

## 2 PRINCIPAIS CONCEITOS

### 2.1. Definições básicas

Inicialmente foram feitas algumas considerações básicas para melhor entendimento desta pesquisa. Os autores (Brina, 1982; Medeiros, 1989; Ferreira, 1992; Ferreira, 2001; Leal, 2003) definem alguns elementos fundamentais que compõem o transporte ferroviário.

Entende-se por rota de um trem o conjunto ordenado de trechos que deve percorrer entre os pontos inicial e final da viagem.

O conceito de linha singela é fundamental. Esta é uma linha única, que liga dois pátios adjacentes. É utilizada para circulação de trens nos dois sentidos.

Existem diversos trechos de linha singela em uma mesma rota. Cada trecho é a extensão de uma linha principal única entre duas estações.

Estação é o local de origem, destino, parada ou somente passagem de trens. É o espaço destinado à execução de serviços ligados à operação e circulação de trens. Cada estação possui um pátio, definido como o conjunto de linhas destinadas à circulação, formação, manobra de trens e estacionamento de vagões ou de trens, para a realização de cruzamentos e ultrapassagens. Uma estação possui no mínimo uma linha adicional, ao lado da principal.

Um fator essencial que deve sempre ser levado em consideração é que enquanto um trem ocupa um trecho, nenhum outro trem, poderá entrar neste trecho.

O trecho pode ser dividido em subtrechos, denominados seções de bloqueio, com limites definidos por sinais e detectores de passagem de trem (circuitos de via). Quando existente, define a regra de que só um trem pode ocupar uma seção de bloqueio. Sua utilização é controlada pelo despachador de tráfego, que é a pessoa responsável pelo planejamento, programação e execução da circulação dos trens na malha. Ele é responsável por todas as decisões referentes ao cruzamento de trens. Acompanha continuamente sua posição, transmite as instruções resultantes das decisões sobre cruzamentos, rotas, paradas, etc. O despachador é responsável também por manter a segurança do movimento de trens.

A circulação dos trens é representada através de um gráfico espaço-tempo, onde no eixo das ordenadas estão localizadas as estações e no eixo das abscissas, o tempo (de 0 a 24 horas). Este gráfico é, também utilizado, para visualizar a necessidade de cruzamentos e ultrapassagens.

O conflito é caracterizado quando dois ou mais trens estão prestes a ocupar o mesmo espaço ao mesmo tempo. Podem ser de duas formas: trens viajando em sentido contrário ou no mesmo sentido.

A partir da consideração dos conflitos entre trens, serão escolhidos os pontos de cruzamentos e ultrapassagem e, qual dos dois trens envolvidos no conflito deverá parar. Estas escolhas fazem parte do conjunto de decisões rotineiras da operação ferroviária.

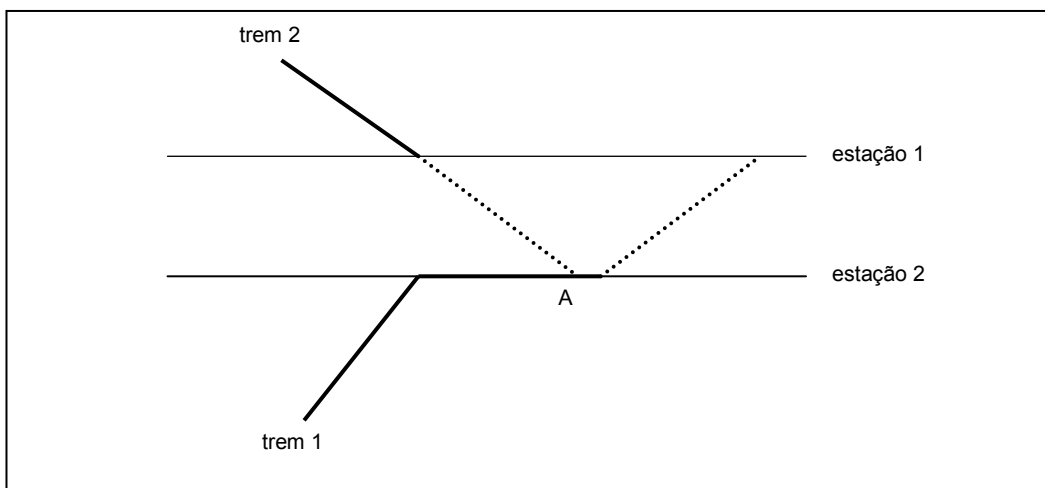


Figura 1: Trens viajando em sentido contrário (cruzamento)

Na figura 1, verifica-se que não é possível o trem 1 e o trem 2 seguirem viagem ao mesmo tempo, pois só há uma via (via singela). Assim, somente um trem poderá seguir viagem. No caso do trem 2 seguir viagem, o trem 1 ficará parado até o tempo A, momento em que o trem 2 chega ao final do trecho. Somente a partir desse momento o trem 1 poderá seguir viagem. Este é um caso de cruzamento entre trens.

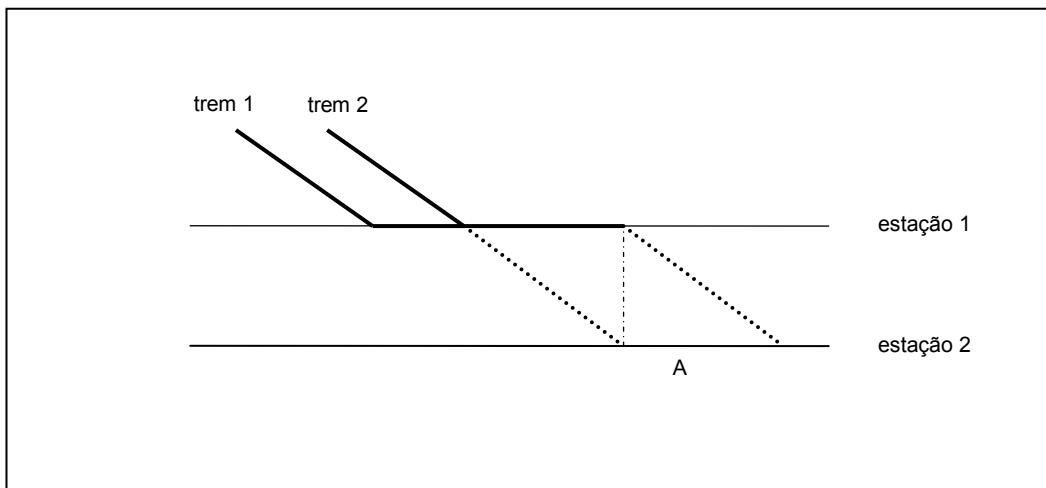


Figura 2: Trens viajando no mesmo sentido (ultrapassagem)

A figura 2 trata de um caso de ultrapassagem entre trens. O trem 1 deverá esperar até o tempo A para que possa seguir viagem. Este será ultrapassado pelo trem 2.

## 2.2.Elementos da viagem do trem

Para a realização dos cálculos de movimento de trens são necessárias algumas definições básicas.

Comprimento dos desvios (L): Segundo Ferreira (1992), o comprimento da linha de cruzamento será a posição quilométrica de um sinal à esquerda menos a posição quilométrica de um sinal à direita da estação.

Comprimento do trem ( $L_t$ ): O meio do trem pode ser definido para representar a sua posição, pois os trens não são pontos, mas um elemento com um certo comprimento, que consome um certo tempo para passar pelos pontos do percurso. (Pottoff, 1976).

Distância de visibilidade ( $L_v$ ): É a distância necessária para o maquinista tomar consciência do estado do sinal, devendo tomar as providências necessárias, tais como: seguir na velocidade atual, acelerar ou desacelerar o trem. Segundo Pottoff (1976) o tempo de reação dos maquinistas é de aproximadamente 15 segundos ou de 200 metros para trens lentos e 500 metros para trens rápidos.

Distância entre o pré-sinal e o sinal principal ( $L_{ps}$ ): O pré-sinal é um sinal secundário, sendo colocado à distância de frenagem do sinal principal. O pré-sinal dá o estado em que o sinal principal se encontra.

Distância entre estações ( $L_s$ ): É a distância entre duas estações.

Distância entre o sinal principal e o circuito da via ( $L_h$ ): Utilizado para detectar a passagem do ponto final do trem.

Tempo de viagem do trem ( $t$ ): Os tempos de viagens são determinados a partir dos históricos elaborados pelas empresas ferroviárias. É o tempo de viagem de uma estação à outra.

Tempo de acionamento do sistema ( $B_b$ ): É o tempo necessário para o CCO bloquear ou desbloquear a via, utilizando o sistema de sinalização.

### 2.3. Programação de trens

Segundo Pachl (2002), as tarefas de programação são determinadas para cada trem de acordo com os dias que eles devem viajar, a rota de cada um, os tempos de chegada e partida nas estações e as velocidades máximas.

A correta construção da programação considera todos os elementos do movimento de trens.

É utilizado um gráfico como base para o planejamento do tráfego ferroviário. Este é também um documento essencial para o controle da operação. O gráfico é representado por um eixo onde constam as estações e outro que contém os tempos (gráfico espaço x tempo).

A programação no tempo de percurso de trens consiste em determinar:

- o tempo de percurso entre paradas programadas;
- o tempo de interrupção das paradas programadas;
- a recuperação do tempo;
- o tempo de espera programado.

O processo de programação de trens pode ser realizado de duas formas: programação manual ou programação realizada pelo computador (Pachl, 2002).

## 2.4.Ocupação de um trecho por um trem

Alguns autores (Pottoff, 1976; Medeiros, 1989; Ferreira,1992), definem as condições de ocupação da via por trem.

A cada momento, somente um trem pode se encontrar em cada seção de bloqueio. Quando um trem ocupa uma linha, fica impedido a outro trem de sentido de tráfego contrário, entrar na linha no mesmo momento.

O sistema CTC (Controle de Tráfego Centralizado) não permite que dois trens que se seguem, como também dois trens que viajam em sentidos opostos, estejam no mesmo subtrecho. Para calcular o tempo é utilizada a equação:

$$t = d/v \quad (1)$$

Onde:  $t$  = tempo;  $d$  = distância e  $v$  = velocidade.

Assim, o tempo total de ocupação ( $T_{oc}$ ) de um trecho por um trem, passando sem parar será:

$$T_{oc} = (Lt/2 + Lv + Lps + Ls + Lh + Lt/2) / V + Bb \quad (2)$$

Onde, as variáveis foram definidas na seção anterior.

A figura abaixo ilustra o tempo de ocupação de uma seção de bloqueio por um trem (eixo x), que corresponde ao somatório de todas as distâncias (eixo y) mais o tempo de acionamento do sistema ( $Bb$ ). Para melhor compreensão da figura 3, é necessário ter clara as definições apresentada na seção 2.2.

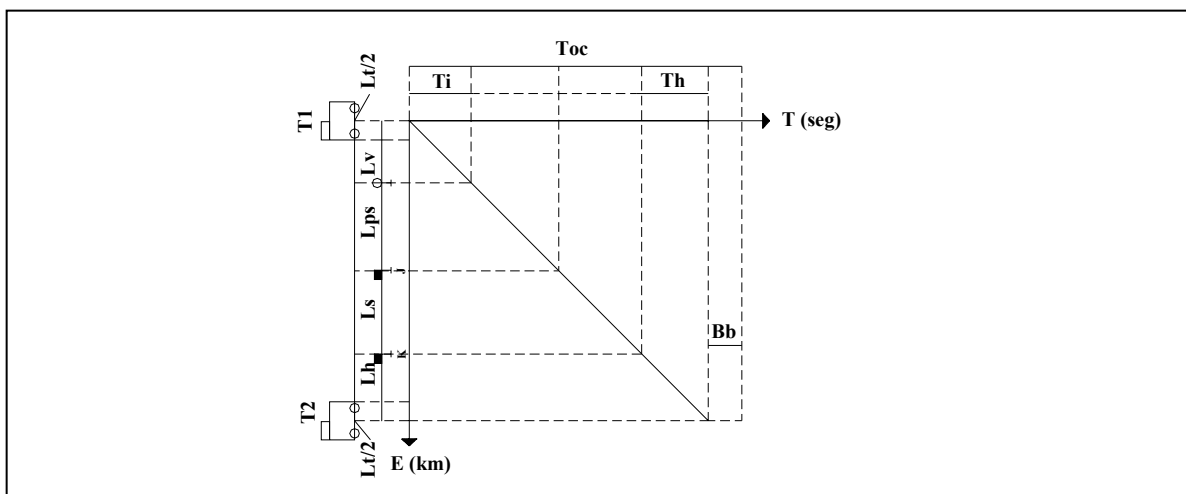


Figura 3: Tempo de ocupação de uma seção de bloqueio por um trem

Fonte: Leal (2002)

Onde:

$T_1$  = trem na partida,

$T_2$  = trem na chegada,

$T_i$  = intervalo de tempo referente à distância de visibilidade,

$T_h$  = intervalo de tempo referente à distância entre o sinal principal e o circuito de via,

E = espaço,

T = tempo.

## 2.5. Intervalo mínimo entre trens

Para Hay (1961), o primeiro fator do controle operacional é prevenir colisões entre veículos. Desta forma, deve haver o cálculo de intervalo mínimo entre trens. Segundo Pottoff (1976), devem ser consideradas três situações para calcular o intervalo mínimo de tempo, que deve separar as partidas de dois ou mais trens de uma estação de origem. São dados dois trens que se seguem, em uma viagem entre as estações A e N. A primeira situação é calculada para seções intermediárias entre A e N. A segunda refere-se à primeira seção do bloqueio, depois da estação de partida. E a terceira é realizada no trecho final. O valor máximo dos intervalos mínimos calculados é aquele que será adotado como “headway mínimo”. Leal (2002) apresenta uma aplicação para demonstrar a abordagem de sequenciamento de trens para problemas reais de tráfego. Esta aplicação considera uma situação de sequenciamento de trens, em que há um intervalo mínimo, sem que necessite a redução de velocidade do segundo trem.



## 2.6. Sequenciamento de trens em trechos completos

Pottoff (1976) apresenta formulações para calcular qual deve ser o intervalo mínimo entre um par de trens em uma certa estação de origem, para que se cumpram os intervalos mínimos nos diversos subtrechos subsequentes. São duas situações típicas: trem de carga seguido de trem rápido e intervalo mínimo na partida e trem rápido seguido de trem de carga e intervalo mínimo na chegada. As formulações propostas por Pottoff (1976) foram generalizadas por Leal (2002), visando calcular o intervalo mínimo para qualquer tipo de pares de trens. A seguir são apresentadas fórmulas gerais para os dois casos de intervalos, para qualquer tipo de seqüência. É necessário que seja definido o tipo de seqüência que pode ser carga-rápido ou rápido-carga.

Para o intervalo mínimo de partida tem-se:

$$C_{IF} = C_{SF} + (t_{11} - t_{12})_{IS} \quad (3)$$

Para o intervalo mínimo de chegada tem-se:

$$C'_{IF} = C_{IS} + (t_{21} - t_{22})_{IF} \quad (4)$$

Onde:

I = estação inicial;

F = estação final;

S = estação do subtrecho correspondente;

$C_{IF}$  e  $C'_{IF}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre as estações inicial "I" e final "F";

$C_{SF}$  = intervalo mínimo de tempo para um subtrecho entre uma estação inicial do subtrecho "S" e a estação final "F";

$C_{IS}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho entre a estação inicial "I" e a estação inicial do subtrecho "S";

$t_{11}$  = instante de partida do trem na estação inicial "I";

$t_{12}$  = instante de chegada do trem na estação inicial do subtrecho "S";

$t_{21}$  = instante de partida do trem na estação inicial "I";

$t_{22}$  = instante de chegada do trem na estação final "F".

A figura 4 ilustra o intervalo mínimo na partida entre um trem de carga e um trem rápido. Inicialmente o trem de carga parte da estação A e, somente após o intervalo mínimo de tempo  $C_{ak}$  é que o trem rápido poderá partir da mesma estação A. Esta situação ocorre para que o trem de carga chegue ao destino K sem perigo de colisão com o trem rápido.

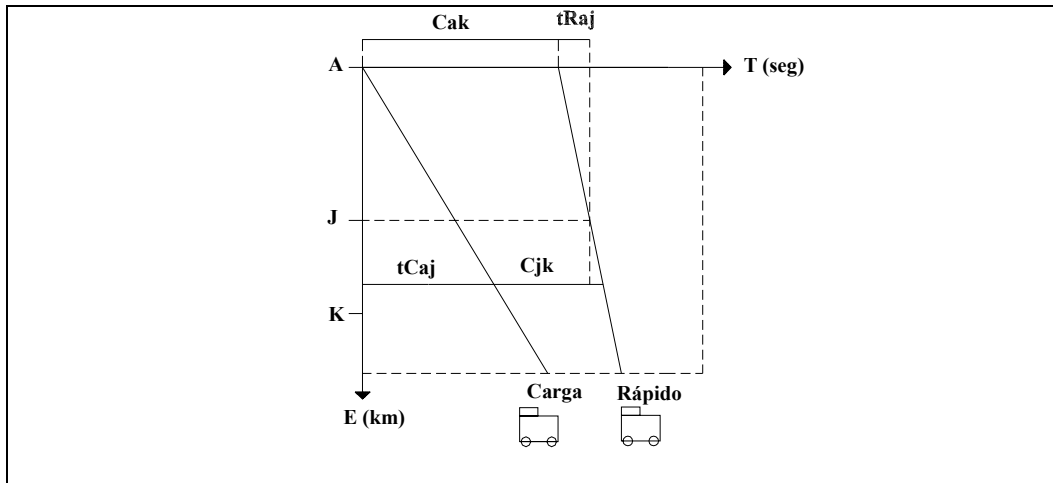


Figura 4: Intervalo mínimo de partida entre trem de carga e trem rápido.

Fonte: Leal (2002)

Onde:

A = estação inicial;

K = estação final;

J = estação do subtrecho correspondente;

$C_{ak}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre as estações inicial "A" e final "K";

$C_{jk}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre uma estação inicial do subtrecho "J" e a estação final "K";

$tR_{aj}$  = intervalo de tempo de partida do trem rápido entre a estação inicial "A" e a estação inicial do subtrecho "J";

$tC_{aj}$  = intervalo de tempo de partida do trem de carga entre a estação inicial "A" e a estação inicial do subtrecho "J".

Na figura 5 é demonstrado o intervalo mínimo de chegada para uma sequência rápido- carga. Inicialmente o trem rápido parte da estação J e, somente após o intervalo mínimo de tempo  $C_{jk}$  é que o trem de carga poderá partir da mesma estação J. Esta situação ocorre para que o trem de carga chegue ao destino K sem perigo de colisão com o trem rápido.

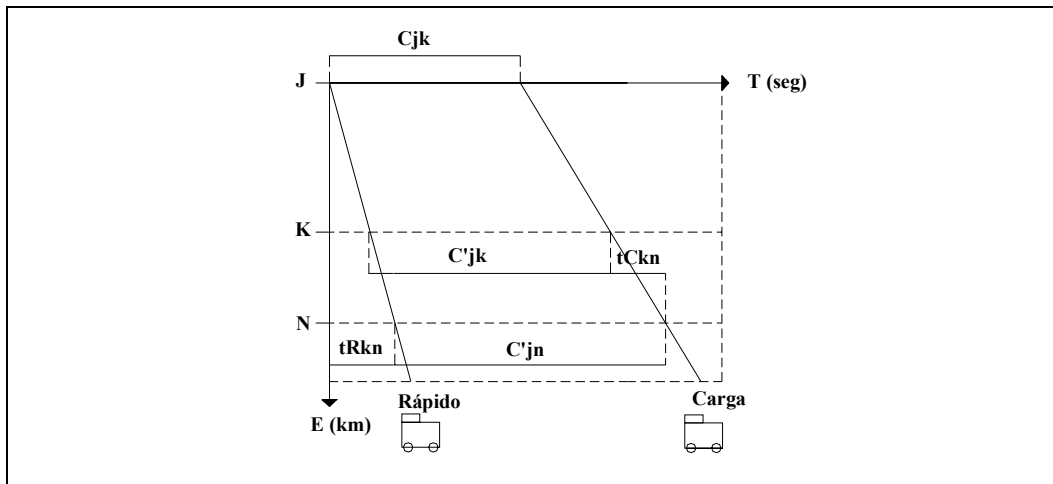


Figura 5: Intervalo mínimo de chegada entre trem rápido e trem de carga.

Fonte: Leal (2002)

Onde:

J = estação inicial;

N = estação final;

K = estação do subtrecho correspondente;

$C_{jk}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre as estações inicial "J" e inicial do subtrecho "K";

$C'_{jk}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre uma estação inicial "J" e a estação inicial do subtrecho "K";

$C'_{jn}$  = intervalo mínimo de tempo para um trecho total entre uma estação inicial "J" e a estação final "N";

$t_{Rkn}$  = intervalo de tempo de partida do trem rápido entre a estação inicial do subtrecho "K" e a estação final "N";

$t_{Ckn}$  = intervalo de tempo de partida do trem de carga entre a estação inicial do subtrecho "K" e a estação final "N".

Leal (2002) apresenta um exemplo de aplicação que será demonstrado a seguir.

Para um trecho total de 40 km, com seis estações A, B,...F, são dados, na tabela 1, as distâncias, os tempos de viagem entre trechos e os seguintes intervalos mínimos de tempo: entre dois trens rápidos, que é igual a um rápido seguido de um de carga ( $C_{RR} = C_{RC}$ ), entre um carga e um rápido ( $C_{CR}$ ), e entre dois trens de carga ( $C_{CC}$ ). Desejam-se calcular os intervalos mínimos de tempo nas estações iniciais, para cada estação de A a E, como estação inicial e para cada estação B a F, como estação final do trecho.

Estação	Dist	Tempo ®	Tempo ©	$C_{RR} = C_{RC}$	$C_{CR}$	$C_{CC}$
	(km)	(min)	(min)	(min)	(min)	(min)
<b>A</b>	10	12	22	6	16	11
<b>B</b>	7,5	6	11	5	10	8
<b>C</b>	9,5	7	12	5	10	8
<b>D</b>	5	4	8	5	9	9
<b>E</b>	8	8	12	6	10	8
<b>F</b>						
<b>Total</b>	40	37	65			

Tabela 1: Valores para o cálculo do intervalo mínimo de tempo

Fonte: Leal (2002)

Seja a aplicação da fórmula 3 para a estação B, como estação inicial do trecho e a estação E, como estação final do trecho. A estação B será a correspondente a I, a estação E, correspondente a F e a estação D, correspondente a S (inicial do subtrecho). Aplicando-se a fórmula 3 a estas estações fica:

$$C_{BE} = C_{DE} + (t_C - t_R)_{BD} \quad (5)$$

Substituindo pelos valores da tabela 1 tem-se:

$$C_{BE} = 9 + (11+12) - (6+7) = 19$$

O resultado da aplicação da fórmula para cada estação de origem e cada estação de destino está mostrada na tabela 2.

<b>I</b>	<b>F</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>A</b>		16	20	25	29	34
<b>B</b>			10	15	<b>19</b>	24
<b>C</b>				10	14	19
<b>D</b>					9	14
<b>E</b>						10

Tabela 2: Resultado do cálculo de intervalos mínimos de tempo.

Fonte: Leal (2002)

Além do problema de sequenciamento é importante tratar das condições de ultrapassagem e cruzamento que são apresentadas na próxima seção.

## 2.7. Análise de condições de ultrapassagem de trens em trecho completo

Potthoff (1976) apresenta uma abordagem para análise de condições de ultrapassagem de trens. Tem-se um trecho com estações de A até N. Em uma estação J intermediária, é realizada uma ultrapassagem de um ou de vários trens rápidos (TR) sobre trens lentos de carga (TC). O primeiro subtrecho entre A e J é chamado de subtrecho 1 e o segundo entre J e N, de subtrecho 2. A malha horária de trens lentos de carga é dada, e para efeito de análise, supõe-se, que os horários são regulares, com trens partindo com intervalos  $Z$  da estação de origem. Nessa malha horária será inserida uma janela de tempo  $r$  para a passagem de trens que ultrapassam os trens que estarão parados em J. O tamanho da janela  $r$ , é definido em função de intervalos mínimos de tempo de chegada e partida de trens na estação J.

Outros parâmetros utilizados são: o número de trens de carga a serem retirados do horário ( $n_{ret}$ ) e o número de trens a serem ultrapassados na seção J ( $n_{ult}$ ). Potthoff (1976) define o esquema de ultrapassagem como  $n_{ret}/n_{ult}$ . Por exemplo, se um trem de carga é retirado do horário e um trem é ultrapassado o esquema é definido como 1/1.

Os 4 intervalos que deverão ser considerados são:

$c'cr_1$  = intervalo mínimo de tempo de chegada em J, entre um trem de carga e um trem rápido no subtrecho 1;

$c'rc_1$  = intervalo mínimo de tempo de chegada em J, entre um trem rápido e um trem de carga no subtrecho 1;

$ccr_2$  = intervalo mínimo de tempo de partida, entre um trem de carga e um trem rápido no subtrecho 2;

$crc_2$  = intervalo mínimo de tempo de partida, entre um trem rápido e um trem de carga no subtrecho 2.

Utilizando estas definições acima, Potthoff (1976) desenvolveu uma fórmula única que dá o tamanho  $r$  de janela de tempo para um esquema  $n_{ret}/n_{ult}$  qualquer, definidos  $n_{ret}$  e  $n_{ult}$  e dados  $c'cr_1$ ,  $c'rc_1$ ,  $ccr_2$  e  $crc_2$ .

O tamanho total do intervalo de tempo disponível para inserir a janela  $r$  é:

$$(n_{ret} - n_{ult} + 1) \times Z \quad (6)$$

O número de trens de carga ultrapassados vai definir quantos intervalos existem entre o último trem de carga que passa sem ser ultrapassado e o início

do intervalo de tempo disponível para inserir a janela. Este é o mesmo número de intervalos que existe entre o final do intervalo total disponível para a inserção da janela e o primeiro trem de carga que passa sem parar depois da ultrapassagem.

O momento mais cedo possível do início da janela é determinado por um dos valores de  $c'cr_1$  ou  $ccr_2$ .

Se  $ccr_2 > c'cr_1 + nult \times Z$ , então o subtrecho 2 vai ser determinante para o momento mais cedo da janela de tempo  $r$ . O intervalo total disponível para a inserção da janela será:

$$[(nret - nult + 1) \times Z] - [(ccr_2 - nult) \times Z] \quad (7)$$

Caso contrário, o valor a ser subtraído é  $c'cr_1$ :

$$[(nret - nult + 1) \times Z] - [(c'cr_1 - nult) \times Z] \quad (8)$$

O momento mais tarde para a janela de tempo é determinado por um dos valores de  $crc_2$  ou  $c'rc_1$ .

Se  $c'rc_1 > crc_2 + nult \times Z$ , então o subtrecho 1 vai ser determinante para o momento mais tarde da janela de tempo  $r$ . O intervalo total disponível para a inserção da janela será:

$$[(nret - nult + 1) \times Z] - [(c'rc_1 - nult) \times Z] \quad (9)$$

Caso contrário, o valor a ser subtraído é  $crc_2$ :

$$[(nret - nult + 1) \times Z] - [(crc_2 - nult) \times Z] \quad (10)$$

Cada ultrapassagem significa um aumento no tempo de viagem do trem mais lento de carga. Por isso o planejamento realizado deve seguir as regras citadas acima, para que não haja acréscimo de tempo desnecessário.

Neste capítulo foram tratados alguns conceitos introdutórios de operação ferroviária. Definiram-se diversos elementos utilizados neste estudo, bem como, analisaram-se algumas teorias de programação, ocupação do trecho, intervalos mínimos, sequenciamento e ultrapassagem de trens.