di binario di una data lunghezza chiamata "sezione controllata"; tale sezione è delimitata (per i CdB in bassa frequenza) da giunti isolanti. Questi altro non sono che spessori di 4 mm costituiti da materiale isolante interposto sulla rotaia i quali permettono la separazione elettrica tra i CdB limitrofi. In corrispondenza di questi due estremi fanno capo due coppie di terminali che afferiscono a due cassette terminali, una indicata con "A" che sta per alimentazione, e un'altra indicata con "R" che sta per ricezione. All'interno delle cassette terminali vi sono dei trasformatori che permettono l'adattamento delle grandezze elettriche al binario, oltre che componenti necessari alla taratura del CdB.

**Summary** - Track circuits (TC) are special electrical circuits composed in part of the rails of the tracks. Electrical signals are circulated in them by which it is possible to determine the status of free (no rolling stock) or occupied (rolling stock presence) within a controlled portion of track can be determined. They therefore represent a fundamental element of the Control command and Signalling Sub-System (CCS) whose operation has a significant impact on the safety and regularity of railway operations. In this paper, the problem of proper TC modeling and simulation setup for the purposes of the issues of interest to be analyzed will be addressed. The discussion will analyze several case studies of interest for Class B systems referring further ones to subsequent publications.

The method presented here, excluding the electrical modeling part of the track, consists of a generic method developed by the author during his experience on the topic.

#### **1. Electrical Modeling and Simulation of the Track**

##### **1.1. Track Circuits**

The Track Circuit is an electrical circuit partly constituted by the track itself, or rather by the rails that compose it. To a Track Circuit a section of track of a given length is associated, called the 'controlled section.' This section; is delimited (for low-frequency Track Circuits) by insulating joints. These are simply 4 mm thick isolating materials placed on the rail, allowing electrical separation between adjacent Track Circuits. At the two ends of these isolating joints, two pairs of terminals lead to two terminal boxes, one labeled 'A' for power supply, and another labeled 'R' for reception. Inside these terminal boxes, there are transformers that adapt electrical parameters to the track, as well as components necessary for the calibration of the Track Circuit.

Therefore, an electrical signal  $v(t)$  will reach terminal box A. In conditions of a track section free of vehicles, it will propagate to terminal box R. After being adapted by the transformer in the latter, it will reach a receiving device that, by detecting it, will determine the free status of the Track

<sup>(\*)</sup> Giuliano MARANO, RFI - Direzione Tecnica - Standard Tecnologie – Prodotti CCS.

<sup>(\*)</sup> Giuliano MARANO, RFI – Technical department - Technology Standard – CCS Products.

Alla cassetta A dunque giungerà un segnale elettrico  $v(t)$ , esso in condizioni di sezione libera da rotabili si prospicherà sino alla cassetta R, e dopo essere adattato dal trasformatore di questa raggiungerà un dispositivo ricevitore che rilevandolo decreterà lo stato di libero del CdB. In Fig. 1 è mostrato un generico CdB libero indicando in motivo tratteggiato blu la circolazione della corrente di binario che si chiude nel trasformatore della cassetta R.

Se almeno un asse di un treno entra nella sezione controllata (Fig. 2) muterà l'equilibrio elettrico del CdB per via dell'effetto di partizione di corrente introdotto da questo.

Dati i ridotti valori ohmici dell'asse esso tenderà a ridurre la tensione, e quindi la corrente, sull'avvolgimento del trasformatore della cassetta R, e dunque sul ricevitore. Il ricevitore rilevando l'abbassamento di tale tensione al di sotto di una ben determinata soglia individuerà la presenza del rotabile e di conseguenza decreterà lo stato di occupato del CdB. L'azione dell'asse è detta "azione di shunt" ed il CdB ne deve assicurare il rilevamento in sicurezza.

### 1.2. Modello del binario

I Circuiti di Binario possono essere lunghi (a seconda del tipo) da un minimo di 36 m ad un massimo di 2000 m; le estensioni in gioco rendono semplice comprendere che per la modellistica elettrica ci si può rifare per similitudine al ben noto modello della linea di trasmissione ("equazioni dei telegrafisti") di cui al rif. [2].

Data una linea di trasmissione di lunghezza "L" che si estende lungo una ascissa "x" da un punto di partenza "p" ad uno di arrivo "a", si può vedere questa come una successione di celle elementari di lunghezza infinitesima (Fig. 3) a cui si associano le equazioni (1).

$$\begin{cases} -\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = r \cdot I(x,t) + l \cdot \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = g \cdot E(x,t) + c \cdot \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

Il modello rappresentativo della trasmissione di segnali lungo il binario consiste dunque in un modello a parametri distribuiti sorretto dai seguenti parametri per unità di lunghezza:<sup>1</sup>

- r: Resistenza elettrica per unità di lunghezza ( $\Omega/\text{km}$ );
- l: coefficiente di auto-induzione per unità di lunghezza ( $\text{H}/\text{km}$ );
- g: conduttanza elettrica per unità di lunghezza ( $\text{S}/\text{km}$ );
- c: capacità elettrica per unità di lunghezza ( $\text{F}/\text{km}$ );
- r e l vengono detti "parametri longitudinali" mentre "parametri trasversali".

Si definiscono le seguenti grandezze:

- $E_p(t)$ : Tensione nel punto di partenza di partenza e all'istante t;

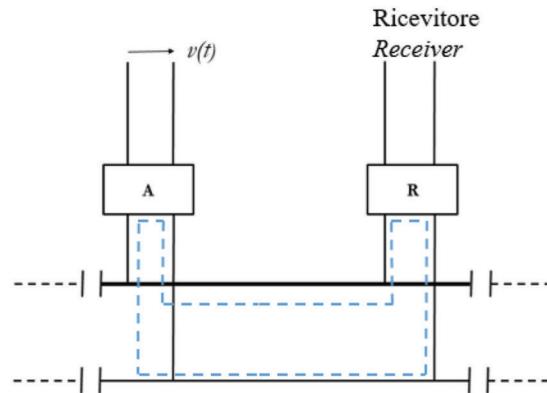


Figura 1 - Circuito di Binario libero.  
Figure 1 - Free status of the Track Circuit.

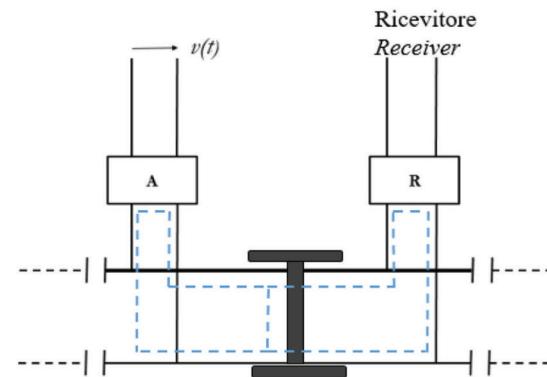


Figura 2 - Circuito di binario occupato.  
Figure 2 - Occupied status of the Track Circuit.

*Circuit. Fig. 1 shows a generic free Track Circuit, indicating the circulation of the track current in blue dashed lines that closes in the transformer of box R.*

*If at least one train axle enters the controlled section (Fig. 2), it will alter the electrical balance of the Track Circuit due to the current partition effect introduced by it. Given the low ohmic values of the axle, it will tend to reduce the voltage and thus the current on the winding of the transformer in box R, and consequently on the receiver. The receiver, detecting the decrease in voltage below a well-defined threshold, will identify the presence of the vehicle and consequently declare the occupied status of the Track Circuit. The action of the axle is called 'shunt action' and the Track Circuit must ensure its detection safely.*

### 1.2. Track Model

*The Track Circuits can be of varying lengths (depending on the type) ranging from a minimum of 36 m to a maximum of 2000 m; the considerable lengths involved make it*

<sup>1</sup> I parametri per unità di lunghezza per una linea bifilare sono da intendersi rappresentativi di entrambi i conduttori

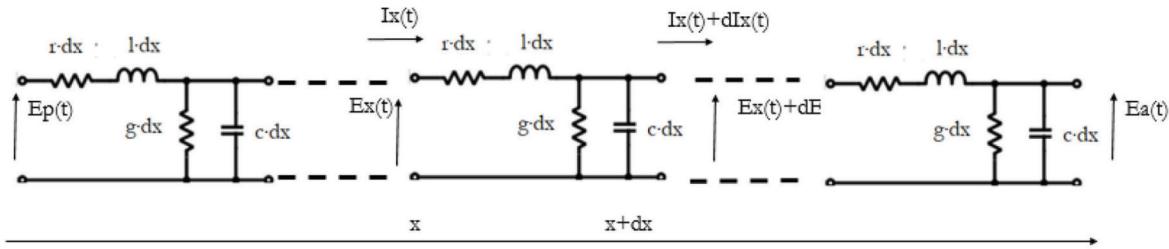


Figura 3 - Linea di trasmissione.

Figure 3 - Transmission line.

- $I_p(t)$ : Corrente nel punto di partenza e all'istante t;
- $E_p(t)$ : Tensione nel punto di partenza e all'istante t;
- $I(x,t)$ : Corrente nel punto di ascissa x e all'istante t;
- $E(x,t)$ : Tensione nel punto di arrivo e all'istante t;
- $I_a(t)$ : Corrente nel punto di arrivo e all'istante t;

Supponendo la sorgente  $E_p(t)$  come segnale sinusoidale, e passando nel dominio dei fasori si ottengono le espressioni (2), dove scompare la dipendenza dal tempo (le derivate parziali diventano derivate semplici). Manipolando queste si ottengono le equazioni in termini di funzioni iperboliche in (3).

$$\begin{cases} -\frac{d^2\bar{E}_x}{dx^2} = (r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c) \bar{E}_x = \bar{z} \cdot \bar{y} \cdot \bar{E}_x = \bar{K}^2 \cdot \bar{E}_x \\ -\frac{d^2\bar{I}_x}{dx^2} = (r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c) \bar{I}_x = \bar{z} \cdot \bar{y} \cdot \bar{I}_x = \bar{K}^2 \cdot \bar{I}_x \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \bar{E}_x = \bar{E}_p \cdot \cosh(\bar{K}x) - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_p \cdot \sinh(\bar{K}x) \\ \bar{I}_x = -\frac{\bar{E}_p}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{K}x) + \bar{I}_p \cdot \cosh(\bar{K}x) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{z} &= r + j\omega l & \bar{y} &= g + j\omega c & \bar{K} &= \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \\ \bar{Z}_0 &= \bar{z} \cdot L & \bar{Y} &= \bar{y} \cdot L & Z_0 &= \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \end{aligned} \quad (4)$$

Le equazioni (4) mostrano  $\bar{K}$  e  $Z_0$ .  $\bar{K}$  è la costante di propagazione, che tiene conto di quanto la tensione o la corrente si attenua (tramite la sua parte reale) e si sfasa (tramite il suo coefficiente dell'immaginario) via via che si prosegue dal punto di partenza a quello di arrivo (si giunge infatti alla conclusione che i fasori di tensione e corrente compiono una traiettoria elicoidale via via che si prosegue dal punto "p" al punto "a").

$Z_0$  invece è l'impedenza caratteristica, ed è il parametro della linea tale per cui, posto nel punto di arrivo la linea si dice "adattata" ed il suo regime elettrico è dato solo da onde progressive, ovvero non vi è fenomeno di riflessione.

Ponendo x nel punto di arrivo (dove L = la lunghezza della linea) e definiti i seguenti coefficienti in (5) si ottengono le equazioni in (6).

$$\begin{cases} A = D = \cosh(KL) \\ \bar{B} = \bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{K}L) \\ \bar{C} = \frac{\sinh(\bar{K}L)}{\bar{Z}_0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_p = E_a \cdot A + B \cdot I_a \\ \bar{I}_p = \bar{E}_a \cdot \bar{C} + \bar{D} \cdot \bar{I}_a \end{cases} \quad (6)$$

Quest'ultime equazioni richiamano quelle di un dop-

easy to comprehend that, for electrical modeling, one can draw parallels to the well-known model of a transmission line ("telegrapher's equations") as referred to in [2].

Given a transmission line of length "L" extending along an abscissa "x" from a starting point "p" to an endpoint "a", it can be viewed as a sequence of infinitesimally small elementary cells (Fig. 3), each associated with equations (1).

$$\begin{cases} -\frac{\partial E(x,t)}{\partial x} = r \cdot I(x,t) + l \cdot \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = g \cdot E(x,t) + c \cdot \frac{\partial E(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

The representative model of signal transmission along the track consists of a distributed parameter model supported by the following parameters per unit length:<sup>1</sup>

- $r$ : Electrical resistance per unit length ( $\Omega/km$ );
- $l$ : Coefficient of self-inductance per unit length ( $H/km$ );
- $g$ : Electrical conductance per unit length ( $S/km$ );
- $c$ : Electrical capacitance per unit length ( $F/km$ );
- $r$  e  $l$  are referred to as "longitudinal parameters", while  $g$  e  $c$  as "transverse parameters".

The following quantities are defined:

- $E_p(t)$ : Voltage at the starting point at time t;
- $I_p(t)$ : Current at the starting point at time t;
- $E(x,t)$ : Voltage at the point with abscissa x at time t;
- $I(x,t)$ : Current at the point with abscissa x at time t;
- $E(a,t)$ : Voltage at the end point at time t;
- $I(a,t)$ : Current at the end point x at time t.

Assuming that the source  $E_p(t)$  is a sinusoidal signal and transitioning to the phasor domain, expressions (2) are obtained, where the time dependency disappears (partial derivatives become ordinary derivatives). Manipulating these expressions yields the equations in terms of hyperbolic functions in (3).

$$\begin{cases} -\frac{d^2\bar{E}_x}{dx^2} = (r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c) \bar{E}_x = \bar{z} \cdot \bar{y} \cdot \bar{E}_x = \bar{K}^2 \cdot \bar{E}_x \\ -\frac{d^2\bar{I}_x}{dx^2} = (r + j\omega l) \cdot (g + j\omega c) \bar{I}_x = \bar{z} \cdot \bar{y} \cdot \bar{I}_x = \bar{K}^2 \cdot \bar{I}_x \end{cases} \quad (2)$$

<sup>1</sup> The parameters per unit length for a two-wire line are intended to be representative of both conductors

## SCIENZA E TECNICA

pio bipolo rappresentabili in generale attraverso un circuito equivalente a “π” o a “T” riportati in Fig. 4.

Se si opta per la seconda opzione, sviluppando in serie di Taylor le funzioni iperboliche contenute in A, B, C e D, troncando al primo termine lo sviluppo di B e C (operazione sempre lecita per linee di lunghezza minore a 100 km per frequenze dell'ordine di quella industriale) e al secondo termine quello di A e D (per evitare l'annullamento di  $\bar{Z}_1$  e  $\bar{Z}_2$  a causa dell'approssimazione di A e D pari a 1) si ottengono i parametri del doppio bipolo dalle espressioni (7):

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 &= \frac{\bar{A}-1}{\bar{C}} = \frac{\cosh(\bar{K}L)-1}{\sinh(\bar{K}L)} \approx \frac{1 + \frac{(\bar{K}L)^2}{2} - 1}{\frac{\bar{K}L}{2}} = \frac{\bar{K}L}{2}, \quad \bar{Z}_0 = \frac{L}{2} \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}, \quad \bar{Z} = \frac{L}{2}, \quad \bar{Y} = \frac{\bar{Z}}{2} \\ \bar{Y}_0 &= \bar{C} = \frac{\sinh(\bar{K}L)}{\bar{Z}_0} \approx \frac{\bar{K}L}{\bar{Z}_0} = L \cdot \frac{\sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}}{\sqrt{\bar{Y}}} = L \cdot \bar{Y} = \bar{Y}\end{aligned}\quad (7)$$

Il termine  $\frac{1}{2}$  di  $\bar{Z}_1$  e  $\bar{Z}_2$  tiene conto della forma fisica del circuito a “T”, se si dividono ulteriormente per due  $\bar{Z}_1$  e  $\bar{Z}_2$  è possibile ricavare il circuito equivalente in Fig. 5 che tiene conto dei parametri per ogni rotaia

Dove con le espressioni (8) si definiscono i valori delle grandezze elettriche del circuito.

$$\begin{aligned}R_p &= r \cdot L \\ I_p &= l \cdot L \\ G_p &= g \cdot L \\ C_p &= c \cdot L\end{aligned}\quad (8)$$

Il ricorrere a tale circuito equivalente altro non è che la riduzione di un sistema a parametri distribuiti in uno a parametri concentrati; ciò è possibile se il sistema ricade nel modello quasi stazionario dell'elettromagnetismo, ovvero se è possibile trascurare i fenomeni legati alla propagazione di onde elettromagnetiche. Ciò succede quando l'estensione del sistema è molto contenuta rispetto alla lunghezza d'onda del segnale da trasmettere, così da trascurare la dipendenza di questo dallo spazio. Tale concetto si riassume a livello matematico con la disequazione (9).

$$\lambda = \frac{v}{f} \gg L \quad (9)$$

- $\lambda$  = lunghezza d'onda;
- $f$  = frequenza;
- $v$  = velocità di propagazione  $\cong$  velocità di propagazione della luce nel vuoto.

Buona norma è quella che  $\lambda$  sia maggiore di almeno 2 o 3 ordini di grandezza di  $L$ , talvolta dunque è possibile che sia necessario modellare la linea di trasmissione tramite una successione di più celle elementari di lunghezza  $P$  così come rappresentato in Fig. 6.

In realtà i segnali di funzionamento dei CdB di Classe B in bassa frequenza hanno frequenze in gioco relativamente basse (50 Hz, 83,3 Hz e 178 Hz con lunghezze d'onda rispettivamente di 6000 km, 3600 km e 1685 km) ed essendo la lunghezza di un CdB limitata a 2 km si comprende che ai fini de-

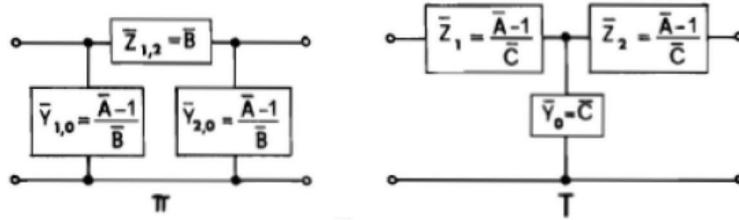


Figura 4 - Circuiti equivalenti a “π” o a “T”.  
Figure 4 - Equivalent circuit in a “π” or “T”.

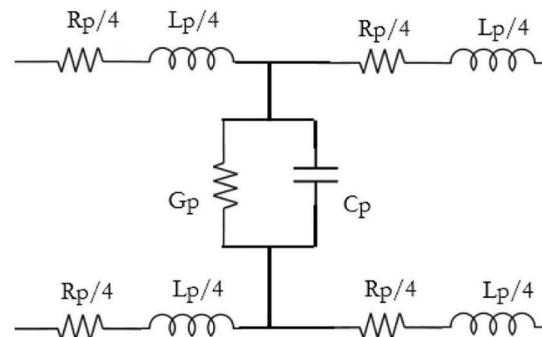


Figura 5 - Circuito equivalente.  
Figure 5 - Equivalent circuit.

$$\begin{cases} \bar{E}_x = \bar{E}_p \cdot \cosh(\bar{K}x) - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_p \cdot \sinh(\bar{K}x) \\ \bar{I}_x = -\frac{\bar{E}_p}{\bar{Z}_0} \cdot \sinh(\bar{K}x) + \bar{I}_p \cdot \cosh(\bar{K}x) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{z} &= z + j\omega L & \bar{y} &= y + j\omega C & \bar{K} &= \sqrt{(r + j\omega)(g + j\omega)} \\ \bar{Z} &= z \cdot L & \bar{Y} &= y \cdot C & Z_0 &= \sqrt{\frac{r+j\omega}{g+j\omega}} \end{aligned} \quad (4)$$

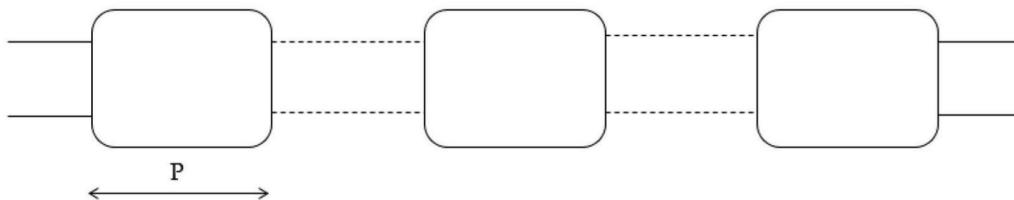
Equations (4) depict  $\bar{K}$  and  $Z_0$ .  $\bar{K}$  is the propagation constant, taking into account how voltage or current attenuates (through its real part) and phase shifts (through its imaginary coefficient) as one progresses from the starting point to the endpoint. It is concluded that the voltage and current phasors trace a helical path as one moves from point “p” to point “a.”

$Z_0$ , on the other hand, is the characteristic impedance and is the parameter of the line for which, when placed at the endpoint, the line is said to be “matched”, and its electrical behavior is determined only by progressive waves, meaning there is no reflection phenomenon.

By setting  $x$  at the endpoint (where  $L$  is the length of the line) and defining the coefficients in (5), the equations in (6) are obtained.

$$\begin{cases} A = D = \cosh(\bar{K}L) \\ \bar{B} = \bar{Z}_0 \cdot \sinh(\bar{K}L) \\ \bar{C} = \frac{\sinh(\bar{K}L)}{\bar{Z}_0} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_p = E_a \cdot A + B \cdot I_a \\ \bar{I}_p = \bar{E}_a \cdot \bar{C} + \bar{D} \cdot \bar{I}_a \end{cases} \quad (6)$$



$$R_p = r \cdot P; \\ L_p = l \cdot P; \\ G_p = g \cdot P; \\ C_p = c \cdot P;$$

Figura 6 - Modello elettrico del binario.  
Figure 6 - Electric track model.

gli errori di modellazione basterebbe una sola cella, tuttavia per le analisi di interesse relativamente ai CdB (squilibri tra le rotaie, azione dello *shunt* ecc..) interessa conoscere le grandezze elettriche in più punti di esso, pertanto il CdB viene modellato come una successione di celle elementari di lunghezza "P" in funzione della risoluzione che si vuole ottenere.

A questo punto serve conoscere soltanto i valori dei parametri elettrici del binario per unità di lunghezza; dalla Fig. 7 è facile comprendere che  $r$  è la resistenza per unità di lunghezza offerta dalla rotaia al passaggio della corrente,  $l$  è il coefficiente di auto induzione per unità di lunghezza che tiene conto delle linee di flusso generate da questa corrente e che si concatenano nella spira formata dalle due rotaie,  $g$  e  $c$  sono invece la conduttanza e la capacità per unità di lunghezza e tengono conto rispettivamente dell'effetto conduttivo e di dielettrico tra le rotaie (pietrisco e traverse).

Per la determinazione di questi parametri viene in aiuto lo studio al Rif. [1], ove sono riportate curve in scala logaritmica che tengono conto della variazione di  $r$  e  $l$  in funzione della frequenza e di  $g$  e  $c$  in funzione della frequenza e dell'umidità.

In alternativa alla lettura visiva dei grafici è possibile interpolare i punti di questi (metodo di Gauss-Newton) ottenendo le seguenti equazioni:<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} r &= (K \cdot \sqrt{\omega}) \cdot 10^{-3} \text{ in } \Omega/\text{km}; \\ l &= \left( A + \frac{B}{\sqrt{\omega}} \right) \cdot 10^{-3} \text{ in } \frac{\text{H}}{\text{km}}; \\ c &= \begin{cases} D \cdot \omega^F & \text{umido/wet} \text{ in } \frac{\text{F}}{\text{km}}; \\ C \cdot \omega^F & \text{secco/dry} \text{ in } \frac{\text{F}}{\text{km}}; \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Con  $K=19,6$ ,  $A=1,32$ ,  $B=18,94$ ,  $D=1,1320 \cdot 10^{-2}$ ,  $C=7,2300 \cdot 10^{-5}$ ,  $E=-0,909$  e  $F=-0,5301$

Per la conduttanza in realtà (che sempre dal citato studio risulta essere costante al variare della frequenza) è pratica adottare valori diversi da quelli dello studio che tengono maggiormente conto delle moderne traverse in cemento armato e dell'esperienza di esercizio, si ha per un minimo di 0,05

These final equations resemble those of a double pole, generally representable through an equivalent circuit in a "π" or "T" configuration, as shown in Fig. 4.

If the second option is chosen and the hyperbolic functions in  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , and  $D$  are Taylor-expanded, truncating the expansion of  $B$  and  $C$  to the first term (a valid operation for lines shorter than 100 km at frequencies on the order of industrial frequencies) and limiting the expansion of  $A$  and  $D$  to the second term (to avoid the nullification of  $\bar{Z}_1$  and  $\bar{Z}_2$  due to the approximation of  $A$  and  $D$  equal to 1), the parameters of the double pole can be obtained from expressions (7).

$$\begin{aligned} \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 &= \frac{\bar{A}-1}{\bar{C}} = \frac{\cosh(\bar{K}L)-1}{\frac{\sinh(\bar{K}L)}{\bar{Z}_0}} \approx \frac{1 + \frac{(\bar{K}L)^2}{2} - 1}{\frac{\bar{K}L}{\bar{Z}_0}} = \frac{\bar{K}L}{2} \bar{Z}_0 = \frac{L}{2} \sqrt{\bar{z} \cdot \bar{y}} \cdot \sqrt{\frac{\bar{z}}{\bar{y}}} = \frac{L}{2} \bar{z} = \frac{\bar{Z}}{2} \\ \bar{Y}_0 &= \bar{C} = \frac{\sinh(\bar{K}L)}{\bar{Z}_0} \approx \frac{\bar{K}L}{\bar{Z}_0} = L \cdot \sqrt{\frac{\bar{z} \cdot \bar{y}}{\bar{y}}} = L \cdot \bar{y} = \bar{Y} \end{aligned} \quad (7)$$

The term  $1/2$  of  $\bar{Z}_1$  and  $\bar{Z}_2$  takes into account the physical shape of the "T" circuit. If these are further divided by two  $\bar{Z}_1$  and  $\bar{Z}_2$ , it is possible to derive the equivalent circuit shown in Fig. 5, which accounts for the parameters for each rail.

Using expressions (8), the values of electrical quantities in the circuit are defined:

$$\begin{aligned} R_p &= r \cdot L \\ L_p &= l \cdot L \\ G_p &= g \cdot L \\ C_p &= c \cdot L \end{aligned} \quad (8)$$

Resorting to such an equivalent circuit is essentially the

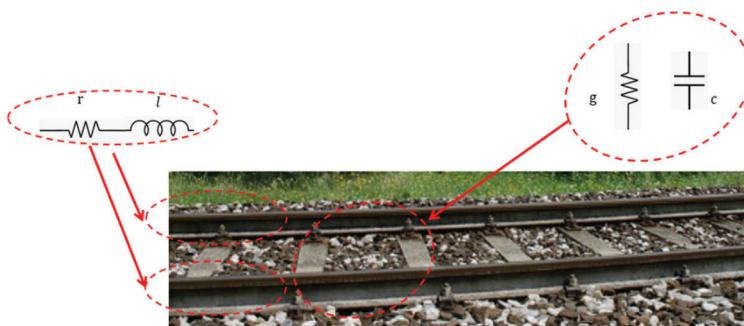


Figura 7 - Parametri elettrici del binario.  
Figure 7 - Electrical parameters of the track.

<sup>2</sup> Anche lo studio ORE al [1] definisce  $r$  e  $l$  come rappresentativi di ambo i conduttori, ovvero di ambo le rotaie, in serie.

S/km in condizioni di secco e un massimo di 0,5 S/km in condizioni di bagnato.

### 1.3. Implementazione in Simulink di MATLAB

Il modello del binario presentato al precedente paragrafo si adatta facilmente al linguaggio a blocchetti di numerosi SW di simulazione presenti sul mercato, nel presente lavoro sarà presentata l'implementazione in ambiente Simulink di MATLAB ma il metodo è applicabile in generale.

Tutte le simulazioni del presente articolo sono state svolte utilizzando libreria *Sim Power Systems* di Simulink per i blocchi di potenza dei segnali di binario (CdB, trasformatori ecc..), mentre per i blocchi logici di acquisizione dei segnali sono stati utilizzati i blocchi della libreria generale di MATLAB (filtrati di acquisizione, REDI ecc..). Ciò ha consentito di separare galvanicamente la parte di trasmissione da quella dell'elaborazione dei segnali portando a separare elettricamente i blocchi a tempo discreto (elaborazione) da quelli a tempo continuo (trasmissione). Ciò come si vedrà al §6, consente in alcuni casi di applicare la sovrapposizione degli effetti per segnali non isofrequenziali applicati al binario.

Per l'implementazione si è optati per un modello a parametri concentrati composto da 20 celle elementari in cascata come rappresentato in Fig. 8.

La scelta del modello a parametri concentrati permette di ridurre il tempo di simulazione che è una cosa auspicabile soprattutto in analisi dove bisogna simulare più CdB (è da tener presente che il CdB è composto da molti altri componenti oltre al binario che aumentano di per sé il tempo di simulazione), la scelta di 20 celle è dovuta alla volontà di avere una risoluzione di almeno 100 m per il

reduction of a system with distributed parameters to one with concentrated parameters; this is possible if the system falls within the quasi-stationary model of electromagnetism, meaning that phenomena related to the propagation of electromagnetic waves can be neglected. This occurs when the system's extension is much smaller than the wavelength of the signal to be transmitted, allowing the space dependence to be neglected. This concept is mathematically summarized by the inequality (9):

$$\lambda = \frac{v}{f} \gg L \quad (9)$$

Where:

- $\lambda$ : wavelength;
- $f$ : frequency;
- $v$ : propagation velocity  $\cong$  (approximately equal to the speed of light in a vacuum).

A common practice is for  $\lambda$  to be at least 2 or 3 orders of magnitude larger than  $L$ . Sometimes, it might be necessary to model the transmission line as a sequence of multiple elementary cells of length  $P$ , as depicted in Fig. 6.

Actually, the operating signals of Class B Track Circuits at low frequency have relatively low frequencies (50 Hz, 83.3 Hz, and 178 Hz with wavelengths of 6000 km, 3600 km, and 1685 km, respectively). Given that the length of a Track Circuit is limited to 2 km, it is evident that, for modeling errors, a single cell would suffice. However, for analyses concerning Track Circuits (rail imbalances, shunt action, etc.), it is crucial to know the electrical quantities at multiple points. Therefore, the Track Circuit is modeled as a sequence of elementary cells of length  $P$  depending on the desired resolution.

At this point, it is important to know only the values of the electrical parameters of the track per unit length. From Fig. 7, it is easy to understand that  $r$  is the resistance per

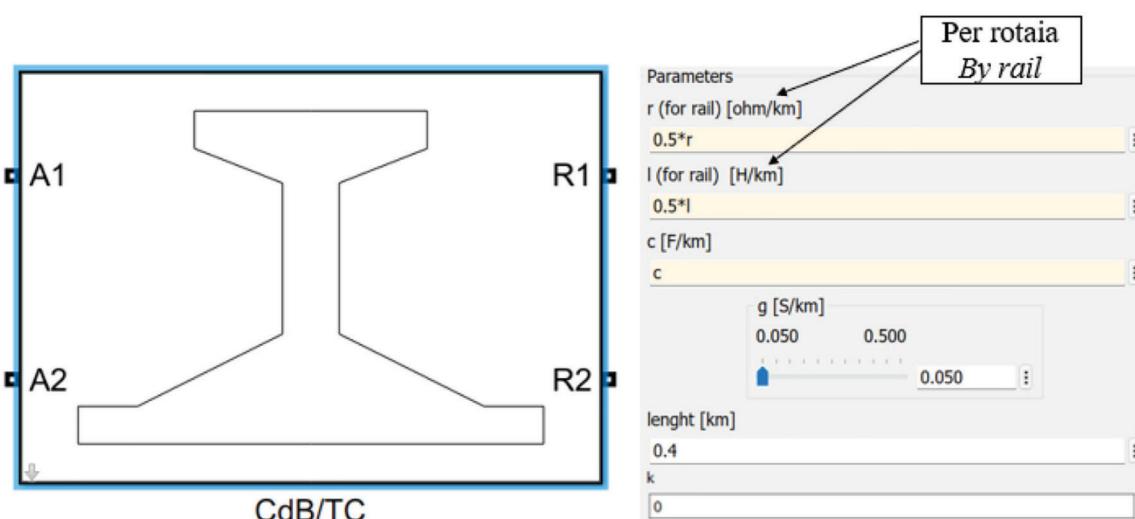


Figura 8 - Modello binario.  
Figure 8 - Track model.

CdB di lunghezza massimo di 2 km. Il numero di celle può essere ovviamente cambiato a patto di modificare correttamente il valore di "L" nelle espressioni dei parametri Rp, Lp, Gp e Cp.

In Fig. 9 è mostrata l'implementazione interna del blocco ove è mostrato il settaggio dei parametri per la singola cella. Per i parametri longitudinali della rotaia di sopra è applicato un parametro k (grado di squilibrio) che può aumentare o diminuire l'impedenza complessiva rispetto l'altra rotaia.

E' possibile applicare lo *shunt* tra una cella e l'altra o all'interno di una cella in corrispondenza del cappio trasversale (la risoluzione dunque è di 50 m). Si fa notare che nonostante i terminali del blocco siano indicati con A1 – A2 e R1 – R2 che sta per "alimentazione" e "ricezione" in realtà il funzionamento del blocco è reversibile.

### 2. Modellistica e simulazione dei CdB a singola fuga isolata

I circuiti di binario a singola fuga sono chiamati in questo modo in quanto tra le due rotaie una sola fa parte del circuito di ritorno della trazione elettrica (che prende il nome di rotaia a terra), l'altra rotaia è detta rotaia isolata. Per brevità ci si riferirà a tale tipologia con il ter-

unit length offered by the rail to the passage of current, is the coefficient of self-inductance per unit length that takes into account the flux lines generated by this current and that concatenate in the loop formed by the two rails, and  $c$  are the conductance and capacitance per unit length, respectively, which consider the conductive and dielectric effects between the rails (ballast and sleepers).

In order to determine these parameters, reference [1] provides valuable insights, where logarithmic scale curves are presented that take into account the variation of  $r$  e  $l$  as a function of frequency,  $g$  e  $c$  as a function of frequency and humidity. As an alternative to visually reading the graphs<sup>2</sup>, it is possible to interpolate the points of the graphs (Gauss-Newton method), obtaining the following equations:

$$\begin{aligned} r &= (K \cdot \sqrt{\omega}) \cdot 10^{-3} \text{ in } \Omega/\text{km}; \\ l &= \left( A + \frac{B}{\sqrt{\omega}} \right) \cdot 10^{-3} \text{ in } \frac{\text{H}}{\text{km}}; \\ c &= \begin{cases} D \cdot \omega^E & \text{umido/wet} \\ C \cdot \omega^F & \text{secco/dry} \end{cases} \text{ in } \frac{\text{F}}{\text{km}}; \end{aligned} \quad (10)$$

With  $K=19.6$ ,  $A=1.32$ ,  $B=18.94$ ,  $D=1,1320 \cdot 10^{-2}$ ,  $C=7,2300 \cdot 10^{-5}$ ,  $E=-0,909$  e  $F=-0,5301$ . For conductance  $g$

<sup>2</sup> The ORE study at [1] also defines  $r$  and  $l$  as representing both conductors, i.e., both rails, in series.

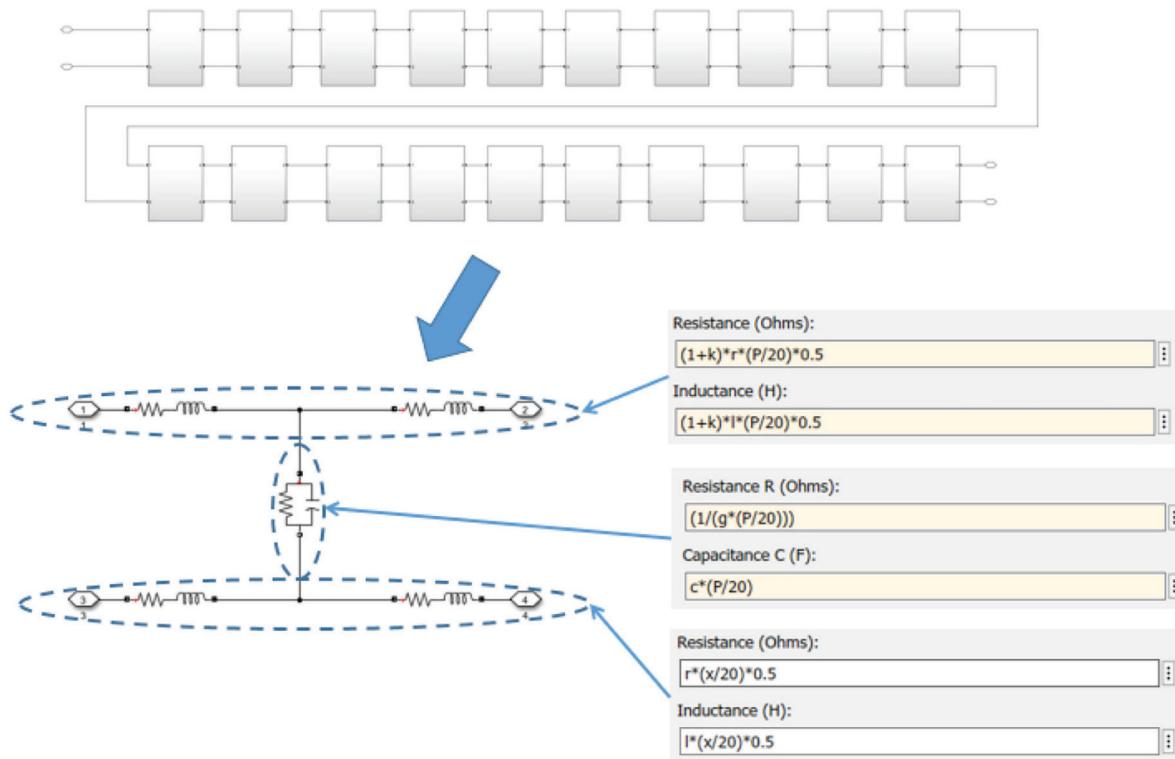


Figura 9 - Implementazione del modello elettrico del binario.  
Figure 9 - Implementation of the electrical model of the track.

mine "singola fuga". Tali CdB vengono adoperati nelle stazioni ad eccezione dei binari di corsa adibiti per la ripetizione segnali a bordo o in quelli più lunghi di 700 m. La schematizzazione della versione più moderna del CdB a singola fuga è riportata in Fig. 10. Nel seguito verrà mostrato come modellare completamente tale CdB.

### 2.1. Modello del CdB a singola fuga

Il modello complessivo del CdB è dato dalla connessione del modello del binario con quello dei seguenti componenti.

#### 2.1.1. Modello dei trasformatori

I CdB a singola fuga utilizzano due tipi di trasformatori di alimentazione (TA) uno da 50 VA e l'altro da 100 VA, il secondo viene utilizzato ove sussistano correnti di trazione intense tale da poter provocare la saturazione del nucleo con conseguenti problemi di disponibilità. Il trasformatore di ricezione (TR) invece è di taglia pari a 4 VA.

Date le ridotte potenze in gioco i trasformatori sono da simulare tramite il circuito equivalente a "T" con l'attenzione per la quale se per i trasformatori è selezionata una presa intermedia i parametri del modello saranno solo una parte di quelli complessivi. Per la determinazione di questi nulla si aggiunge in più rispetto all'ampia letteratura tecnica disponibile riguardo alla determinazione tramite le prove a vuoto e in corto circuito (vedasi ad esempio [3]). I trasformatori sono corredati da una resistenza  $R_a$  per i TA e una  $R_r$  per i TR necessarie per la regolazione del CdB, per la limitazione della corrente di shunt e per la limitazione della corrente di trazione nei trasformatori. Quando vi possono essere correnti di trazione intense oltre al TA da 100 VA si utilizza a corredo del TR un dispositivo a ponte. La modellazione di questi componenti a corredo dei trasformatori non vede particolari complessità. I modelli dei trasformatori sono mostrati in Fig. 11. Per la taratura di questi e delle resistenze vedasi [4].

#### 2.1.2. Modello del circuito di trazione

Tra i CdB a singola fuga vicini viene attuata una inversione tra rotaia a terra e isolata, in tal modo collegando gli stessi terminali dei trasformatori alle stesse rotaie si applica in automatico l'alimentazione in contro fase di questi, ciò permette (come vedremo) una protezione dal fenomeno di perforazione elettrica dei giunti isolanti. Al fine di mantenere la continuità elettrica per la conduzione della corrente di trazione viene disposto un collegamento a "Z" tra le rotaie a terra dei due CdB vicini (vedasi Fig. 10). I conduttori adoperati hanno resistenze per unità di lunghezza di pochi decimi di  $\Omega/km$ ; essendo le lunghezze del collegamento a Z dell'ordine dei metri si comprende la trascurabilità di questo. Talvolta però se si volesse con-

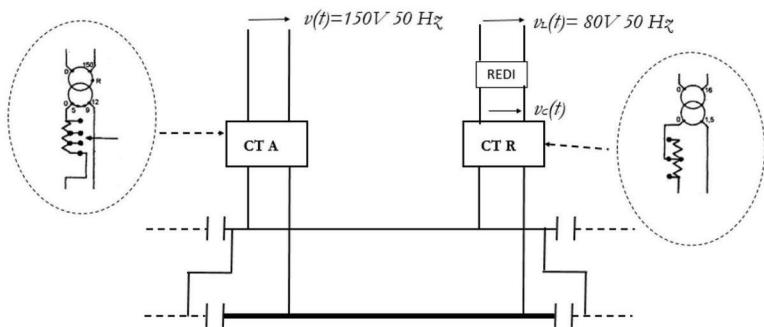


Figura 10 - CdB a singola fuga.  
Figure 10 - TC single rail.

(not assumed frequency-dependent by the mentioned study), a minimum of 0.05S/km is considered in dry conditions, and a maximum of 0.5S/km is considered in wet conditions, based on the mentioned study.

### 1.3. Implementation in MATLAB Simulink

The track model presented in the previous section easily adapts to the block-diagram language of various simulation software available on the market. In this work, the implementation is demonstrated using the Simulink environment of MATLAB, but the method is applicable in general.

All simulations in this article were conducted using the Sim Power Systems library in Simulink for the power signal blocks of the track circuits (TC, transformers, etc.). For the logical signal acquisition blocks, the general MATLAB library was employed (acquisition filters, REDI, etc.). This allowed for the galvanic separation of the transmission part from the signal processing part, effectively isolating discrete-time blocks (processing) from continuous-time blocks (transmission). As will be discussed in Section 6, this enables the application of superposition of effects for non-isofrequency signals applied to the track.

For the implementation, a lumped-parameter model consisting of 20 elementary cells in cascade was chosen, as depicted in Fig. 8. The choice of a lumped-parameter model helps reduce simulation time, which is desirable especially in analyses involving multiple Track Circuits (TC). It's important to note that a TC comprises many other components besides the track, and these components inherently increase simulation time. The selection of 20 cells aims to achieve a resolution of at least 100 m for a TC with a maximum length of 2 km. The number of cells can be adjusted, provided that the value of ( $P$ ) in the expressions for the parameters ( $R_p$ ), ( $L_p$ ), ( $G_p$ ), and ( $C_p$ ) is modified accordingly.

In Fig. 9, the internal implementation of the block is shown, including the parameter settings for a single cell.

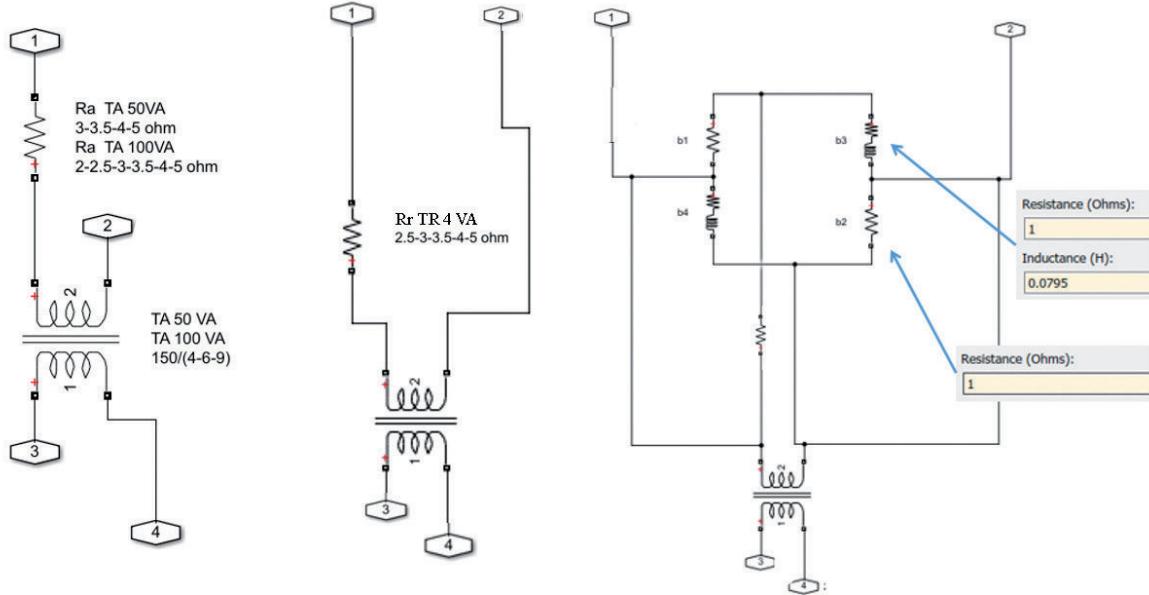


Figura 11 - Trasformatori di binario.

Figure 11 - Track Transformers.

templarlo (es: valutazione delle CdT in grossi piazzali con molti CdB e forti correnti di trazione), indicando la lunghezza del cavo con  $W$ , si può calcolare la resistenza di questo utilizzando la (11).

$$(11) R = 0,18 \Omega/\text{km} \cdot W$$

Nel presente lavoro sarà omessa tale modellazione in quanto non di interesse per i casi studio presentati.

### 2.1.3. Modello dei cavi

In Bassa Tensione per le ridotte sezioni in gioco i cavi possono essere simulati semplicemente tramite una resistenza. Dagli schemi di principio vigenti ([5]) si ricava una resistenza massimo di doppino per il singolo cavo di alimentazione o ricezione del CdB di  $45 \Omega$ . I cavi normalmente adoperati sono riassunti in Tab. 1. Nel presente articolo si ometterà la presenza dei cavi al fine di simulare condizioni maggiormente conservative nei confronti della sicurezza (maggiore tensione ai binari).

### 2.1.4. Modello della sorgente

La sorgente di alimentazione per i circuiti di binario è di norma una tensione a  $150 \text{ V} - 50 \text{ Hz}$ , essa può variare con una tolleranza di  $+10\%$  e  $-15\%$  in modulo e del  $\pm 2\%$  in frequenza. Nel caso di linee affiancate a quelle con

*For the longitudinal parameters of the upper rail, a parameter ( $k$ ) (unbalanced degree) is applied, which can increase or decrease the overall impedance relative to the other rail.*

*It is possible to apply the shunt between one cell and another or within a cell at the location of the transverse loop (hence, the resolution is 50 m). Despite the block terminals being labeled as A1-A2 and R1-R2 (indicating "Power" and "Reception"), the operation of the block is reversible.*

Tabella 1 – Table 1

Cavi CdB singola fuga  
Cable of TC single rail

Sezione ( $\text{mm}^2$ ) → Section ( $\text{mm}^2$ ) →	1	2,5	4
Resistenza massima doppino ( $\Omega/\text{km}$ ) → <i>Maximum pair resistance (<math>\Omega/\text{km}</math>) →</i>	36	14,40	9,00
Massima lunghezza ( $\text{km}$ ) → <i>Maximum lenght (<math>\text{km}</math>) →</i>	1,25	3,12	5,00
Rapporto di trasformazione TA <i>Transformation ratio TA</i>	Resistenza Ra( $\Omega$ ) <i>Resistance Ra (<math>\Omega</math>)</i>	Rapporto di trasformazione TR <i>Transformation ratio TR</i>	Resistenza Rr( $\Omega$ ) <i>Resistance Rr (<math>\Omega</math>)</i>
150/6	3	1,5/16	2,5

## SCIENZA E TECNICA

trazione in alternata  $2 \cdot 25\text{ KV}$  l'alimentazione è a  $170\text{ V} - 83,3\text{ Hz}$  con modulazione ti tipo PSK.

### 2.1.5. Modello del ricevitore

Ad oggi il ricevitore moderno dei CdB a singola fuga è il dispositivo Relè a Disco Elettronico chiamato anche REDI (vedi Fig. 12), esso è un componente elettronico con funzioni di sicurezza con grado SIL4 che sostituisce i tradizionali relè a disco a due elementi. Esso presenta due ingressi: C+ e C- sono i terminali di "campagna" attraverso i quali si riceve il segnale dal binario, L+ e L- sono invece i terminali di "locale" attraverso i quali si acquisisce una tensione di  $80\text{ V} - 50\text{ Hz}$  o  $120\text{ V} - 83,3\text{ Hz}$  a seconda dei casi. Il segnale di locale rappresenta un riferimento di fase al fine di effettuare un controllo di sicurezza sul segnale proveniente dal binario come protezione ulteriore (oltre al collegamento a Z) dal fenomeno di perforazione dielettrica dei giunti isolanti (i CdB vicini vengono alimentati in controparte tra di loro).

In Fig. 13 è mostrata l'implementazione del REDI a  $50\text{ Hz}$ , acquisite le due tensioni "Vc" e "Vl" vengono filtrate le sole componenti a  $50\text{ Hz}$  e costruiti i fasori. Il ramo in basso al blocco "AND" finale si occupa di controllare che la differenza di fase dei due segnali rientri nel campo  $\pm 50^\circ$ , mentre il ramo di sopra si occupa di controllare il livello della tensione del binario rispetto alle soglie di libero ( $Vd/K$ ) e occupato ( $Vd$ ). L'impedenza di ingresso dei terminali di campagna può assumere un valore compreso tra  $750\Omega$  e  $1200\Omega$ , in figura si è supposto un'impedenza puramente ohmica. Infine il parametro "q" simula l'azione di rifasamento del REDI.

In Fig. 14 è rappresentato il REDI a  $83,3\text{ Hz}$  dove oltre alle differenze di ampiezza e frequenza dei segnali in gioco si aggiunge un terzo controllo effettuato dal dispositivo riguardo alla presenza di una corretta modulazione PSK.

Il REDI infine a seconda dello stato del CdB stabilisce o meno dei contatti alti e bassi di uscita, la modellazione di questo fenomeno vede una trattazione di modellazione elettromeccanica legata alle inerzie delle masse in movimento che esula dallo scopo del presente articolo.

### 2.1.6. Modello dei giunti isolanti

I giunti isolanti potrebbero essere simulati tramite circuiti aperti in condizioni ideali, tale ipotesi è molto

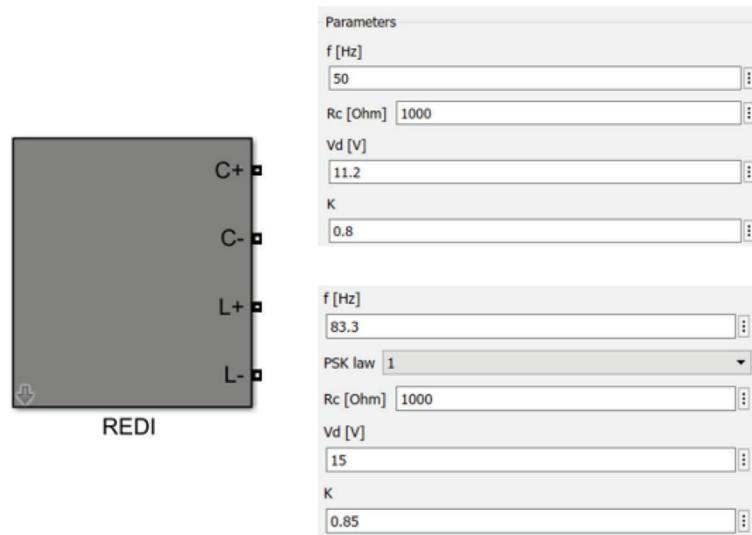


Figura 12 - Settaggio REDI.  
Figure 12 - Setting of REDI.

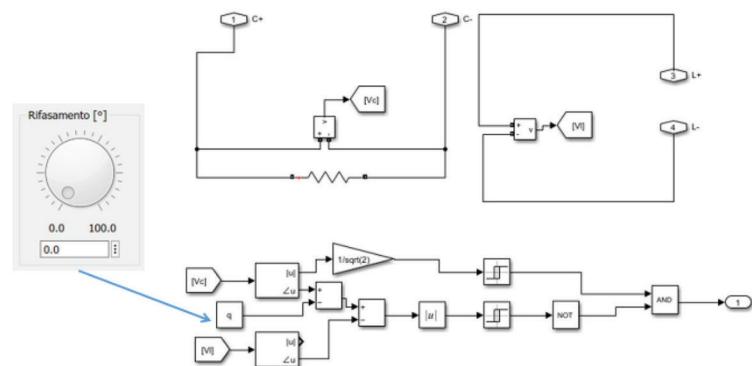


Figura 13 - REDI 50 Hz.-  
Figure 13 - REDI 50 Hz.-

## 2. Electrical Modeling and Simulation of the Track

*Single-rail track circuits are so named because only one rail is part of the return circuit for electric traction (referred to as the "grounded rail"), while the other rail is isolated. To be concise we will refer to this type as "single rail". These track circuits are used in stations, except for the running tracks used for onboard signal repetition or those longer than 700m. The schematic of the modern version of the single-rail track circuit is shown in Fig. 10. The following will demonstrate how to model this track circuit completely.*

### 2.1. Model of the Single-rail Track Circuit

*The overall model of the track circuit is given by connect-*

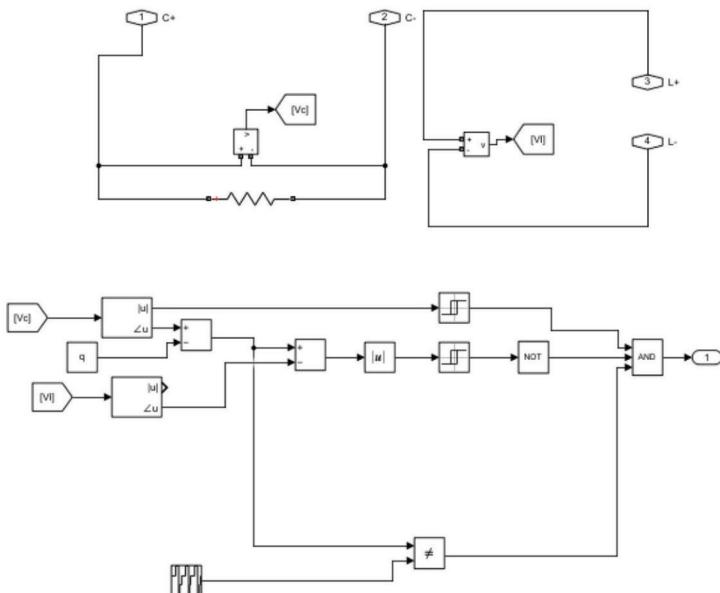


Figura 14 - REDI 83,3 Hz PSK.  
Figure 14 - REDI 83,3 Hz PSK.

vicina alla realtà per climi asciutti, in tale ipotesi infatti la resistenza di isolamento del giunto può raggiungere anche l'ordine del  $M\Omega$ . In condizioni di clima umido, o di deposito di scorie di frenatura, si manifesta una grossa variabilità di questa grandezza che la porta a raggiungere valori sino alle decine di  $\Omega$ , i quali sono tuttavia sufficienti a permettere il regolare funzionamento dei CdB. Un valore minimo di resistenza di isolamento al limite dell'integrità può essere assunto pari a  $10 \Omega$ , al di sotto dei quali di fatto il giunto si avvia verso la perforazione. Basta pensare che il valore limite posto per i dispositivi di protezione per i CdB in linea del BAcc è di  $2,4 \Omega$ . Ovviamente modellare un giunto ha senso qualora si vogliano simulare più CdB limitrofi.

### 2.2. Simulazione del CdB a singola fuga isolata

Interconnettendo tutti i modelli sin ora presentati si ottiene il sistema in Fig. 15. Si noti la corrispondenza di fase tra il generatore e i morsetti di campagna del REDI. Il CdB è supposto di 400 m e supponendo che all'istante 0,040 s sia applicato uno shunt di  $0,8 \Omega$  all'estremo di ricezione nelle condizioni più ostensive nei riguardi della sicurezza (tensione di alimentazione con tolleranza massima e ballast asciutto) si ottengono gli andamenti in Fig. 16 per la tensione e la corrente di binario all'estremità di ricezione (Scope 4). In Fig. 17 invece sono riportati i valori di output del REDI (da cui si nota la diseccitazione del dispositivo) e i segnali di comparazione di ampiezza e fase (da cui si nota che il REDI è diseccitato per via della riduzione dell'ampiezza della tensione provocata dallo shunt). I valo-

ing the track model with the following components.

#### 2.1.1. Model of Transformers

Single-rail track circuits use two types of power transformers (TA), one with a rating of 50 VA and the other with 100 VA. The latter is used where intense traction currents may cause core saturation, leading to availability issues. The reception transformer (TR) has a rating of 4 VA. Given the limited powers involved, the transformers are simulated using the "T" equivalent circuit, with the consideration that selecting an intermediate tap for the transformers will result in only a part of the model parameters. The determination of these parameters involves standard procedures, such as vacuum and short-circuit tests [3]. The transformers are accompanied by a resistance ( $R_a$ ) for TA and an ( $R_r$ ) for TR, necessary for the regulation of the track circuit, limiting the shunt current and limiting the traction current in the transformers. When there can be intense traction currents, in addition to the 100 VA TA, a bridge device is used in conjunction with TR. Modeling these components accompanying the transformers does not present particular complexities. The transformer models are shown in Fig. 11. For the calibration of these and the resistances, refer to [4].

#### 2.1.2. Model of the Traction Circuit

Between adjacent single-rail track circuits, there is a reversal between the grounded and isolated rails. This connects the same terminals of the transformers to the same rails, automatically providing counter-phase power supply to them. This allows, as will be seen, protection against the phenomenon of electrical punching of the insulating joints. To maintain electrical continuity for traction current conduction, a "Z" connection is placed between the grounded rails of the two adjacent track circuits (see Fig. 10). The conductors used have resistances per unit length of a few tenths of ohms per km, and given the lengths of the Z connection on the order of meters, the neglectability of this resistance is understood. However, if desired (e.g., for evaluating currents in large yards with many track circuits and strong traction currents), indicating the length of the cable with ( $W$ ), the resistance can be calculated using Equation (11):

$$(11) R = 0,18 \Omega/\text{km} \cdot W \quad (11)$$

In this work, this modeling will be omitted as it is not relevant for the presented case studies.

#### 2.1.3. Model of Cables

In Low Voltage, for the small cross-sections involved, cables can be simulated simply using a resistance. From ex-

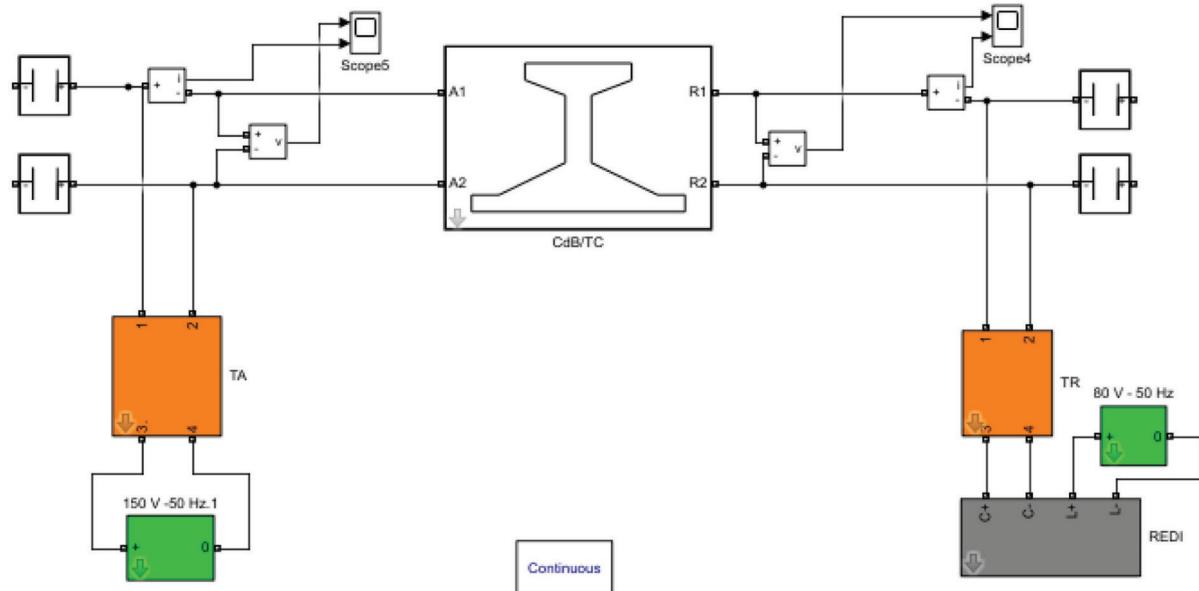


Figura 15 - Modello CdB singola fuga.  
Figure 15 - Model of TC single rail.

ri di taratura sono quelli in Tab. 2 determinati seguendo la procedura di taratura riportata al [4] tramite l'esecuzione di simulazioni preliminari.

existing schematics [5], a maximum resistance of  $45 \Omega$  for a pair for the individual power or reception cable of the track circuit is derived. The cables typically used are summarized in Tab. 1. In this article, the presence of cables will be omitted to simulate conditions that are more conservative regarding safety (higher voltage at the tracks).

#### 2.1.4. Model of the Source

The power supply for track circuits is usually a voltage of 150 V - 50 Hz, with a variation tolerance of +10% and -15% in magnitude and  $\pm 2\%$  in frequency. In the case of tracks adjacent to those with AC traction at 2.25 kV, the supply is at 170 V - 83.3 Hz with PSK-type modulation.

#### 2.1.5. Receiver Model

As of today, the modern receiver for single-rail track circuits is the Electronic Disk Relay also called REDI device (see Fig. 12). It is an electronic component with safety functions at SIL4 level, replacing traditional two-element disc relays. It has two inputs: C+ and C- are "field" terminals through which the signal is received from the track, while L+ and L- are "local" terminals through which a voltage of 80 V - 50 Hz or 120 V - 83.3 Hz, depending on the case, is acquired. The local signal serves as a phase reference to perform a safety check

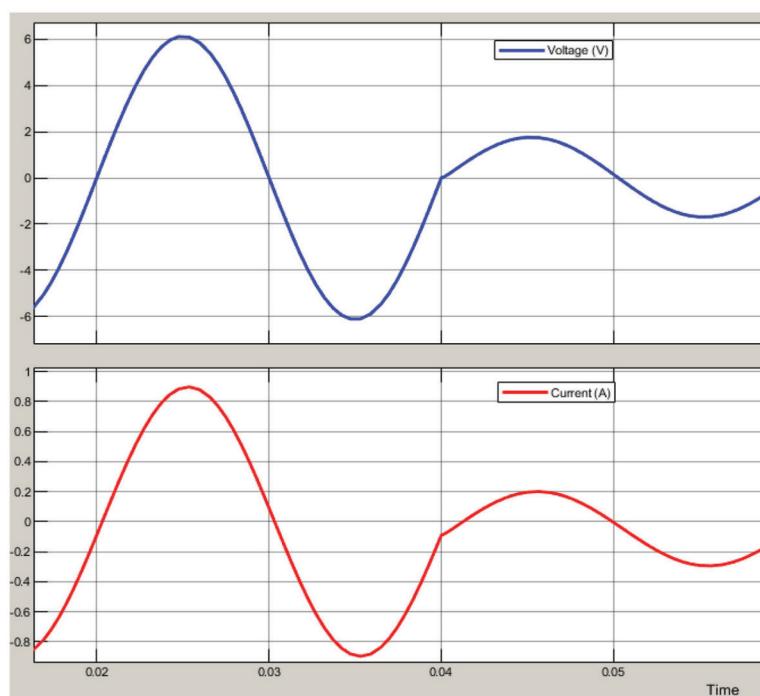


Figura 16 - Tensione e corrente di binario.  
Figure 16 - Voltage and current of track.

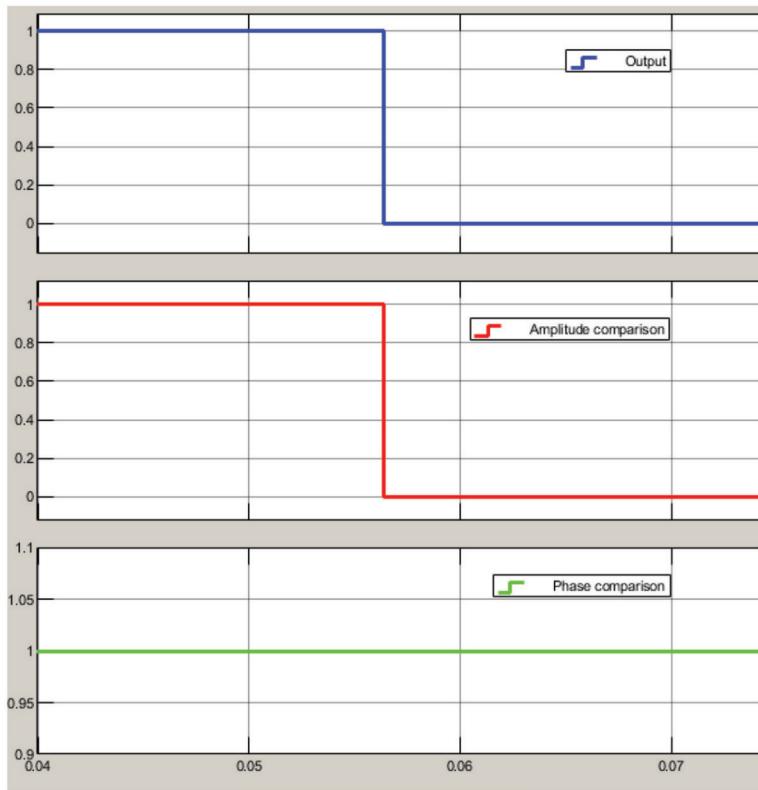


Figura 17 - Logica REDI.  
Figure 17 - REDI logic.

In Fig. 18 è rappresentato il caso studio di infiltrazione di segnale in controfase di altro CdB attiguo.

Nel caso analizzato è provocato da:

- interruzione della connessione a Z;
- perforazione dielettrica di ambo i giunti elettrici delle due rotaie;
- interruzione del cavo di alimentazione propria.

Dalla Fig. 19 si nota che in tali condizioni il REDI si dissecchia per diversità di fase tra la tensione di "campagna" e quella di "locale"; il REDI in concomitanza con la pratica di alimentazione in controfase dei CdB attigui pertanto protegge da tali scenari (in caso di non interruzione dell'alimentazione i due segnali sfasati avrebbero dato vita ad

Taratura CdB singola fuga  
Calibration of TC single rail

Rapporto di trasformazione TA Transformation ratio TA	Resistenza Ra( $\Omega$ ) Resistance Ra ( $\Omega$ )	Rapporto di trasformazione TR Transformation ratio TR	Resistenza Rr( $\Omega$ ) Resistance Rr ( $\Omega$ )
150/6	3	1,5/16	2,5

on the signal coming from the track, providing additional protection (in addition to the Z connection) against the phenomenon of dielectric punching of insulating joints (adjacent track circuits are supplied in counterphase).

In Fig. 13, the implementation of the 50 Hz REDI is shown. Once the two voltages "Vc" and "Vl" are acquired, only the 50 Hz components are filtered, and phasors are constructed. The bottom branch of the final "AND" block ensures that the phase difference of the two signals falls within the  $\pm 50^\circ$  range. Meanwhile, the upper branch checks the level of the track voltage against the free ( $Vd/K$ ) and occupied ( $Vd$ ) thresholds. The input impedance of the field terminals can have a value between  $750 \Omega$  and  $1200 \Omega$ . In the figure, a purely ohmic impedance is assumed. Finally, the parameter "q" simulates the phase correction action of the REDI.

In Fig. 14, the 83.3 Hz REDI is represented, which, in addition to differences in amplitude and frequency of the signals, includes a third check regarding the correct PSK modulation.

The REDI, based on the state of the track circuit, establishes or not the high and low output contacts. The modeling of this phenomenon involves an electromechanical modeling related to the inertia of moving masses, which goes beyond the scope of this article.

### 2.1.6. Insulated Joint Model

Insulated joints could be simulated using open circuits under ideal conditions. This assumption is very close to reality in dry climates, where the insulation resistance of the joint can reach the order of  $M\Omega$ . In humid conditions or when there is brake dust deposition, there is considerable variability in this value, leading it to reach values up to tens of ohms. However, even with such resistance values, the isolating joints can still function correctly. A minimum value of insulation resistance, at the limit of integrity, can be assumed to be  $10 \Omega$ , below which the joint tends toward perforation.

It is noteworthy that the limit value set for protection devices for in-line track circuits by the BAcc is  $2,4 \Omega$ . Modeling an isolating joint makes sense when simulating multiple adjacent track circuits.

### 2.2. Simulation of isolated Single-rail Track Circuit

Interconnecting all the models presented so far results in the system shown

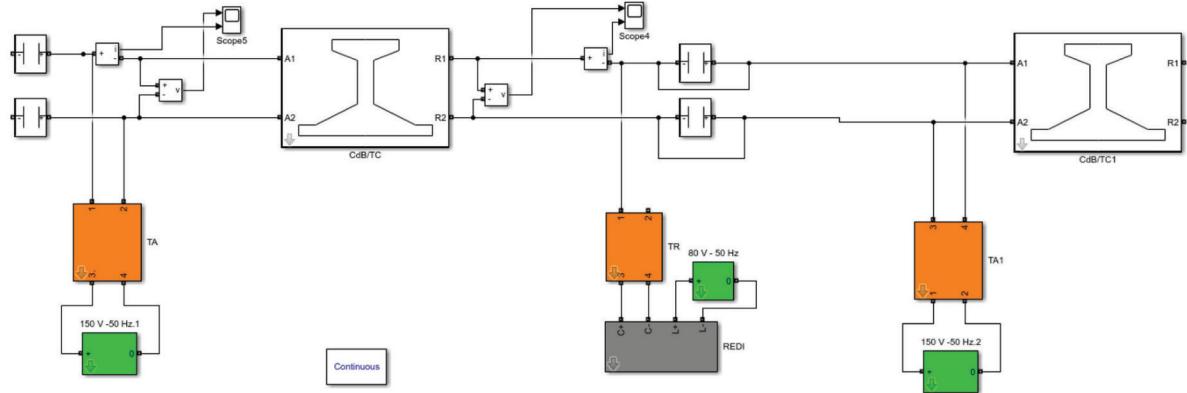


Figura 18 - Intrusione segnale.  
Figure 18 - Signal Intrusion.

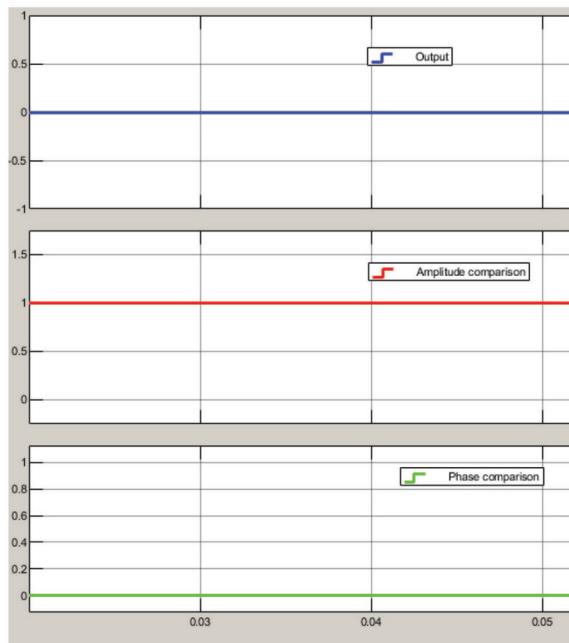


Figura 19 - Logica REDI in caso di intrusione segnale.  
Figure 19 - REDI logic in case of signal intrusion.

una risultante oltre che sfasata anche ridotta in ampiezza, pertanto sarebbero intervenuti entrambe le comparazioni eseguite dal REDI).

Per brevità si lascia al lettore la simulazione del CdB a singola fuga a 83,3 Hz in quanto non aggiunge particolari aspetti alla presente trattazione.

### 3. Modellistica e simulazione dei CdB a doppia fuga isolata

I Circuiti di Binario a doppia fuga isolata sono carat-

in Fig. 15. Note the phase correspondence between the generator and the field terminals of the REDI. The track circuit is assumed to be 400 m, and assuming that at instant 0.040 s, a shunt of  $0.8 \Omega$  is applied at the reception end under the most challenging safety conditions (maximum tolerance power supply voltage and dry ballast), the trends in Fig. 16 for the track voltage and current at the reception end are obtained (Scope 4). Fig. 16 also shows the output values of the REDI (indicating the de-excitation of the device) and the amplitude and phase comparison signals (indicating that the REDI is de-excited due to the reduction in the amplitude of the voltage caused by the shunt). The calibration values are those in Tab. 1, determined following the calibration procedure in [4] through the execution of preliminary simulations.

Fig. 18 represents a case study of signal infiltration in counterphase from another adjacent track circuit. In the analyzed case it is caused by:

- interruption of the Z connection;
- dielectric punching of both electrical joints of the two rails;
- interruption of the own power cable.

Fig. 19 shows that in such conditions, the REDI de-excites due to the phase difference between the "field" and "local" voltages; the REDI, in conjunction with the counter-phase power supply practice of adjacent track circuits, protects against such scenarios (in case of no power interruption, the two out-of-phase signals would have created a resulting signal that is not only phase-shifted but also reduced in amplitude, triggering both comparisons made by the REDI). For brevity, the simulation of the single-rail track circuit at 83.3 Hz is left to the reader, as it does not add particular aspects to the present discussion.

### 3. Modeling and Simulation of Dual-rail Track Circuits

*Dual-rail track circuits are characterized by the fact that both rails contribute to the conduction of traction current. For purposes of shortness, again, the adjective "isolated" will*

terizzati dal fatto che entrambe le rotaie concorrono alla conduzione della corrente di trazione. Per brevità, anche in questo caso, si ometterà l'aggettivo "isolata". Principalmente tali CdB si trovano in linea ove è presente il BAcc (Blocco Automatico a correnti codificate). In Fig. 20 ne è mostrato un esempio:

Le Casse Induttive (CI) permettono il redistribuirsi della corrente su entrambe le rotaie in modo che si compensino le cadute di tensione della corrente di trazione nel caso fosse attraversata una sola rotaia; ciò permette di evitare la saturazione dei trasformatori TRA e TRR.

Il segnale iniettato nel binario è una sinusoide con portante a 50 Hz che viene modulata interrompendola un certo numero di volte al minuto, dando vita ai codici 75, 120, 180 e 270 (interrotti rispettivamente 75, 120, 180 e 270 volte al minuto). Ogni codice contiene un diverso contenuto informativo dipendente dalle condizioni di impianto, questo viene captato a bordo tramite opportuni captatori del rotabile che consentono al personale di condotta di regolare di conseguenza la propria marcia.

La logica di impianto (*Logic*) dunque seleziona il codice che viene applicato al binario dal *Code Power Repeater* CPR (attuazione del codice), esso, alla ricezione del CdB, viene prelevato da un filtro a banda stretta RTU e viene inviato ad un relè inseguitore di codice *Tracking Relay* (TR) che commuta seguendo il ritmo del codice (in alcuni sistemi BAcc può venire a mancare il TR dove il codice può essere inviato direttamente ad un secondo dispositivo). Il Decodificatore (Dec.) analizza la presenza del codice eccitando il relè HR (*Hight efficiency biased plug-in Relay*) e insieme ai filtri di *Decoding Unit* (DU) riconosce il tipo di codice eccitando l'omonimo *Decoding Relay* DR.

Il blocco CGI (Controllo Giunto Isolante) permette il rilevamento della perdita d'isolamento dei giunti isolanti tramite l'iniezione di un segnale in alta frequenza nella maglia formata dalle due CI da un lato e l'altro del giunto. Il dispositivo "Rivelatore di Squilibrio" RdS insieme all'Invertitore "I" permette di rilevare pericolosi squilibri delle rotaie, ove in caso di particolari battimenti si potrebbero generare "codici indebiti"; a riguardo si veda il [7].

I CdB a doppia fuga a livello generale seguono più o meno lo schema di Fig. 20, i componenti però cambiano di dettaglio a seconda del fornitore del sistema BAcc; pertanto per i parametri dei singoli componenti bisogna riferirsi ai relativi *datasheet*.

Alcuni CdB a doppia fuga hanno una seconda portante, anch'essa codificata, a 178 Hz che aggiunge ulteriori 5 codici al fine di aumentare le informazioni inviate a bordo ed elevare la velocità della linea. In tal caso (con riferimen-

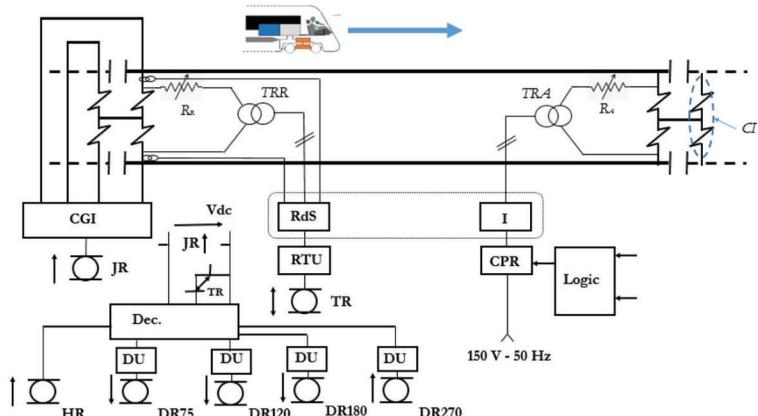


Figura 20 - CdB doppia fuga.  
*Figure - 20 TC double rail.*

be omitted. These circuits are mainly found on lines where the BAcc (Automatic Block with Coded Currents) is present. Fig. 20 shows an example:

*Inductive Shunts (IS) allow the current to redistribute to both rails to compensate for voltage drops in traction current if a single rail is traversed. This avoids saturation of the TRA and TRR transformers.*

The injected signal into the track is a sine wave at 50 Hz, modulated by interrupting it a certain number of times per minute, creating codes 75, 120, 180, and 270 (interrupted 75, 120, 180, and 270 times per minute, respectively). Each code contains different information depending on the plant conditions, which is captured onboard by appropriate rolling stock sensors, allowing the conductors to adjust their driving accordingly.

The plant logic (Logic) selects the code applied to the track by the Code Power Repeater CPR (code execution). Upon receiving the track circuit, the code is taken by an RTU filter and sent to a code Tracking Relay (TR) that switches following the code rhythm (in some BAcc systems, TR may be absent, and the code can be sent directly to a second device). The Decoder (Dec.) along with the Decoding Unit filters (DU) identifies the code type by exciting the corresponding Decoding Relay DR.

The GCI (Insulating Joint Control) block allows the detection of insulating joint perforation by injecting a high-frequency signal into the loop formed by the two CI on either side of the joint. The "Unbalance Detector" RdS, along with the Inverter "I," detects dangerous rail imbalances, where in the case of particular beats, it could generate "undue codes"; for more details, refer to [7].

In general, dual-rail track circuits follow the scheme shown in Fig. 20, but the components vary in detail depending on the BAcc system supplier; therefore, for the parameters of individual components, refer to the respective datasheets.

*Some dual-rail track circuits have a second carrier, also coded at 178 Hz, adding another 5 codes to increase the information sent onboard and speed up the line. In this case (with*

to alla Fig. 21) si aggiunge un generatore della seconda portante (G178) oltre al dispositivo miscelatore (Misc.) che si occupa di applicare entrambe le portanti al binario senza che ciascun segnale si riversi sull'altra sorgente. Sullo stadio di ricezione vi è un Decodificatore Statico DS178 e un *Decoding Relay* DR178 che svolgono la funzione di riconoscimento della seconda portante. Di questi per brevità non si tratterà in quanto la simulazione di segnali non isofrequenziali attraverso il binario è un problema che necessita di un approfondimento particolare (vedasi §6).

Esistono ulteriori tipi di CdB a doppia fuga, come quelli utilizzati nel Blocco Automatico a correnti fisse (BAcf) ove non vi è la codificazione del segnale, o come quelli del BAcc di stazione per itinerari di corsa dove l'alimentazione è normalmente non codificata e diviene codificata o alla formazione dell'itinerario (impianti con codifica preventiva) o con l'occupazione del CdB da parte del primo asse (impianti con codifica di primo asse); ci sono poi i CdB di stazione di lunghezza maggiore di 700 m che sono dotati di CI per motivi di disponibilità nei confronti della corrente di trazione e infine i CdB a doppia fuga per l'implementazione della funzione Infill in contesto di sistema automatico per la protezione del treno (SCMT, Sistema Controllo Marcia Treno). Per brevità nel proseguo si tratteranno solo i CdB a doppia fuga del BAcc in linea.

### 3.1. Modello del CdB a doppia fuga.

Il modello complessivo del CdB è dato dalla connessione del modello del binario con quello dei seguenti componenti.

#### 3.1.1. Modello dei trasformatori

Per i trasformatori si seguono le stesse considerazioni di cui al §2.1.1 con l'attenzione di adoperare valori dei parametri diversi a seconda dei vari fornitori di BAcc. Per la taratura di questi e delle resistenze vedasi [6].

#### 3.1.2. Modello del circuito di trazione

I componenti principali del circuito di ritorno della trazione elettrica per i CdB a doppia fuga sono le CI, esse sono realizzate tramite due semi-avvolgimenti avvolti su un nucleo ferromagnetico, tra i due semi-avvolgimenti vi è un terminale centrale che la corrente di trazione utilizza per passare da una CI all'altra.

Se le rotaie sono sufficientemente equilibrate le due aliquote della corrente danno vita a flussi che tendono ad elidersi. In caso di squilibri il flusso dunque crescerà tendendo alla saturazione del nucleo, con conseguente indisponibilità. In Fig. 22 è riportato l'andamento dell'impedenza a 50 Hz della CI (serie dei due semi-avvolgimenti) in funzione di una corrente di squilibrio (differenza delle correnti in DC tra le due rotaie con ondulazione a 50 Hz sovrapposta, per i dettagli vedasi [7]). Nonostante ciò quando si vuole omettere dalla simulazione il fenomeno di indisponibilità legato alla saturazione del nucleo, si possono simulare le CI semplicemente tramite la serie di due induttanze di valori

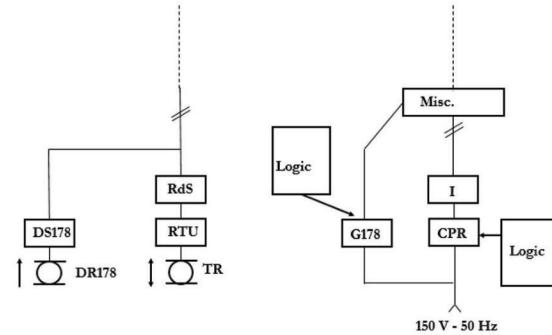


Figura 21 - Componenti 178 Hz.  
Figure 21 - Components 178 Hz.

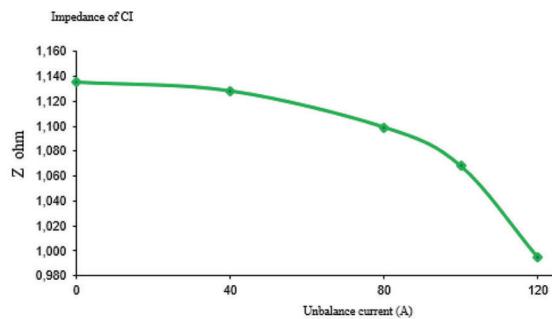


Figura 22 - Impedenza CI.  
Figure 22 - Impedance of CI.

reference to Fig. 21), a second carrier generator (G178) and a mixer device (Misc.) are added, applying both carriers to the track without each signal overflowing onto the other source. On the receiving stage, there is a Static Decoder DS178 filter and a Decoding relay DR178 relay, which perform the function of recognizing the second carrier. For brevity, the simulation of non-isofrequency signals through the track is a problem that requires special consideration (see §6).

There are additional types of dual-rail track circuits, such as those used in the Fixed Current Automatic Block (BAcf) where there is no signal coding. Or those in the station BAcc for run routes where the power supply is normally not coded and is switched to coded or route-formed (systems with preventive coding) or with the occupation of the track circuit by the first axle (systems with first axle coding). Dual-side track circuits for stations longer than 700 m, equipped with CI for traction current availability reasons, and dual-side track circuits for implementing the Infill function in the Automatic Train Protection Systems (SCMT) context. For brevity, only the dual-side track circuits of the BAcc in-line will be discussed further.

### 3.1. Model of the Dual-Side Track Circuit

The overall model of the Dual-Side Track Circuit (TC) is derived from the connection of the rail model with the models of the following components:

pari alla (12). Tale espressione riconsegna il valore a 50 Hz; per ricavare il valore a 83,3 Hz o 178 Hz basta sostituire rispettivamente  $1,83 \Omega$  o  $3,9 \Omega$  a  $1,1 \Omega$  nella (12).

$$L_{CI} = \frac{0,5 \cdot 1,1}{2\pi \cdot 50} \quad (12)$$

Per i collegamenti tra binario e CI, e tra CI e CI vale quanto visto al §2.1.2.

### 3.1.3. Modello dei cavi

La differenza rispetto al §2.1.3 è che date le maggiori distanze da coprire rispetto alla garitta di BA e dato che la resistenza massima di doppino in questo caso è di  $27 \Omega$ , per i cavi vale quanto in Tab. 3.

### 3.1.4. Modello della sorgente

L'unica differenza rispetto al §2.1.4 è che per i CdB di linea del BAcc l'alimentazione è codificata, mentre per quelli di stazione di corretto tracciato essa è normalmente non codificata e si passa alla codificata o alla formazione dell'itinerario (impianti con codifica preventiva) o con l'occupazione del CdB da parte del primo asse (impianti con codifica di primo asse). Il modello della sorgente codificata può essere implementato semplicemente tramite dei treni di impulsi che modulano una sorgente sinusoidale. In Fig. 23 è riportato il blocco che simula l'insieme di CPR e Invertitore; al suo interno vi è la moltiplicazione di una sinusode a 50 Hz con un treno di impulsi T1 che applica le interruzioni del codice; la successiva moltiplicazione con il treno T2 inverte invece ad ogni periodo la tensione simulando l'azione dell'invertitore "I" (l'invertitore viene a mancare nei CdB del BAcc di stazione). Il segnale è stato simulato supponendo una produzione di tipo statica, volendo però il segnale di uscita dal secondo prodotto può essere usato per comandare un interruttore che stabilisce ed interrompe elettricamente la tensione di partenza.

Si fa notare che i codici del BAcc a livello matematico sono descritti dal prodotto di una funzione sinusoidale con una funzione porta, la funzione sinusoidale è detta "portante" mentre la funzione porta è detta "modulante". L'equazione (13) descrive una generica funzione porta di

Cavi CdB doppia fuga  
Cable of TC double rail

Sezione ( $\text{mm}^2$ ) → Section ( $\text{mm}^2$ ) →	1	2,5	4	6	10
Resistenza massima doppino ( $\Omega/\text{km}$ ) → Maximum pair resistance ( $\Omega/\text{km}$ ) →	36	14,40	9,00	6	3,6
Massima lunghezza ( $\text{km}$ ) → Maximum lenght ( $\text{km}$ ) →	0,750	1,87	3,00	4,5	7,5

### 3.1.1. Transformer Model

For transformers, the considerations are the same as in §2.1.1. However, different parameter values should be used depending on various BAcc suppliers. For the calibration of these and the resistors, refer to [6].

### 3.1.2. Traction Circuit Model

The main components of the electric traction return circuit for dual-side track circuits are the Inductive Shunts (CI). They consist of two semi-windings wound on a ferromagnetic core, with a central terminal between the two semi-windings that the traction current uses to pass from one CI to the other. If the rails are sufficiently balanced, the two current halves give rise to flows that tend to cancel each other. In case of imbalances, the flux will grow, tending towards saturation of the core, resulting in unavailability. Fig. 22 shows the impedance behavior at 50 Hz of the CI (series of the two semi-windings) as a function of an imbalance current. Despite this, when omitting the unavailability related to core saturation from the simulation, the CI can be simulated simply by using the series of two inductances with values equal to (12).

$$L_{CI} = \frac{0,5 \cdot 1,1}{2\pi \cdot 50} \quad (12)$$

The connections between rail and CI, and between CI and CI, follow the principles discussed in §2.1.2.

### 3.1.3. Cable Model

Differences from §2.1.2 include the greater distances to cover compared to the BA guardhouse, and the maximum resistance of the twin cable in this case is  $27 \Omega$ . For cables, refer to Tab. 3.

### 3.1.4. Source Model

The only difference from §2.1.3 is that for BAcc line-side TCs, the power supply is coded, while for station TCs, it is normally uncoded and switched to coded or itinerary-formed (systems with preventive coding) or with the occupation of the TC by the first axle (systems with first axle coding). The coded source model can be implemented simply by using impulse trains that modulate a sinusoidal source. Fig. 23 shows the block that simulates the CPR and Inverter assembly, inside which there is the multiplication of a 50 Hz sine wave by an impulse train T1 that applies the interruptions of the code. The subsequent multiplication with the train T2 inverts the voltage every period, simulating the action of the inverter "I" (the inverter is missing in the BAcc station TCs). The signal is simulated assuming a static production; however, the output signal from the second product can be used to control a switch that establishes and electrically interrupts the starting voltage.

Tabella 3 - Table 3

Note that BAcc codes, from a math-

ampiezza  $\Delta$  e centrato in  $t_0$ , nel nostro caso  $\Delta = \text{periodo } T_{\text{ON}}$  del codice e  $t_0$  pari alla metà di questo.

$$\Pi\left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right) = \begin{cases} 1 & \text{se } t < \Delta \\ 0 & \text{se } t > \Delta \end{cases} \quad (13)$$

Pertanto i codici si riscrivono come:

$$\begin{aligned} \text{Cod75} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,4}{0,8}\right) \\ \text{Cod120} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,25}{0,5}\right) \\ \text{Cod180} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,166}{0,333}\right) \\ \text{Cod270} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,111}{0,222}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

Si fa notare che con l'introduzione della codifica del BAcc il sistema simulato continua ad essere lineare ma non più tempo invarianti, infatti se si trasla la portante di un  $\Delta t$  non si ottiene una traslazione dell'intero codice come mostrato nella (15) a titolo d'esempio per il codice 75.

$$\begin{aligned} &\sin(2\pi 50 \cdot (t + \Delta t)) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,4}{0,8}\right) \\ &\neq \sin(2\pi 50 \cdot (t + \Delta t)) \cdot \Pi\left(\frac{t+\Delta t-0,4}{0,8}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

### 3.1.5. Modello del ricevitore

In Fig. 24 è riportato lo stadio di ricezione composto dall'insieme dei modelli del Rivelatore di Squilibrio RDS, del filtro a banda stretta Resonant Track Unit (RTU), del TR, dello stadio decodificatore Dec e il DU. Le due correnti di rotaia "i1" e "i2" sono acquisite entrambe con convenzione dei versi entranti nella CI di ricezione del CdB. In Fig. 25 è riportato il modello all'interno del blocco RDS, esso consegna un'uscita alta (all'ingresso del blocco RTU) quando sono verificate le quattro condizioni dei quattro canali C1, C2, C3 e C4. I canali C1 e C3 verificano che la singola corrente di rotaia sia superiore alla soglia di 700 mA, il canale C2 invece verifica che la corrente di squilibrio "isq" non superi la soglia di 1,5 A ed infine il canale C4 che la tensione ricevuta dal binario "vr" superi la soglia di 10 V. Tali valori di soglia sono determinati dal [8].

Tutte le grandezze prima di essere comparate attraversano prima un filtro a banda stretta per poi essere valutato il valore RMS e successivamente il valore medio. Il valore medio viene calcolato su un periodo di 0,8 s (periodo di modulazione pari al tempo di ON e di OFF del codice più lento  $60/75=0,8$  s), in modo da avere segnali stabili e che non seguano gli stati di ON e OFF del codice di binario. In Fig. 26 sono mostrati i modelli dell'RTU e del TR: il primo è costituito da dei contatti che sulla base dell'uscita dell'RDS abilitano o meno la trasmissione del codice di binario su un carico di  $1,1 \text{ k}\Omega$ . Da questo preleva poi la tensione e la invia in ingresso al blocco del TR dove viene filtrata, raddrizzata ed applicata ad un carico sempre di  $1,1 \text{ k}\Omega$ . In tal modo

ematical point of view, are described by the product of a sinusoidal function with a square wave. The square wave is called "modulating", and the sinusoidal function is called "carrier". Equation (13) describes a generic gate function of amplitude  $\Delta$  and centered at  $t_0$ , in our case  $\Delta = \text{period } T_{\text{ON}}$  of the code and  $t_0$  equal to half of this.

$$\Pi\left(\frac{t-t_0}{\Delta}\right) = \begin{cases} 1 & \text{se } t < \Delta \\ 0 & \text{se } t > \Delta \end{cases} \quad (13)$$

The codes can be rewritten as follows:

$$\begin{aligned} \text{cod75} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,4}{0,8}\right) \\ \text{cod120} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,25}{0,5}\right) \\ \text{cod180} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,166}{0,333}\right) \\ \text{cod270} &= \sin(2\pi 50 \cdot t) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,111}{0,222}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

Note that with the introduction of BAcc coding the simulated system continues to be linear but no longer time invariant, in fact if one shifts the carrier by a  $\Delta t$  one does not get a shift of the entire code as shown in (15) as an example for code 75.

$$\begin{aligned} &\sin(2\pi 50 \cdot (t + \Delta t)) \cdot \Pi\left(\frac{t-0,4}{0,8}\right) \\ &\neq \sin(2\pi 50 \cdot (t + \Delta t)) \cdot \Pi\left(\frac{t+\Delta t-0,4}{0,8}\right) \end{aligned} \quad (15)$$

### 3.1.5. Receiver Model

Fig. 24 shows the receiving stage composed of the set of models of the Unbalance Detector (RDS), narrowband filter Resonant Track Unit (RTU), TR, Dec and DU decoder stage. The two rail currents "i1" and "i2" are both acquired with convention of the verses entering the receiving IC of the TC. Fig. 25 shows the model inside the RDS block, it delivers a high output (at the input of the RTU block) when the four conditions of the four channels C1, C2, C3 and C4 are verified. Channels C1 and C3 verify that the single rail current is above the threshold of 700 mA, channel C2 on other hand verifies that the unbalance current "isq" does not exceed the threshold of 1.5 A and at last the channel C4 that the voltage

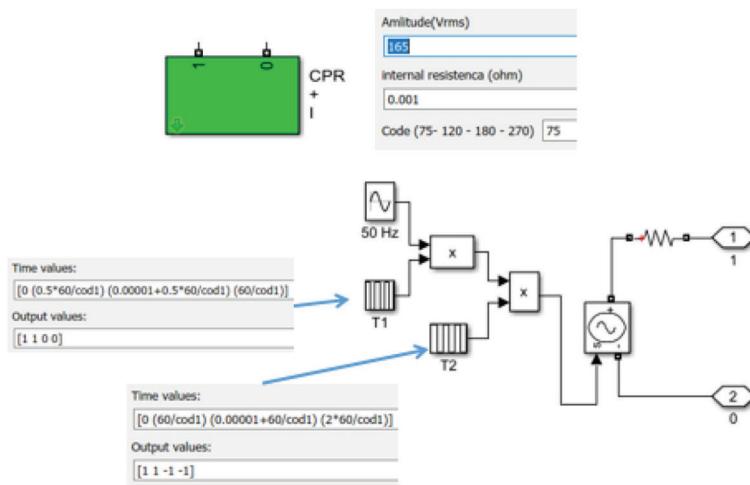


Figura 23 - Modello trasmissione codice.  
Figure 23 - Code transmission model.

si è simulato l'azione di raddrizzamento dell'RTU senza utilizzare componenti discreti quali diodi (il vantaggio di ciò sarà evidente al §6). Il valore di tensione misurato sul carico viene confrontato con le soglie di eccitazione e diseccitazione del TR, il quale consegna un treno di impulsi, che segue il codice di binario, all'ingresso del blocco Dec+DU. Infine in Fig. 27 è riportato il blocco che simula l'azione di decodifica Dec, quella di filtraggio dei DU e quella di segnalazione dei relè HR, DR75, DR120, DR180 e DR270. Dopo il relativo filtro viene calcolato il valore RMS sulla frequenza della relativa modulante, un semplice blocco di switch individua il codice se supera una certa soglia. L'azione dell'HR è simulata tramite una porta OR che ha lo scopo di rilevare se almeno un codice è presente.

### 3.1.6. Modello dei giunti isolanti

Vedasi §2.1.6.

### 3.2. Simulazione del CdB a doppia fuga isolata.

Interconnettando tutti i modelli sin ora presentati si ottiene il sistema in Fig. 28.

Considerato un CdB di 2 km con valori di taratura di Tab. 4 in condizioni di tensione di alimentazione massima di 165 V e ballast secco, se si parte da una condizione di libero e all'istante 2 s si applica uno shunt di  $0,25 \Omega$  in corrispondenza della ricezione, mentre è applicato un codice 75 al binario, si ottengono gli andamenti per la tensione e la corrente di binario all'estremità di ricezione (Scope 4) dai primi due segnali di Fig. 29. Il terzo segnale invece

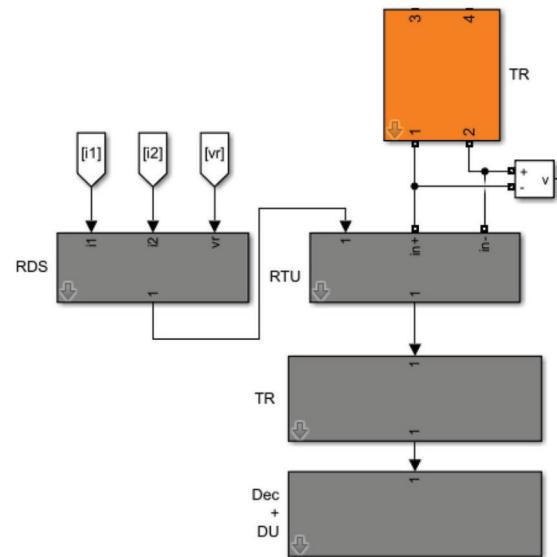


Figura 24 - Ricezione codice.  
Figure 24 - Code reception model.

received by the rail "vr" exceeds the threshold of 10 V. These threshold values are determined by [8]. All quantities before being compared first pass through a narrow-band filter and then the RMS value and then the average value are evaluated. The average value is calculated over a period of 0.8 s (modulation period equal to the ON and OFF time of the slowest code 60/75=0.8 s), so as to have stable signals that

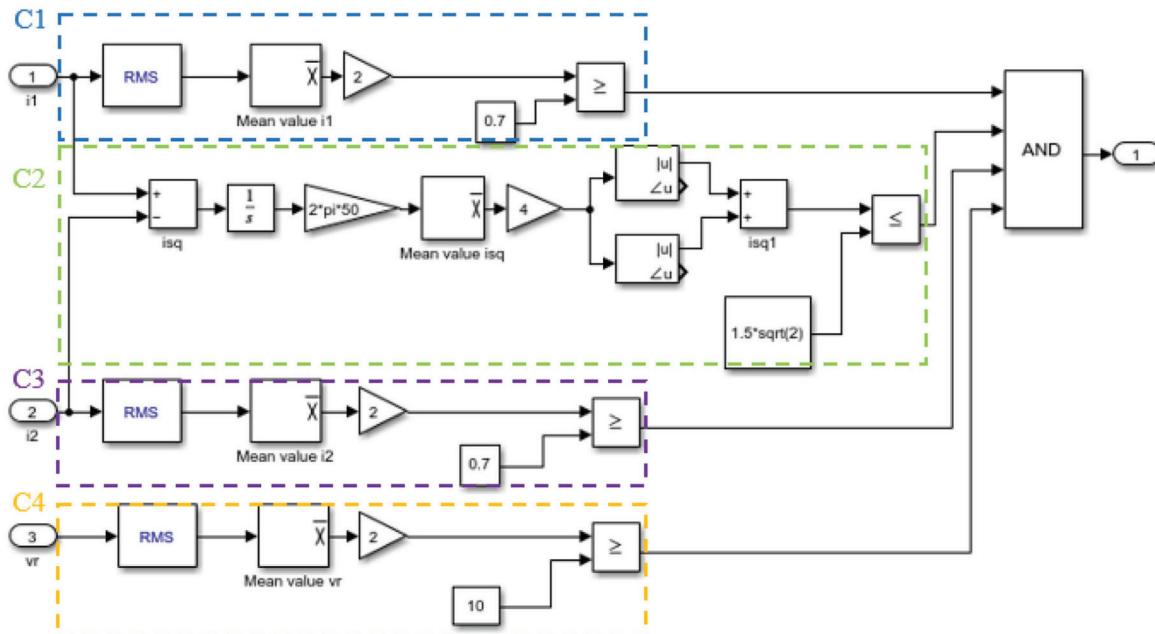


Figura 25 - Modello RDS.  
Figure 25 - Model RDS.

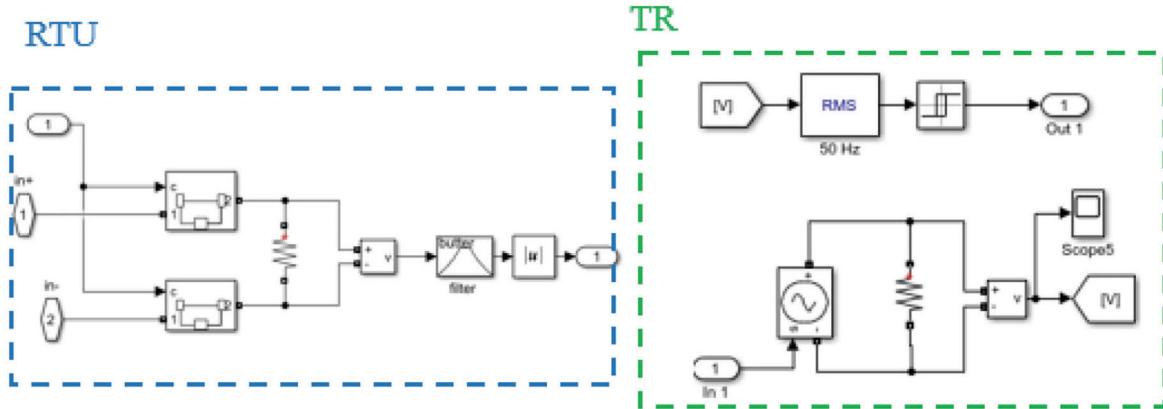


Figura 26 - Modelli RTU e TR.  
Figure 26 - Models of RTU e TR.

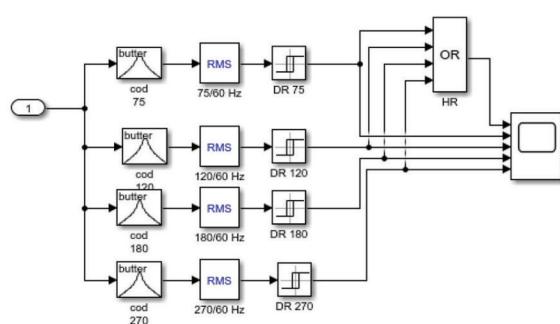


Figura 27 - Modelli DR.  
Figure 27 - Models of DR.

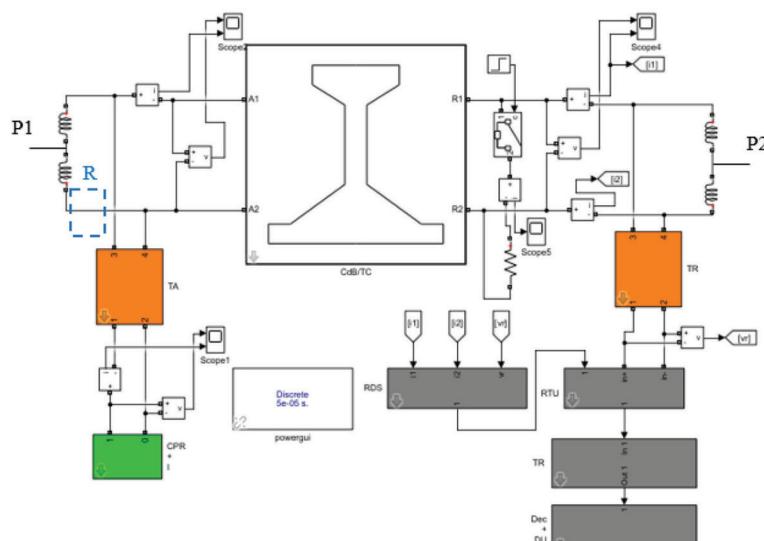


Figura 28 - Implementazione modello CdB doppia fuga.  
Figure 28 - Implementation of TC double rail.

do not follow the ON and OFF states of the binary code. Fig. 26 shows the models of the RTU and TR, the first consists of contacts that on the basis of the output of the RDS enable or disable the transmission of the track code on a  $1.1\text{ k}\Omega$  load, it picks up the voltage on this and sends it as an input to the TR block where it is filtered, rectified and applied to a load also of  $1.1\text{ k}\Omega$ . This simulated the rectification action of the RTU without using discrete components such as diodes (the advantage of this will be evident in §6). The measured voltage value at the load is compared with the excitation and de-energization thresholds of the TR, which delivers a train of pulses, following the track code, to the input of the Dec+DU block. At last, Fig. 27 shows the block that simulates the Dec decoding action, the DU filtering action, and the signaling action of the FR, DR75, DR120, DR180, and DR270 relays. After the relative filter is calculated the RMS value on the frequency of the relative modulator, a simple switch block detects the code if it exceeds a certain threshold. The action of the HR is simulated through an OR port that is intended to detect if at least one code is present.

### 3.1.6. Isolating Joint Model

Refer to §2.1.6 for the modeling of isolating joints.

### 3.2. Simulation of the insulated Dual-rail Track Circuit

Interconnecting all the models results in the system shown in Fig. 28. Considering a 2 km TC with calibration values from Tab. 4 under maximum power supply voltage conditions of 165 V and dry ballast, if starting from a free condition and applying a  $0.25\text{ }\Omega$  shunt

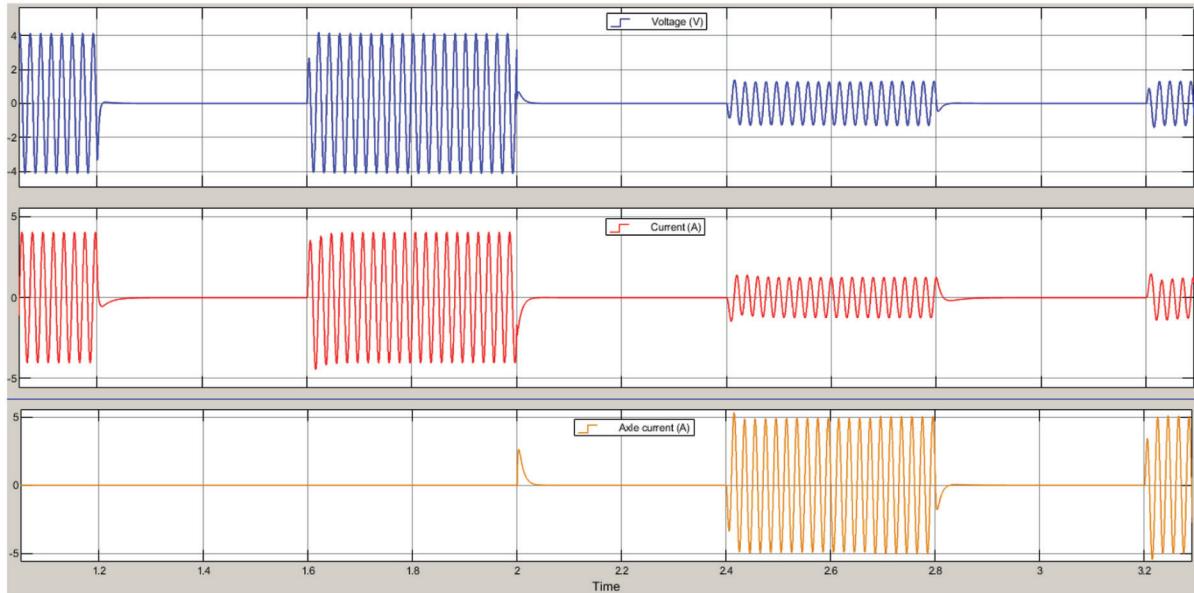


Figura 29 - Segnali di binario.  
Figure 29 - Track signals.

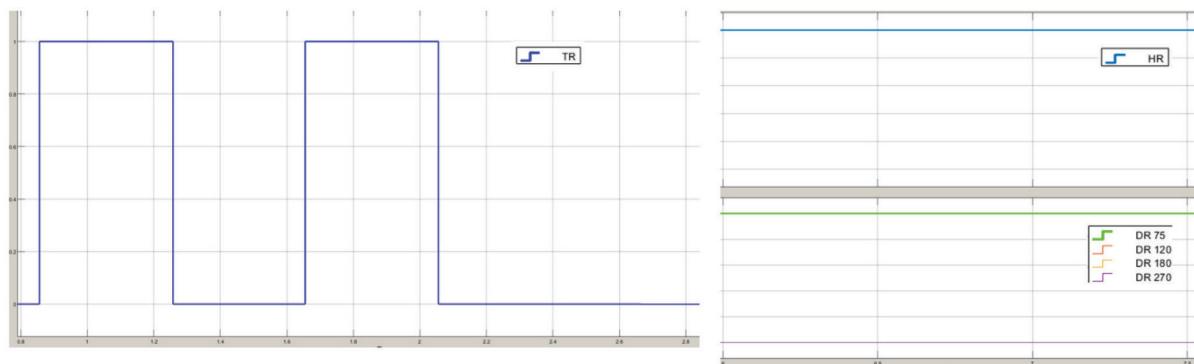


Figura 30 - Output di TR, Hr e DR.  
Figure 30 - Output of TR, Hr e DR.

mostra l'andamento della corrente d'asse (Scope 5). In Fig. 30 a sinistra è riportata l'uscita del TR, mentre a destra l'uscita dell'HR e dei DR in condizioni di CdB libero.

Se invece si suppone con CdB libero (ad esempio con codice 75) di simulare all'istante 3 s l'iniezione di una armonica di trazione di 1 A a 50 Hz tra i punti P1 e P2 di Fig. 28 e che all'istante 5 s avvenga uno squilibrio distaccando la rotaia nel rettangolo R di Fig. 28 si simula una condizione estrema di intervento del dispositivo RDS. In Fig. 31 sono riportati gli andamenti della tensione e delle correnti di rotaia agli

at the reception end at 2 s, while applying a code 75 to the rail, the trends for the rail voltage and current at the reception end (Scope 4) are obtained from the first two signals in

Tabella 4 – Table 4

Taratura CdB doppia fuga  
Calibration of TC double rail

Rapporto di trasformazione TA Transformation ratio TA	Resistenza Ra( $\Omega$ ) Resistance Ra ( $\Omega$ )	Rapporto di trasformazione TR Transformation ratio TR	Resistenza Rr( $\Omega$ ) Resistance Rr ( $\Omega$ )
150/12	3	12/150	0,5

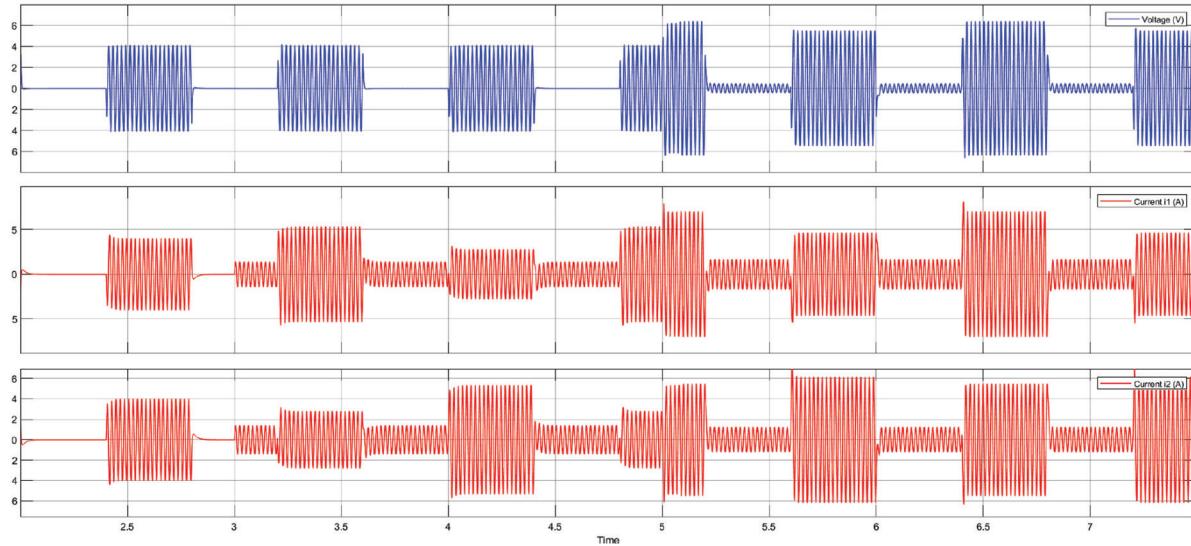


Figura 31 - Segnali di binario in caso di squilibrio.  
Figure 31 - Track signals in case of imbalance.

estremi di ricezione, mentre in Fig. 32 sono riportati i segnali digitali elaborati dal dispositivo RDS dove all'istante

*Fig. 29. The third signal shows the trend of the axle current (Scope 5). In Fig. 30 on the left, the TR output is shown,*

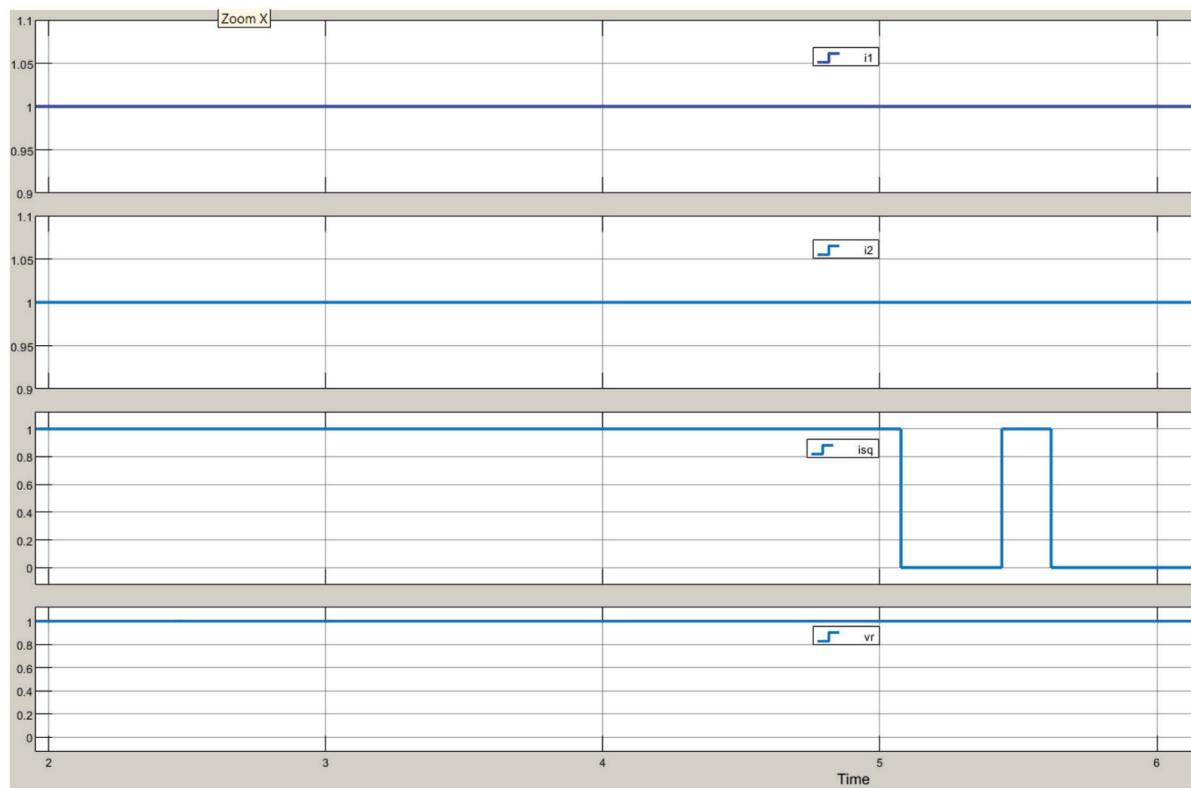


Figura 32 - Funzionamento RDS.  
Figure 32 - Operation RDS.

5 si nota il suo intervento per condizioni di squilibrio per annullamento del segnale isq (il segnale mostra un temporaneo "rimbalzo" di circa 200 ms dovuto all'inversione di segno di un offset generato dalle operazioni di integrazione e media del canale C2 di Fig. 25, tale effetto è rimovibile tramite un ottimizzazione del canale qui non presentata per semplicità di esposizione).

#### 4. Modellistica dei CdB contenenti deviatoi

I CdB contenenti dei deviatoi possono presentare le due configurazioni in Fig. 33 a seconda che siano a semplice o a doppia fuga.

In Fig. 34 è mostrata l'implementazione del modello per il caso singola fuga evidenziando in rettangoli colorati le corrispondenze tra l'elemento del disegno a sinistra e il blocchetto che lo implementa a destra. In verde vi è il tratto di binario relativo agli aghi del ramo deviato, in viola il relativo tratto sul ramo normale. In azzurro il tratto di binario dall'estremo di ricezione alla punta del deviatoio mentre in rosso quello che va dal giunto intermedio all'estremo di ricezione. In marrone il tratto di binario del ramo deviato ed infine in grigio il collegamento (tramite

while on the right, the output of the HR and DRs is shown under free TC conditions.

If, instead, assuming a free TC (e.g., with code 75) and simulating the injection of a 1 A traction harmonic at 50 Hz between points P1 and P2 of Fig. 28 at 3 s and causing an imbalance by disconnecting the rail in the R rectangle of Fig. 28 at 5 s, an extreme intervention condition of the RDS device is simulated. Fig. 31 shows the trends of rail voltage and rail currents at the reception ends, while Fig. 32 shows the digital signals processed by the RDS device, where at 5 s, its intervention can be observed for imbalance conditions to cancel the isq signal (the signal shows a temporary "bounce" of about 200 ms due to the inversion of the sign of an offset generated by the integration and averaging operations of the C2 channel in Fig. 25, this effect is removable by channel optimization not presented here for simplicity of exposition).

#### 4. Modeling of TCs Containing Turnouts

TCs containing switches can have the two configurations in Fig. 33 depending they have a single or dual-rail track circuit. The implementation of the model for the single-rail track circuit case is shown in Fig. 34, highlighting the correspon-

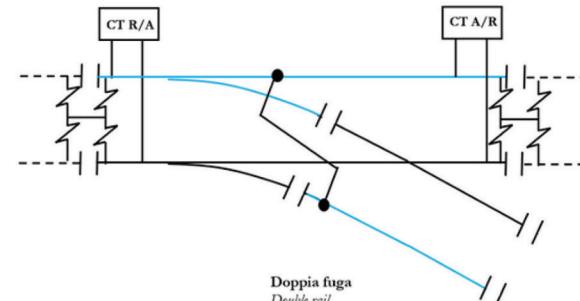
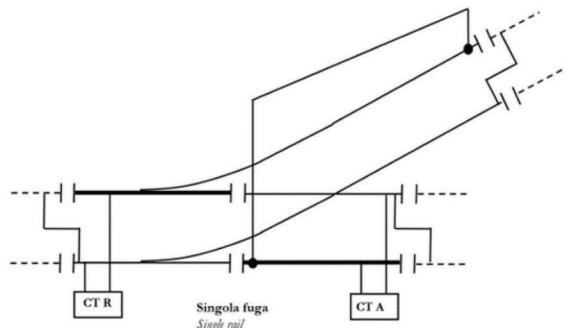


Figura 33 - CdB con deviatoio.  
Figure 33 - TC with switch.

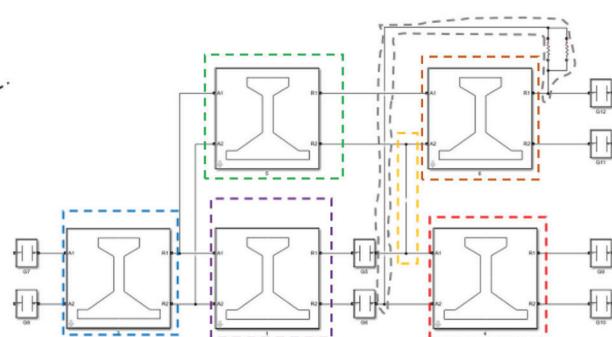
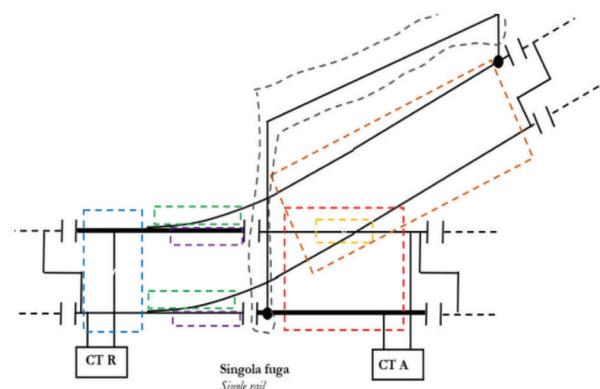


Figura 34 - Modello CdB singola fuga con deviatoio.  
Figure 34 - Model of TC single rail with switch.

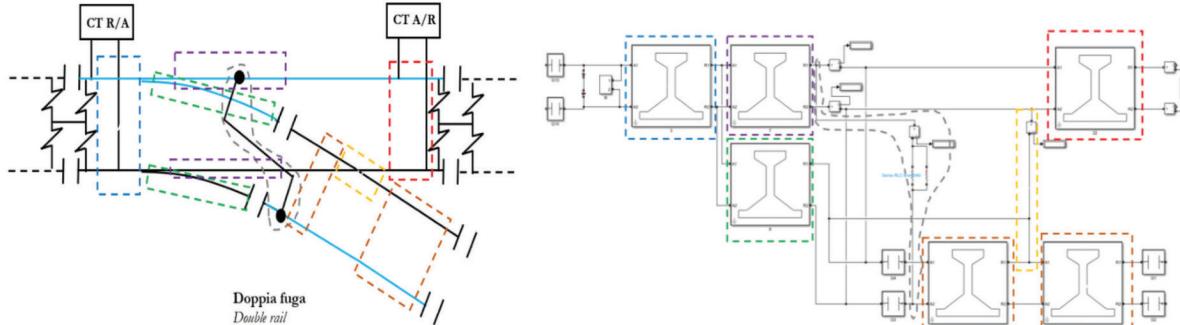


Figura 35 - Modello CdB doppia fuga con deviatoio.  
Figure 35 - Model of TC double rail with switch.

pipette) che permette di collegare in serie le rotaie isolate dei due rami [9].

In Fig. 35 invece l'implementazione per il caso doppia fuga con analoghi significati, in tal caso in grigio vi è il collegamento che permette la funzione di *shunt* sul ramo deviato.

Le estensioni dei vari tratti di binario modellati sono derivabili dalle dimensioni di interesse del deviatoio come mostrato in Fig. 36 ricavabili tramite tabelle in base alla tangente del deviatoio.

### 5. Interazione della corrente di trazione con i CdB

Talvolta risulta necessario simulare un CdB non solo per studiarne il funzionamento ma per analizzare l'interazione di questo con la corrente di trazione.

Tale generatore va posto in serie alla rotaia a terra o tra i centri delle CI estreme del tratto di binario (uno o più CdB) da simulare nel caso di CdB liberi.

Nel caso di CdB occupato un terminale va collegato a metà della resistenza che simula l'asse e l'altro agli estremi del tratto di binario da simulare. In Fig. 37 l'esempio della simulazione di libero per due CdB (a) e occupato per singolo CdB (b) per i due casi di singola fuga e a doppia fuga.

La corrente di trazione per le linee a 3 kV è costituita da una componente continua e da una serie di armoniche sovrapposte. In generale l'analisi di segnali a diversa frequenza nel binario richiede un'analisi particolare di cui si parlerà al §6. Pertanto il caso (b) di Fig. 37 deve intendersi come il caso in cui si inietta una corrente di pari frequenza (o molto prossima) a quella del segnale del CdB. Qui verranno esposti gli accorgimenti modellistici da prevedersi, oltre che un particolare caso studio per il quale, sotto determinate ipotesi, ci si può svincolare dalla trattazione al §6.

Un aspetto modellistico di interesse è quello della simulazione di trasformatori con nucleo non lineare (utile quando si vuole indagare sugli effetti di saturazione,

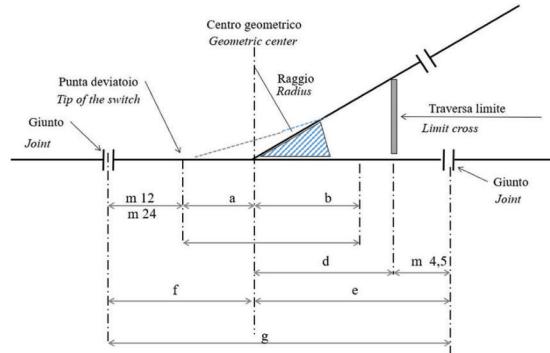


Figura 36 - Misure deviatoio.  
Figure 36 - Measures switch.

dences between the elements on the left and the blocks implementing them on the right. In green is the track section related to the needles on the deviated branch, in purple the related section on the normal branch. In light blue is the track section from the receiving end to the tip of the turnout while in red is the section from the intermediate joint to the receiving end. In brown the track section of the diverted branch and finally in gray the connection (via pipettes) that allows insulated rails of the two branches to be connected in series.

In Fig. 35, meanwhile, is the implementation for the double runaway case with similar meanings, in which case in gray is the link that allows the shunt function on the deviated branch.

The extensions of the various track sections modeled can be derived from the dimensions of interest of the diverter as shown in Fig. 36 derived by tables based on the tangent of the diverter.

### 5. Interaction of Traction Current with TCs

Sometimes it is necessary to simulate a TC not only to study its operation but also to analyze its interaction with the traction current. This generator should be placed in series with the ground rail or between the extreme CI centers of the rail section (one or more TCs) to simulate in the case of free TCs. In

e dunque di indisponibilità, causati dalla corrente di trazione). Un metodo semplice e generale per determinare la curva di magnetizzazione di un trasformatore è quello di cui al [10]. Tale metodo prevede l'approssimazione matematica della curva di magnetizzazione con una funzione polinomiale dispari. La regressione viene poi effettuata tramite prove sperimentali. Oggi giorno tuttavia è possibile utilizzare blocchetti pronti all'uso che implementano una caratteristica non lineare del nucleo. Per lo svolgimento delle simulazioni in questo paragrafo (che hanno lo scopo di fornire il metodo generale per affrontare la problematica) si sono utilizzate le curve di magnetizzazione qualitative (riferite all'avvolgimento lato cabina dei trasformatori) riportate in Fig. 38.

In Fig. 39 è riportato il modello utilizzato per studiare il fenomeno. Si è supposto il CdB a singola fuga di 400 m e non dotato di dispositivo a ponte. Nel cerchio blu è mostrato l'interno dei blocchi dei trasformatori saturabili, nel cerchio rosso la modellizzazione della caduta di tensione provocata sulla rotaia a terra dalla corrente continua di trazione; tale blocco risulta essere un generatore controllato di tensione che implementa l'espressione (16) dove  $R$  è la resistenza di rotaia in corrente continua,  $L$  la lunghezza di questa e  $I$  la corrente continua che l'attraversa.

$$E = R \cdot L \cdot I = 0,024 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,4_{km} \cdot I \quad (16)$$

La corrente  $I$  è stata simulata pari a 0 A per i primi 0,1 s, pari a 1000 A tra i 0,1 s e i 0,2 s e pari a 2000 A dall'istante 0,2 s in poi. In Fig. 40 sono riportati gli andamenti della caduta di tensione continua sulla rotaia a terra, della tensione di campagna applicata al REDI e del suo output relativo al controllo di ampiezza. Dai grafici si nota che dopo l'istante 0,1 s l'attenuazione della tensione dovuta alla saturazione del trasformatore è già tale da disaccendere il REDI notando una lieve deformazione di questa, oltre l'istante 0,2 s quando aumenta la corrente di trazione, si nota un aumento della deformazione della tensione indice che si è spostati sempre più nella regione di saturazione.

L'iniezione di tale corrente ricade nella trattazione di più segnali a diversa frequenza nel binario di cui al §6, tuttavia per l'aspetto particolare del fenomeno da studiare fissando a priori tale caduta (e non volendo analizzare altri fenomeni quali ad esempio gli squilibri della corrente ecc...) si riesce a simulare il fenomeno tenendo conto del diverso comportamento elettrico della rotaia in frequenza senza le complicazioni modellistiche che si vedranno al §6.

Tale metodo può essere adottato anche talvolta per analizzare il fenomeno della saturazione delle CI, in tal

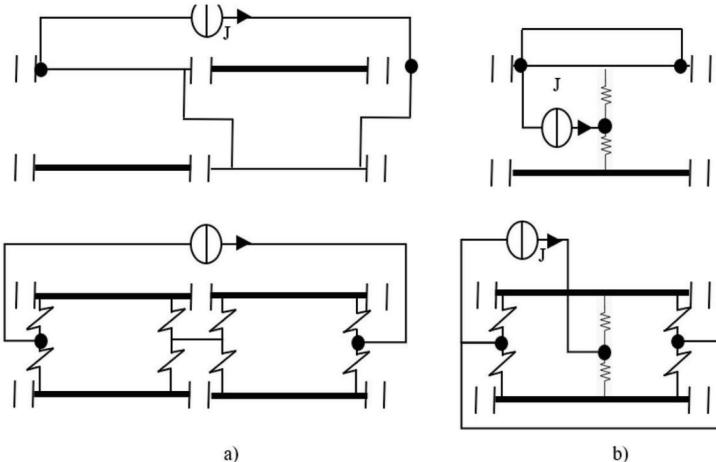


Figura 37 - Modello corrente trazione.

Figure 37 - Current traction model.

*the case of an occupied TC, one terminal should be connected to the middle of the resistance simulating the axle and the other to the ends of the rail section to simulate in the case of a free TC. Fig. 37 shows an example of simulation of free conditions for two TCs (a) and occupied conditions for a single TC (b) for the two cases of a single and dual-side track circuit.*

*The traction current for 3 kV lines consists of a DC component and a series of superimposed harmonics. In general, the analysis of signals at different frequencies in the rail requires a particular analysis discussed in §6. Therefore, the case (b) in Fig. 37 should be understood as the case in which a current of the same frequency (or very close) as that of the TC signal is injected. Here, modeling precautions are provided, as well as a particular case study for which, under certain assumptions, it is possible to separate from the treatment in §6.*

*An interesting modeling aspect is that of simulating transformers with a non-linear core (useful when investigating the effects of saturation and, therefore, unavailability caused by traction current). A simple and general method for determining the magnetization curve of a transformer is described in [10]. This method involves the mathematical approximation of the magnetization curve with an odd-degree polynomial function. Regression is then performed through experimental tests. Nowadays, ready-to-use blocks implementing a non-linear core characteristic can be used. For the simulations in this section (aimed at providing a general method to address the issue), qualitative magnetization curves (referring to the cabin-side winding of the transformers shown in Fig. 38 were used).*

*Fig. 39 shows the model used to study the phenomenon. A single-rail track circuit without a bridge device and with a length of 400 m was assumed. In the blue circle, the inside of the saturable transformer blocks is shown, and in the red circle, the modeling of the voltage drop caused on the ground rail by the DC traction current is modeled. This block turns out to be a controlled voltage generator implementing the*

caso queste andranno modellate tramite due induttanze non lineari (una per ogni semi-avvolgimento) le cui caratteristiche di magnetizzazione andranno anch'esse determinate per via sperimentale.

### 6. Simulazione di segnali a diversa frequenza nel binario

In questo paragrafo analizzeremo un tema cui più volte si è rimandato per il quale sono necessari alcuni accorgimenti modellistici, che sotto determinate condizioni, forniscono un risultato maggiormente accurato in caso di trasmissione sul binario di più segnali a differente frequenza.

La rotaia è caratterizzata infatti da un profilo ben noto e ben preciso, tale profilo la rende di fatto un conduttore particolarmente sensibile all'effetto pelle, e dunque presenta una variazione dei parametri "r" e "l" in funzione della frequenza così come mostrato nello studio al [1], si nota poi che l'effetto pelle incide anche sulla "c" della aliquota di corrente che si disperde nella massicciata, pertanto si può concludere che il binario complessivamente ha un comportamento elettrico non costante in frequenza. Questo naturale comportamento in frequenza della rotaia complica non poco l'applicazione del model-

expression (16), where  $R$  is the DC rail resistance,  $L$  is its length, and  $I$  is the DC current through it.

$$E = R \cdot L \cdot I = 0,024 \frac{\Omega}{km} \cdot 0,4_{km} \cdot I \quad (16)$$

The current  $I$  was simulated as 0 A for the first 0.1 s, 1000 A between 0.1 s and 0.2 s, and 2000 A from 0.2 s onwards. Fig. 40 shows the trends of the continuous voltage drop on the ground rail, the field voltage applied to the REDI, and its output relative to amplitude control. From the graphs, it can be observed that after 0.1 s, the attenuation of the voltage due to transformer saturation is already such that it de-excites the REDI, noting a slight deformation of it. Beyond 0.2 s, when the traction current increases, an increase in the deformation of the voltage is observed, indicating that we have moved further into the saturation region.

The injection of such current falls within the treatment of multiple signals at different frequencies in the rail discussed in §6. However, for the specific aspect of studying the phenomenon by fixing a priori this drop (and not wanting to analyze other phenomena such as current imbalances, etc.), it is possible to simulate the phenomenon taking into account the different electrical behavior of the rail at different frequencies without the modeling complications that will be seen in §6.

This method can also be adopted sometimes to analyze the phenomenon of CI saturation. In this case, these should be modeled using two non-linear inductances (one for each

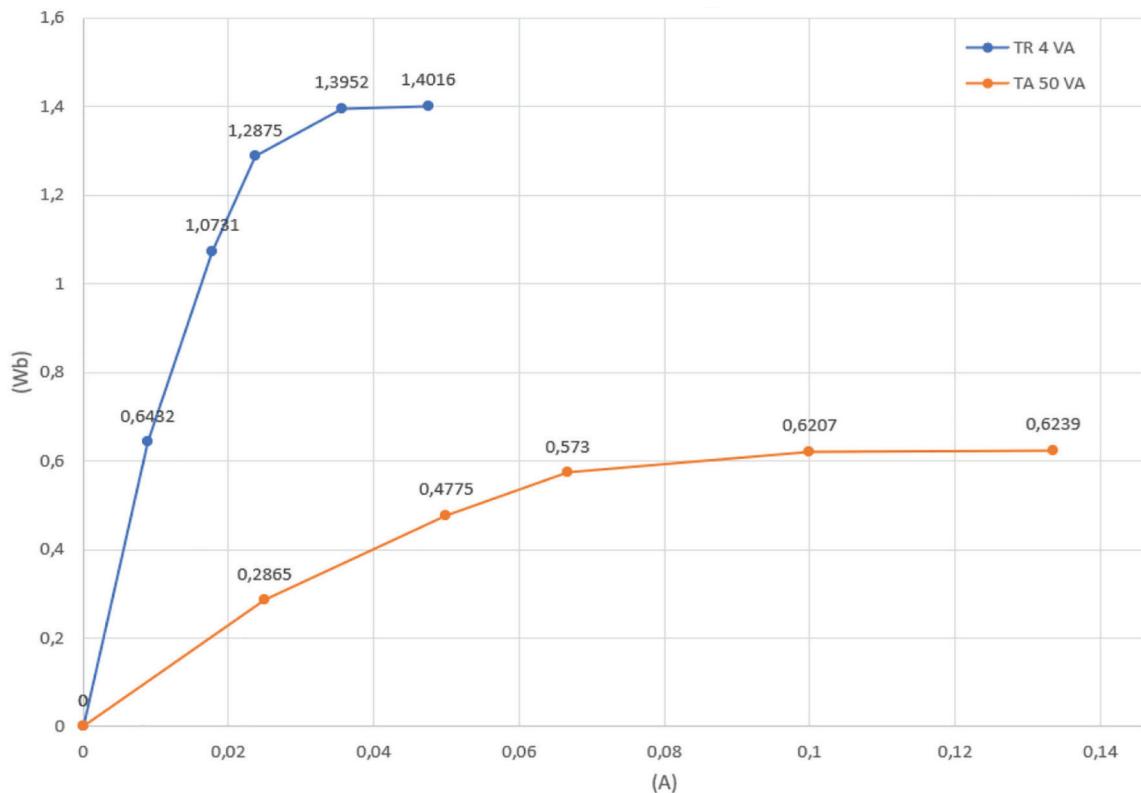


Figura 38 - Curve saturazione.  
Figure 38 - Saturation curves.

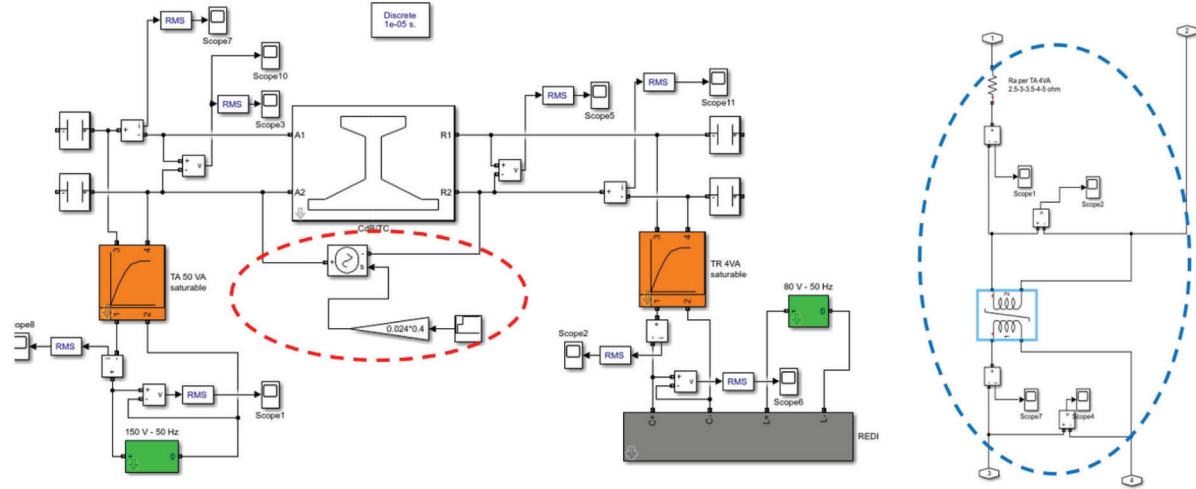


Figura 39 - Simulazione corrente trazione.  
Figure 39 - Simulation of current traction.

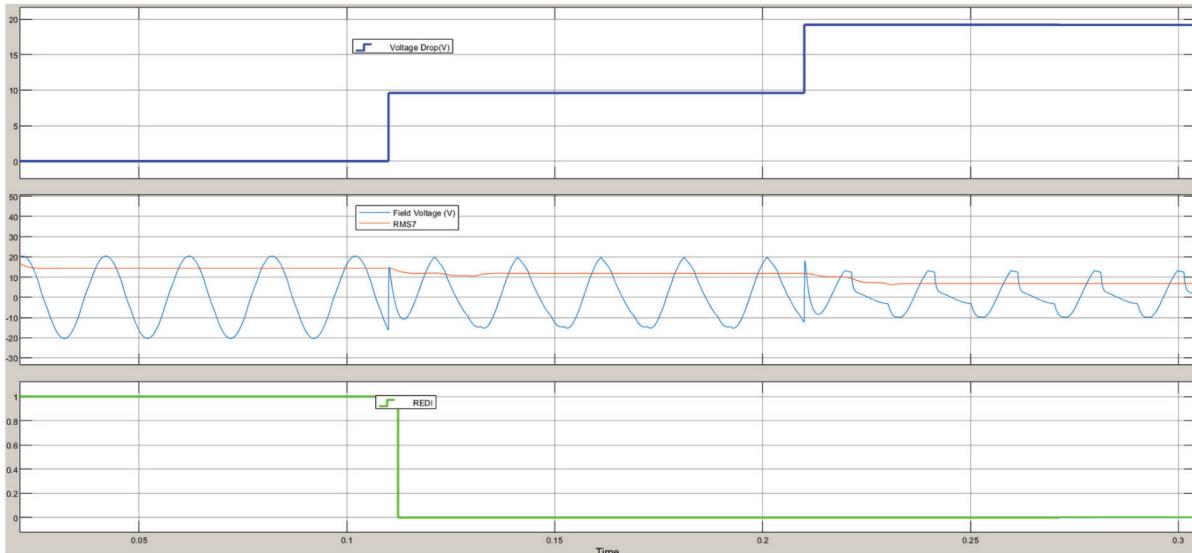


Figura 40 - Risultati simulazione della corrente di trazione.  
Figure 40 - Traction current simulation results.

lo (1) non avendo più l'unicità dei valori attribuiti a "r", "l" e "c".

Per una trattazione che privilegi l'aspetto quantitativo a quello qualitativo è possibile simulare il diverso comportamento del binario in frequenza applicando il principio di sovrapposizione degli effetti. Ciò come noto è possibile se il sistema è lineare o linearizzabile intorno al punto di funzionamento. I principali punti di funzionamento di un CdB una volta tarato sono quelli di libero e occupato al variare dell'umidità della massicciata, delle fluttuazioni della tensione di rete e del valore della resi-

*semi-winding) whose magnetization characteristics should also be determined experimentally.*

### 6. Simulation of Signals at Different Frequencies on the Track

*In this section, we will analyze a topic that has been deferred several times, for which some modeling precautions are necessary. Under certain conditions, these precautions provide a more accurate result when transmitting multiple signals at different frequencies on the track.*

*The rail is characterized by a well-known and precise*

stenza di *shunt*. In tutti questi casi è possibile linearizzare di volta in volta il sistema se si escludono i fenomeni di saturazione dei trasformatori e delle CI. Fatto ciò si ricade nelle ipotesi di applicabilità generale del metodo. In Fig. 41 è raffigurato il metodo applicato nel caso di un CdB a doppia fuga in cui sono iniettate due componenti della corrente di trazione (uno a frequenza  $f_0$  e l'altro a frequenza  $f_3$ ) e due segnali utili del CdB (uno a frequenza  $f_1$  e l'altro a frequenza  $f_2$ ). Il segnale  $S(t)$  in figura rappresenta un generico segnale da analizzare visto come combinazione lineare di quattro contributi dovuti alle quattro differenti sorgenti.

Ovviamente nella realizzazione dei quattro sotto-modelli alle diverse frequenze i parametri andranno settati ogni volta in base alla frequenza in esame. In tale procedimento bisogna far particolare attenzione a contemplare i diversi comportamenti in frequenza di tutti i componenti del CdB (trasformatori, CI, resistenze ecc...) ponendo particolare attenzione alle conseguenze dell'effetto pelle su questi.

Tuttavia è necessario un ulteriore accorgimento specifico per l'argomento dei circuiti di binario ed è quello di applicare la sovrapposizione degli effetti alla sola parte del modello a tempo continuo, in poche parole bisogna ricostruire i segnali complessivi prima che questi vengano elaborati dai dispositivi elettronici di binario per le operazioni logiche eseguite da questi. Se così non fosse si arriverebbe all'assurdo, ad esempio se si vuole simulare la sovrapposizione di un disturbo di trazione con un segnale del CdB a 50 Hz si otterrebbero due REDI separati che forniscono delle uscite di libero/occupato separate e indipendenti tra di loro, uno dovuto al disturbo di trazione e l'altro dovuto al segnale del CdB.

In Fig. 42 sono riportati i dispositivi REDI e RDS+RTU riorganizzati per l'analisi multifrequenza (nello specifico di due diverse frequenze) rispetto alle analisi condotte rispettivamente al §2.1.5e al §3.1.5. Si nota che in questo caso i modelli contengono unicamente blocchi a tempo discreto per l'elaborazione dei segnali mentre le impedanze di binario sono al di fuori e rappresentano i carichi dei sotto modelli di Fig. 41.

Un importante limite da considerare del metodo qui introdotto è quello relativo ai transitori che si hanno da uno stato di regime all'altro (esempio: transizione da libero a occupato), infatti tali transitori sono dovuti alla sovrapposizione di moti aperiodici per i quali non è noto sapere il comportamento elettrico della rotaia. Tale fattore non è tuttavia limitante in quanto generalmente nelle analisi riguardanti i CdB ciò che interessano sono le condizioni di regime, per i transitori l'aspetto più di interesse è il picco massimo che si raggiunge più che l'andamento ed il primo in genere è limitato da componenti al di fuori del binario (es. resistenze di regolazione ecc...).

Infine in Fig. 43 è riportata l'applicazione del metodo per un CdB a doppia fuga a 83,3 Hz con modulazione PSK in cui all'atto dell'occupazione viene disabilitata la

profile, making it a conductor particularly sensitive to the skin effect. Therefore, the parameters "r" and "l" vary with frequency, as shown in the study [1]. The skin effect also affects the current "c" that disperses into the ballast. Consequently, the track has a non-constant electrical behavior in terms of frequency. This natural frequency-dependent behavior complicates the application of model (1) since there is no longer uniqueness in the values assigned to "r", "l", and "c".

For a treatment that prioritizes the quantitative aspect over the qualitative one, it is possible to simulate the different behavior of the track in frequency by applying the principle of superposition of effects. This is possible when the system is linear or linearizable around the operating point. The main operating points of a TC, once calibrated, are those of free and occupied states, considering variations in ballast humidity, network voltage fluctuations, and the shunt resistance value. Linearizing the system each time, excluding transformer and CI saturation phenomena, falls within the general applicability of the method. Fig. 41 illustrates the method applied in the case of a dual-track circuit with two injected components of traction current (one at frequency  $f_0$  and the other at frequency  $f_3$ ) and two useful signals from the TC (one at frequency  $f_1$  and the other at frequency  $f_2$ ). The signal  $S(t)$  represents a generic signal to be analyzed as a linear combination of four contributions due to the four different sources.

It's important to set the parameters of the four sub-models at different frequencies. Care must be taken to consider the different frequency behaviors of all TC components (transformers, CI, resistors, etc.), paying special attention to the consequences of the skin effect on these.

However, an additional specific precaution is necessary for the issue of track circuits. It involves applying the superposition of effects only to the continuous-time part of the model. In other words, it is necessary to reconstruct the overall signals before they are processed by the electronic track devices for the logical operations performed by them. Failure to do so would lead to an absurdity. For example, if you want to simulate the superposition of a traction disturbance with a 50 Hz TC signal, you would get two separate REDI devices that provide separate and independent free/occupied outputs—one due to the traction disturbance and the other due to the TC signal. Fig. 42 shows the REDI and RDS+RTU devices reorganized for multifrequency analysis (specifically for two different frequencies) compared to the analyses conducted in Sections 2.1.5e and 3.1.5. In this case, the models contain only discrete-time blocks for signal processing, while the rail impedances are outside and represent the loads of the sub-models in Fig. 41.

An important limitation of the introduced method is related to transients that occur from one steady state to another (e.g., transition from free to occupied). Such transients result from the superposition of aperiodic motions for which the electrical behavior of the rail is unknown. However, this factor is not limiting since, generally, rail circuit analyses focus on steady-state conditions. For transients, the most interesting aspect is the maximum peak reached rather than the trend, and the former is generally limited by components outside the track (e.g., regulating resistors, etc.).

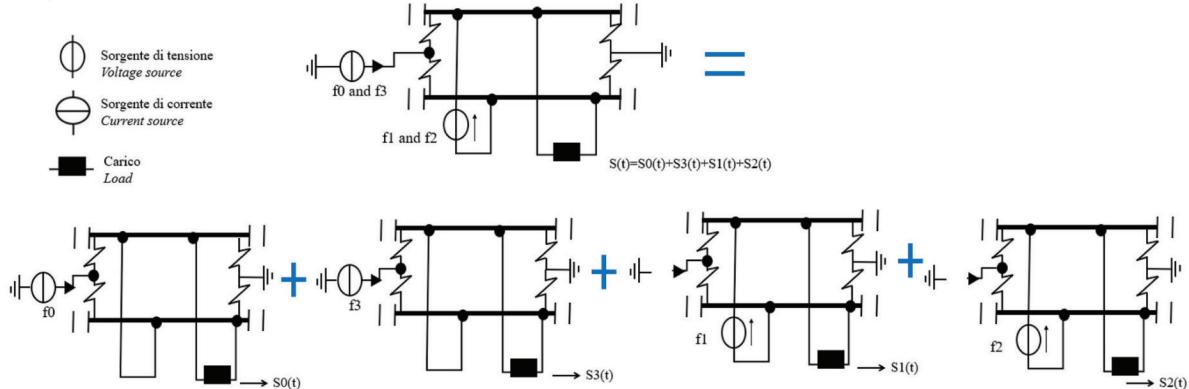


Figura 41 - Metodo multifrequenza.  
Figure 41 - Multi-frequency method.

trasmissione del segnale a 83,3 Hz e viene iniettato un codice con portante a 178 Hz e interrotto 420 volte al minuto (codice Infill). Nei due modelli di Fig. 43 alle due diverse frequenze non si è di volta in volta cortocircuitato l'altro generatore di tensione in quanto l'applicazione in esame ha la particolarità di alternare la trasmissione dei due segnali al binario dal punto di vista temporale (si passa dal segnale 83,3 Hz a quello a 178 Hz con l'occupazione di primo asse del CdB).

In Fig. 44 sono riportati i risultati di (in ordine dall'alto verso il basso) corrente iniettata nel binario lato alimentazione, tensione di campagna sul REDI, corrente d'asse con uno shunt in ricezione di 0,8 Ω e output del REDI. Da notarsi il cambio di fase della legge PSK all'istante indicato dal segmento in tratto viola. Dalla figura si evince che per i primi 0,4 s il segnale al binario è quello a 83,3 Hz con PSK, a 0,3 s avviene l'occupazione e l'uscita del REDI diventa bassa. All'istante 0,4 s cessa il segnale a 83,3 Hz e in contemporanea inizia la trasmissione di quello a 178 Hz codificato.

La trattazione qui svolta per singolo CdB è ovviamente generalizzabile al caso di più CdB con ovvio aumento della laboriosità e dei tempi di simulazione.

### 7. Modellistica e simulazione dei CdB in audiofrequenza tradizionali

Storicamente vengono utilizzati circuiti in audio frequenza in ambito PL o in generale ove vi è la necessità di sovrapporre un CdB ad uno a bassa frequenza esistente (se si escludono i

Finally, Fig. 43 shows the application of the method for a dual-track circuit at 83.3 Hz with PSK modulation. Upon occupation, the transmission of the 83.3 Hz signal is disabled, and a code with a carrier at 178 Hz, interrupted 420 times per minute (Infill code), is injected. In the two models in Fig. 43 at the two different frequencies, the other voltage generator is not short-circuited each time since the application alternates the transmission of the two signals to the track in terms of time (switching from the 83.3 Hz signal to the 178 Hz signal with the occupation of the first axle of the TC). Fig. 44 shows the results of (from top to bottom) the injected current in the power supply side rail, the field voltage on the REDI, the axle current with a receiving shunt

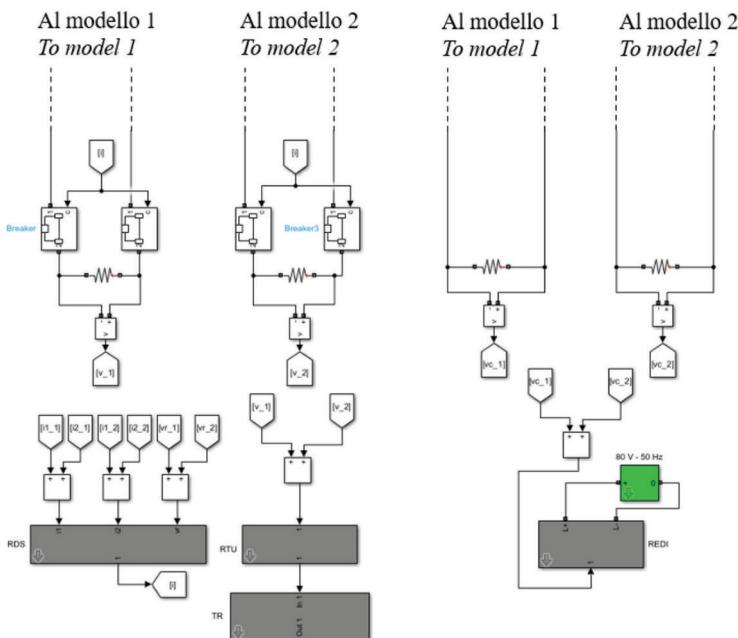


Figura 42 - Modello multifrequenza dei ricevitori.  
Figure 42 - Multi-frequency model of the receivers.

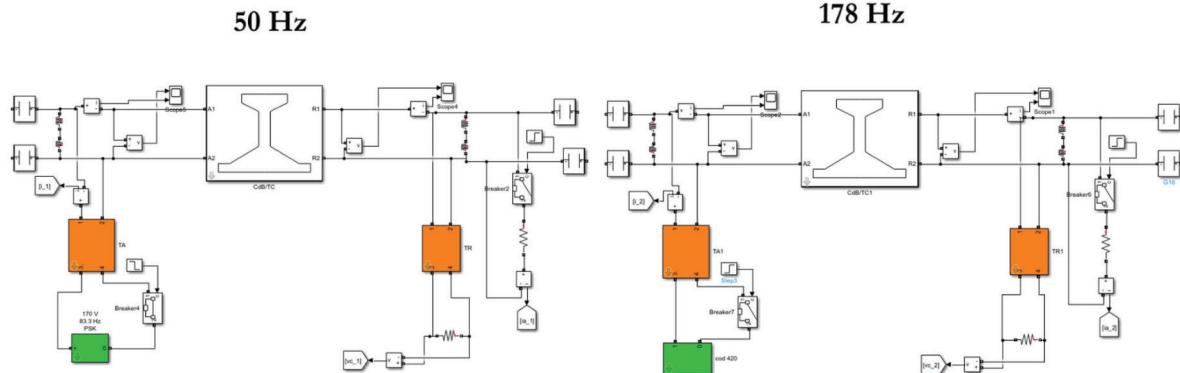


Figura 43 - Simulazione multifrequenza.  
Figure 43 - Multi-frequency simulation.

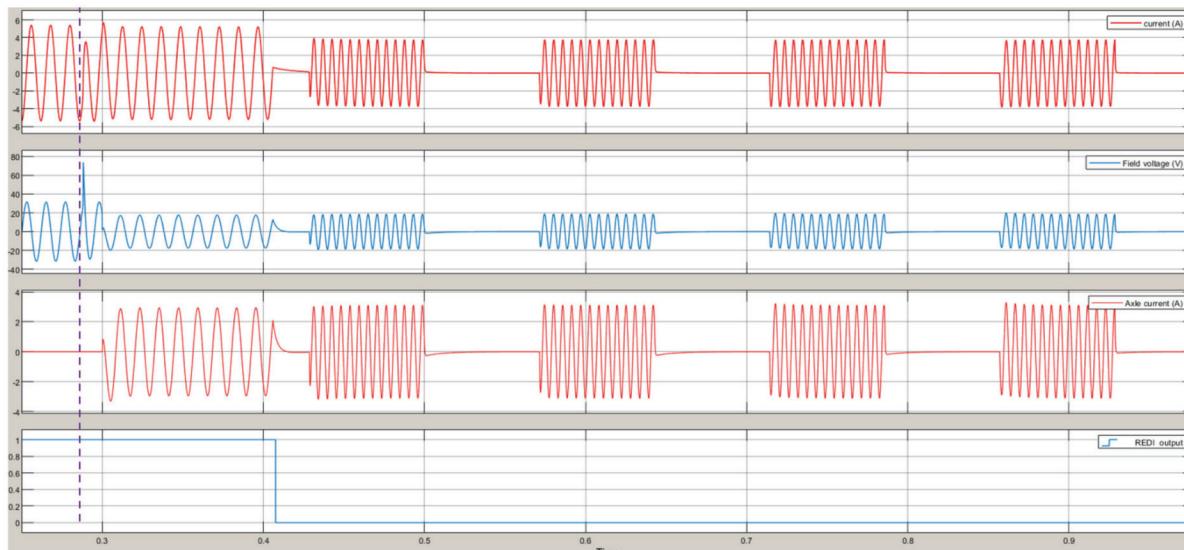


Figura 44 - Risultati simulazione multifrequenza.  
Figure 44 - Multi-frequency simulation results.

CdB in audiofrequenza di Classe A utilizzati in contesti ERTMS/ETCS).

La modellazione di questi, oltre a prevedere diversi modelli per gli stadi TX e RX che gestiscono un opportuno segnale in audiofrequenza con modulazione *frequency-shift keying* (FSK) vede una sola differenza nella modellazione del binario ed è quella del ricorso ai parametri concentrati. Infatti dato che le frequenze variano da 1,6 kHz a 34 kHz (per i casi di CdB di Classe B) la lunghezza d'onda varierà rispettivamente tra 187 km e 8 km. Pertanto la modellizzazione del binario andrà effettuata con un gran numero di celle sempre di minor lunghezza via via che si sale in frequenza. Si raggiunge facilmente l'ordine di grandezza di una cella per una decina di metri, talvolta potrebbe risultare vantaggioso, in relazione al numero

of  $0.8\Omega$ , and the REDI output. Note the phase change of the PSK law at the instant indicated by the purple segment. The figure shows that for the first 0.4 s, the signal to the track is at 83.3 Hz with PSK, at 0.3 s, the occupation occurs, and the REDI output becomes low. At 0.4 s, the 83.3 Hz signal ceases, and simultaneously, the transmission of the 178 Hz coded signal begins.

The treatment carried out for a single TC is, of course, generalizable to the case of multiple TCs, with an obvious increase in labor and simulation times.

### 7. Modeling and Simulation of Traditional Audio Frequency TCs

Historically, audio frequency circuits are used in the PL domain or in general where there is a need to overlap a TC in

e/o all'estensione dei CdB da simulare, utilizzare blocchi a parametri distribuiti per una più rapida costruzione del modello a fronte di un maggior tempo di simulazione, tuttavia in tal caso si perde la possibilità di visualizzare le grandezze elettriche all'interno dei blocchi distribuiti. Si sceglie l'una o l'altra possibilità a seconda dei casi.

Altro fattore da tener presente è che il CdB in audiofrequenza prevede una modulazione FSK e dunque l'alternarsi di due frequenze distanti di un certo delta dalla frequenza portante; di fatto però il delta è sufficientemente contenuto in modo tale che scegliendo di settare i parametri del binario per la sola frequenza portante non si introducono particolari errori.

Nei casi di simulazione in cui si voglia analizzare l'azione contemporanea del segnale in audiofrequenza con uno in bassa frequenza se si applica il metodo di cui al §6 è possibile utilizzare la diversa modellazione del binario per i sotto modelli alle due frequenze a vantaggio di tempo di simulazione.

### 8. Metodo di analisi

Di seguito verrà fornito processo generale da seguire al fine di impostare correttamente la modellazione e dunque simulazione relativa ad un'analisi che coinvolge i CdB.

Il primo passo fondamentale è definire il fenomeno da studiare, comprendere dal punto di vista teorico dunque i possibili legami causa-effetto su cui indagare, fatto ciò bisogna definire il numero e il tipo dei CdB da simulare. Successivamente bisogna scegliere se è utile o meno (in relazione allo scopo della propria analisi) introdurre o meno l'interazione della corrente di trazione. Infine bisogna scegliere se condurre una analisi multifrequenza o no. A questo punto è possibile procedere con la costruzione del foglio di simulazione tenendo presente di impostare correttamente i parametri del modello sulla scelta delle frequenze effettuata (parametri elettrici del binario, valore ohmico delle CI ecc...).

Ultimata la realizzazione del foglio di simulazione vanno eseguite delle simulazioni iniziali allo scopo di tarare i CdB oggetto della analisi, dopodiché si può procedere simulando tutti i vari scenari di interesse (CdB libero, CdB occupato, rottura giunti, squilibri rotaia, caduta di tensione, immunità ai disturbi ecc...) affinando e approntando eventuali migliorie alla modellazione sulla base dei risultati ottenuti.

Quando il processo di miglioramento converge e si ottengono simulazioni con risultati stabili che concordano con i comportamenti previsti dalla teoria si possono ri eseguire le simulazioni per raccogliere i risultati.

### 9. Conclusioni

Nel presente articolo dopo una trattazione generale sulla modellistica del binario, e delle principali apparec-

*an existing low-frequency circuit (excluding Class A audio frequency TCs used in ERTMS/ETCS contexts).*

*The modeling of these circuits, in addition to providing different models for TX and RX stages that manage an appropriate audio frequency signal with Frequency-Shift Keying (FSK) modulation, sees only one difference in the modeling of the track. Since the frequencies range from 1.6 kHz to 34 kHz (for Class B TC cases), the wavelength will vary between 187 km and 8 km, respectively. Therefore, the modeling of the track should be done with a large number of cells, progressively shorter as the frequency increases. It is easy to reach the order of magnitude of a cell for a dozen meters. Sometimes it might be advantageous, depending on the number and/or extent of TCs to be simulated, to use distributed parameter blocks for a quicker model construction at the expense of longer simulation time. However, in such a case, we lose the possibility of visualizing of electrical quantities inside the distributed block. You choose one or the other possibility depending on the cases.*

*Another factor to keep in mind is that the audio frequency TC involves FSK modulation, and therefore, the alternating of two frequencies distant by a certain delta from the carrier frequency. However, the delta is sufficiently small, and choosing to set the parameters of the track for only the carrier frequency does not introduce significant errors.*

*In cases where a simulation is desired to analyze the simultaneous action of an audio frequency signal with a low-frequency one, the method introduced in Section 6 can be applied, using the different track modeling for the sub-models at the two frequencies, to save simulation time.*

### 8. Analysis Method

*Below will provide general process to follow in order to properly set up modeling and therefore simulation related to an analysis involving TCs. The first fundamental step is to define the phenomenon to be studied, understanding theoretically the possible cause-effect relationships to investigate. After that, the number and type of TCs to simulate must be defined. Next, decide whether or not it is useful (in relation to the purpose of the analysis) to introduce the interaction of the traction current. Finally, decide whether to conduct a multifrequency analysis or not. At this point, you can proceed with the construction of the simulation sheet, keeping in mind to correctly set the model parameters based on the chosen frequencies (electrical parameters of the track, CI ohmic value, etc.).*

*Once the simulation sheet is completed, initial simulations should be carried out to calibrate the TCs under analysis. Afterward, simulate all the various scenarios of interest (free TC, occupied TC, joint breakages, rail imbalances, voltage drop, immunity to disturbances, etc.) refining and making any improvements to the model based on the obtained results. When the improvement process converges, and stable simulations with results consistent with the expected behaviors are obtained, the simulations can be rerun to collect the results.*

### 9. Conclusions

*The general process to follow in order to correctly set up the*

## SCIENZA E TECNICA

chiature che compongono il CdB si è proseguito con una serie di casi studi in cui si sono affrontati particolari aspetti della problematica.

La validazione del presente metodo è avvenuta attraverso attività di laboratorio e in campo in diverse attività dal 2020 ad oggi.

Tale metodo si presenta come un utile strumento per lo studioso che deve analizzare uno o più fenomeni di interesse, inoltre può risultare di interesse anche per il progettista IS per il dimensionamento del piazzale in termini di tarature e assorbimenti.

*modeling and therefore simulation relating to an analysis involving TCs will be provided below. In this article, after a general discussion on the modeling of the track and the main equipment that make up the TC, we continued with a series of case studies in which particular aspects of the problem were addressed.*

*The validation of this method took place through laboratory and field activities in various activities from 2020 to today.*

*This method presents itself as a useful tool for the scholar who must analyze one or more phenomena of interest, furthermore it can also be of interest for the IS designer for the sizing of the apron in terms of calibrations and absorptions.*

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ORE A 122 (1973), "Etude des influences parasites sur les circuits de voie".
- [2] ILICETO F. (1981), "Impianti elettrici Vol. I" - Pàtron editore.
- [3] ISASTIA CIMINO V. (2012), "Fondamenti di Macchine Elettriche, appunti dalle lezioni" – Praise Worthy Prize.
- [4] FINZI V. (1996), "Apparecchiature e impianti di sicurezza". Manuale del Ferelettrico. Vol.IV. Parte I – CIFL.
- [5] Ferrovie dello Stato (1958), "Circuiti di binario. Schemi di principi - Servizio Impianti Elettrici".
- [6] Ferrovie dello Stato (1994), "Blocco Automatico a correnti codificate – Procedura per l'esecuzione della regolazione delle apparecchiature di terra e di bordo per la captazione dei codici" - Area Rete, Servizio Impianti Elettrici.
- [7] RIPAMONTI P., DE BONI E., PASSI F. (1982), "Metodo e dispositivo per il riconoscimento del segnale proprio del circuito di binario in presenza di elevate correnti di disturbo: il rilevatore di squilibrio" – Ingegneria Ferroviaria, 1-2, 1982.
- [8] RFI (2019), "RFI DT ST SCCS SR IS 09 058 C. Rivelatore di Squilibrio (RdS)".
- [9] RFI (2016), "RFI DTC ST E SP IFS ES 415 A. Casse induttive per circuiti di binario con due fughe di rotaie isolate".
- [10] PRUSTY S., RAO M.V.S. (1984), "A Novel Approach for Predetermination of Magnetization Characteristics of Transformers Including Hysteresis" - IEEE Transactions on magnetics, Mag-20, n. 4, July 1984.

## La qualità è il nostro viaggio quotidiano.



[www.isoil.it](http://www.isoil.it)

### ISOTRACK

la divisione trasporti di ISOIL Industria SpA offre soluzioni di qualità da oltre vent'anni in ambito ferroviario.

#### LE NOSTRE APPLICAZIONI

- Treni ad Alta Velocità, Regionali e Mezzi d'Opera;
- Trasporto urbano su rotaia (metropolitane e tram) e gomma (autobus);
- Sistemi di sicurezza a bordo dei veicoli fino a SIL4.

#### SERVIZI DI QUALITÀ

- Riparazione qualificata della nostra strumentazione;
- Aggiornamento firmware display;
- Qualifica prodotti per sistemi Ready-to-Use;
- Supporto e consulenze per applicazioni specifiche.

ISOIL Industria s.p.a.  
Cinisello Balsamo - Milano (Italy)  
Via Fratelli Gracchì, 27  
tel. +39 0266027.1 - fax +39 026123202  
[vendite@isoil.it](mailto:vendite@isoil.it)

**ISOIL**  
INDUSTRIA  
Le soluzioni che contano