

## Metrô de Recife

# Estudo de Simulação do Sistema Elétrico

## 1 Resumo

### 1.1 Pré-condições

O sistema de alimentação elétrica do Metrô Recife (Metrorec) foi estudado por meio de uma simulação de trens, incluindo cálculos de rede elétrica usando o programa de simulação Sitras® Sidytrac.

A investigação do sistema de alimentação elétrica do Metrô Recife é baseada em algumas premissas adotadas para grandezas importantes do sistema. Os valores adotados são gerados com a experiência do Departamento de Eletrificação Ferroviária da Siemens. As hipóteses foram levantadas de forma que as condições representem uma situação "conservadora" do sistema de alimentação elétrica do Metrô Recife, porém não irreal.

Os resultados mostram que os dados das linhas operando separadamente e como uma rede única são quase os mesmos. Os resultados das linhas separadas são melhores do que os valores para as linhas eletricamente combinadas.

Assim, a avaliação a seguir é feita para a rede completa (linhas combinadas).

### 1.2 Avaliação

Os resultados demonstram que a tensão mínima de alimentação é 2.587 V em caso de uma operação normal e 2.156 V no pior caso de interrupção. Permanece acima das exigências mínimas de 2.100 V.

De acordo com a Norma Internacional IEC 62128-1, o potencial dos trilhos não deve ser maior que uma tensão contínua de 120 V. Durante menos de 300 segundos, o limite é 150 V e aumenta para 170 V durante 1 segundo.

O potencial máximo dos trilhos durante uma operação normal é 115 V e, no pior caso de interrupção, é 133 V; esse potencial atende ao requisito de acordo com a IEC 62128-1.

A demanda máxima de energia RMS de 900 s para um transformador é 1.691 kVA em SSR SHO em caso de uma operação normal e 2.831 kVA em SSR SHO no pior caso de interrupção de CAJ e, portanto, sempre abaixo da potência nominal de 3.000 kVA de um transformador.

## Índice

<b>1</b>	<b>Resumo.....</b>	<b>2</b>
1.1	Pré-condições .....	2
1.2	Avaliação .....	2
<b>2</b>	<b>Geral.....</b>	<b>4</b>
2.1	Lista de Revisões.....	4
2.2	Definições.....	4
<b>3</b>	<b>Pré-condições .....</b>	<b>5</b>
3.1	Geral.....	5
3.2	Alinhamento .....	5
3.3	Headways (Intervalo entre trens) .....	11
3.4	Dados elétricos .....	17
3.5	Dados dos trens .....	23
<b>4</b>	<b>Cálculos .....</b>	<b>26</b>
4.1	Programa de simulação SITRAS® SIDYTRAC.....	26
<b>5</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>27</b>
5.1	Resultados para as Linhas Centro e Sul eletricamente acopladas .....	27
5.2	Resultados para a Linha Centro eletricamente separada .....	38
5.3	Resultados para a Linha Sul eletricamente separada .....	40
<b>6</b>	<b>Avaliação .....</b>	<b>42</b>
6.1	Geral.....	42
6.2	Avaliação dos resultados .....	42
<b>7</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>45</b>
7.1	Considerações .....	45
7.2	Indicação de ações baseada nos resultados .....	45

## 2 Geral

### 2.1 Lista de Revisões

*A última revisão substitui todas as versões anteriores!*

Revisão: 1

Data de alteração: 24/05/2017

Motivo: Complementação da análise do sistema e dos resultados

Modificações: Indicações de melhoria com base em documentos de referência adicionais

### 2.2 Definições

Os delimitadores decimais e os separadores de milhar neste estudo foram utilizados de acordo com IEC 60027-1:

Sinal	Exemplo	Descrição	Significado
','	12,3	Vírgula	Delimitador decimal
','	12.345	Ponto	Separador de milhar

**Tabela 2-1: Definições**

Os dados básicos foram tirados dos documentos a seguir:

Abreviação	Referência	Título
DC-RD01	Dados de entrada	ENTP-Tender_BSV (Simulação de carga) CBTU METROREC 24.01.2017.doc EDB068_Metrorec_dc_en.doc
DC-RD02	Rede elétrica	Todos os diagramas unifilares: ESQUEMA UNIFILAR DE REDE AÉREA – METROREC DIVISÃO POR REGIÕES ELÉTRICAS – LINHAS CENTRO E SUL
DC-RD03	Transformador GEC	Foto da placa – Transformador GEC
DC-RD04	Transformador WEG	Foto da placa – Transformador WEG
DC-RD05	Transformador WEG	Datasheet_30058844_3300kVA_WEG
DC-RD06	Dados de via SUL	0-All_In_1_As built Linha sul METROREC
DC-RD07	Dados de via CENTRO	G072B Plano de Via Linha Centro-REV 8-1_2-REC-JAB-1.74m
DC-RD08	Dados de via CENTRO	G072B Plano de Via Linha Centro-REV 8-2_2-COQ-GIB-1.20m
DC-RD09	Dados sobre trens	04 _ TUE Frota CAF _ Curvas _ Esforços de Tracao e Frenagem X Velocidade
DC-RD10	Dados sobre trens	Curvas enviadas no e-mail “Fwd: CONTRATO 017-10/DT - DADOS DE PROJETO”, de 08/03/2017 às 14h21
DC-RD11	Dados de proteções do sistema elétrico	Carta enviada no e-mail “Questionamentos Simulação Elétrica Metrô do Recife”, de 05/05/2017 às 15h10
DC-RD12	Disjuntor 3kVcc/2000A	Manual B-5204650252 <sup>a</sup> – CGEE Alsthom

**Tabela 2-2: Documentos de referência**

### 3 Pré-condições

#### 3.1 Geral

O parágrafo a seguir resume os dados de entrada essenciais para o cálculo da rede elétrica e da operação simulada.

Observe que todos os resultados neste estudo são baseados nessas pré-condições. Portanto, os resultados deste estudo são válidos somente para as pré-condições mencionadas abaixo.

Os principais dados de desempenho de um sistema de Metrô são a capacidade de transporte de passageiros por linha e por direção em certo tempo.

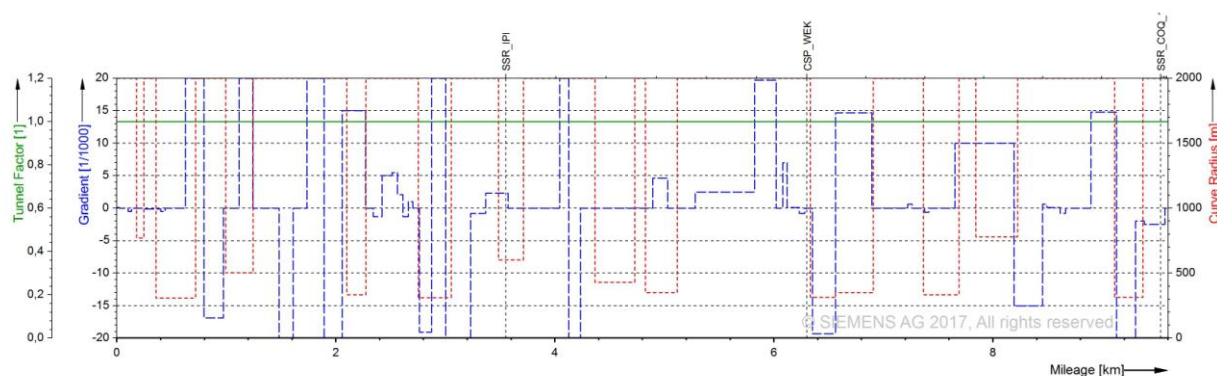
Esses dados de desempenho principais conduzem à capacidade de carga do trem e a frequência de direção de um trem em uma correlação fixa. Tais dados são valores de entrada importantes para a simulação elétrica do sistema de tração.

A simulação de tração pode calcular valores relacionados à realidade apenas caso o sistema real com todos os dados de entrada principais for implementado. O número de premissas, especialmente em relação aos dados principais do sistema, deve ser minimizado.

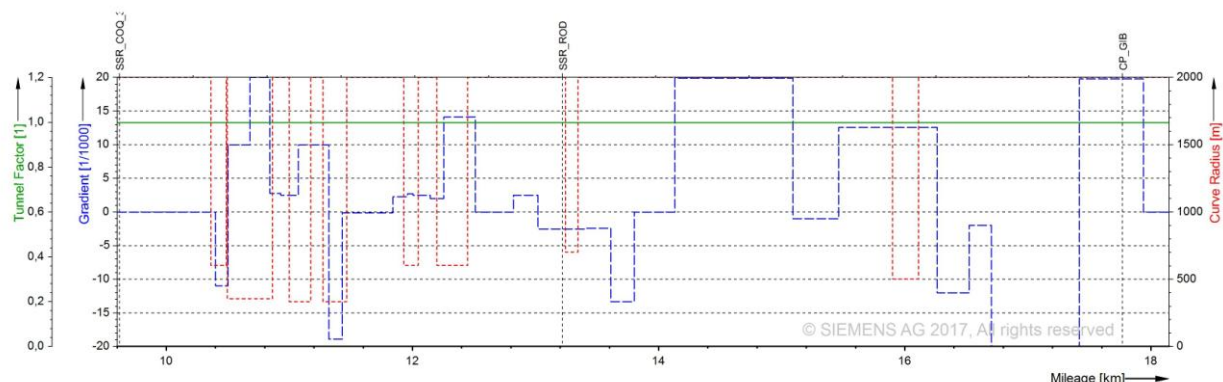
As premissas adotadas para completar os dados de entrada foram feitas com base no histórico e na experiência do departamento de eletrificação ferroviária da Siemens.

#### 3.2 Alinhamento

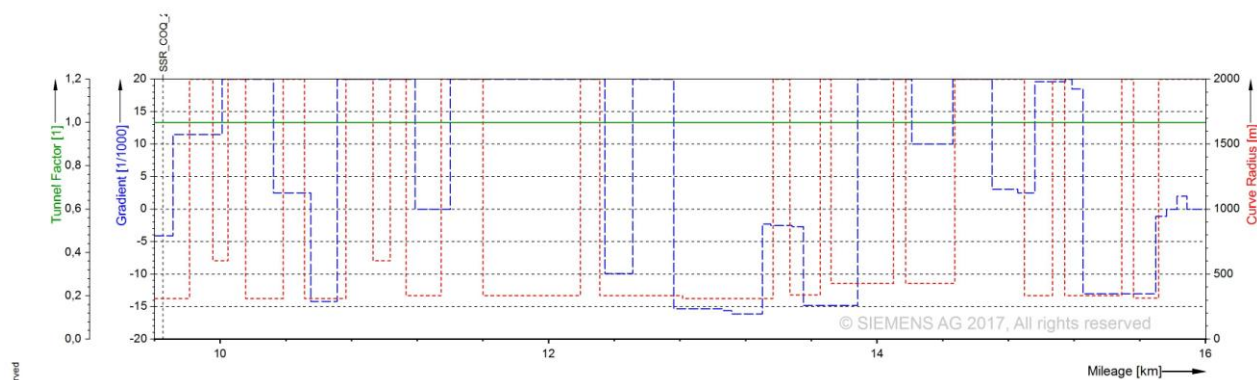
Os gráficos a seguir oferecem uma visão geral dos gradientes (azul na 1ª figura), raios de curva (vermelho na 1ª figura), fator de tunelização (verde na 1ª figura), limite de velocidade (verde na 2ª figura) e perfil de altura (azul na 2ª figura):



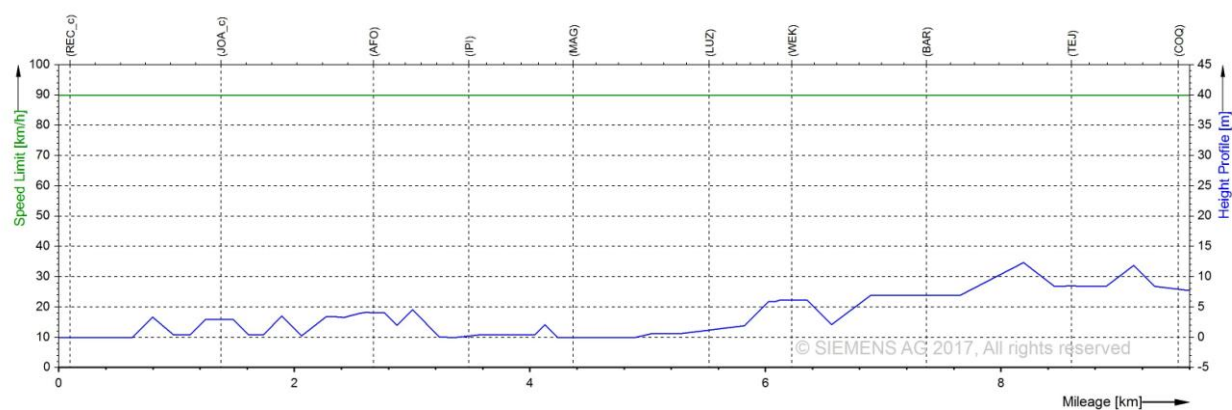
**Figura 3-1: Gradientes, raios de curva e fator de tunelização versus via (PK), para a Linha Centro, de Recife Centro até Coqueiral**



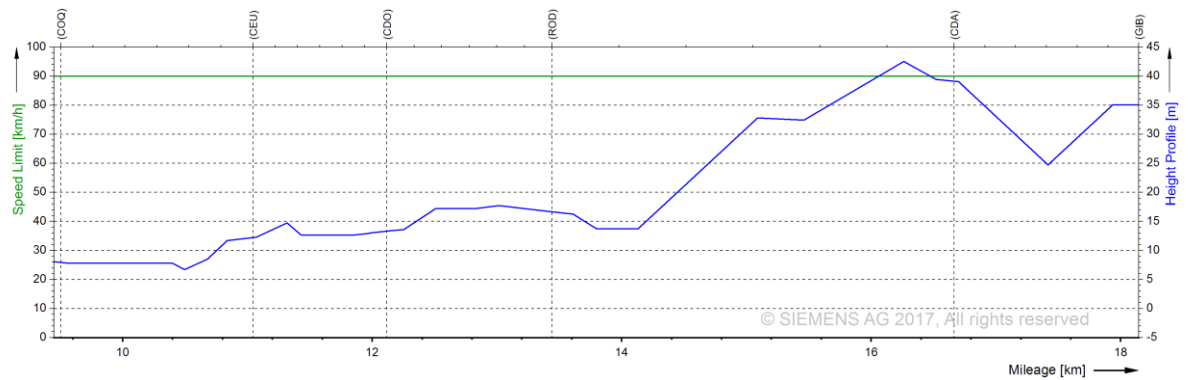
**Figura 3-2: Gradientes, raios de curva e fator de tunelização versus via (PK), para a Linha Centro, de Coqueiral até Camaragibe**



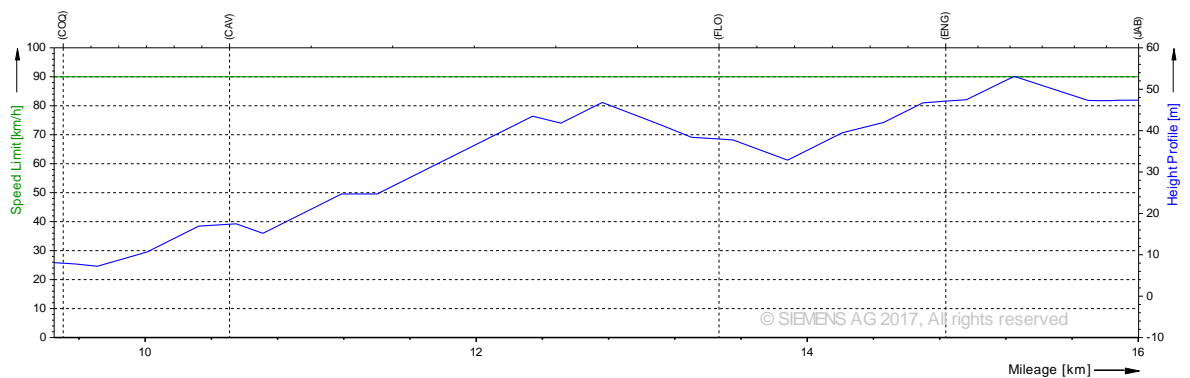
**Figura 3-3: Gradientes, raios de curva e fator de tunelização versus via (PK), para a Linha Centro, de Coqueiral até Jaboatão**



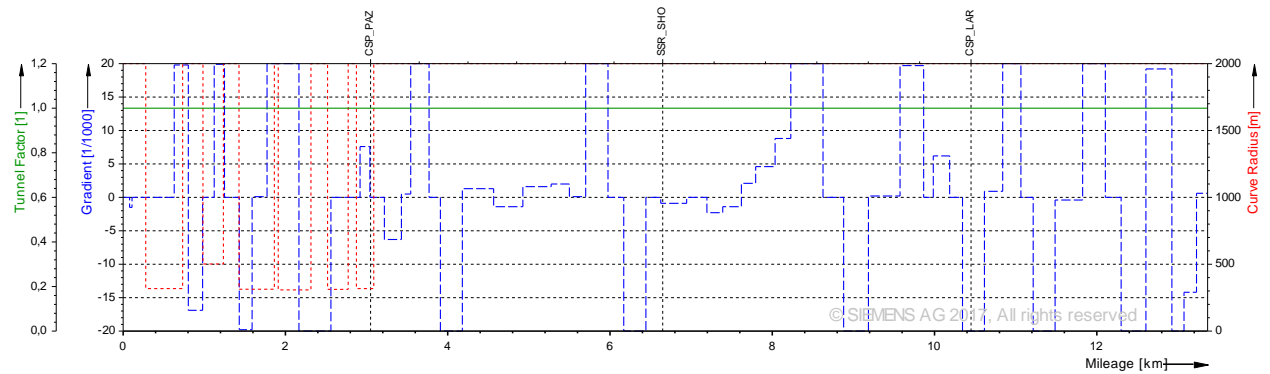
**Figura 3-4: Limite de velocidade e perfil de altura versus via (PK), para a Linha Centro, de Recife Centro até Coqueiral**



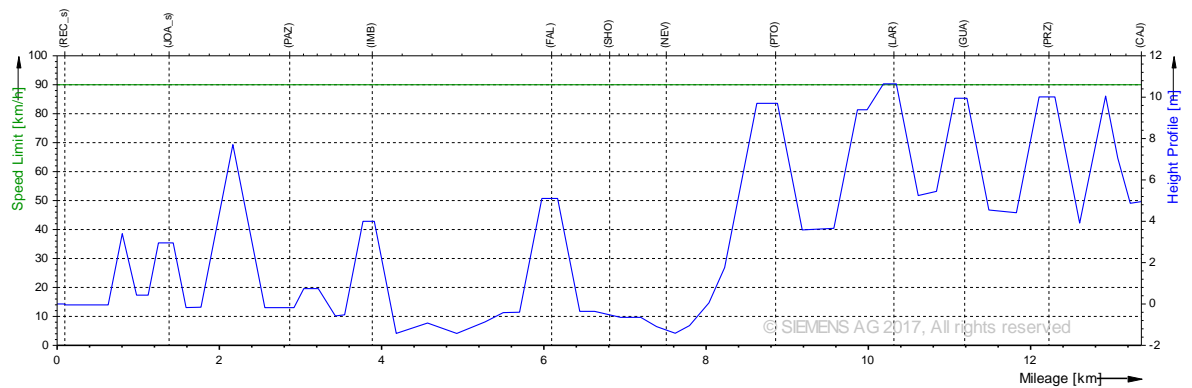
**Figura 3-5: Limite de velocidade e perfil de altura versus via (PK), para a Linha Centro, de Coqueiral até Camaragibe**



**Figura 3-6: Limite de velocidade e perfil de altura versus via (PK), para a Linha Centro, de Coqueiral até Jaboatão**



**Figura 3-7: Gradientes, raios de curva e fator de tunelização versus via (PK), para a Linha Sul, de Recife Sul até Cajueiro Seco**



**Figura 3-8: Limite de velocidade e perfil de altura versus via (PK), para a Linha Sul, de Recife Sul até Cajueiro Seco**



As tabelas abaixo oferecem uma visão geral dos nomes e posições das estações na Linha Centro e na Linha Sul de acordo com RD06, RD07, RD08.

A tabela a seguir mostra as posições das estações na Linha Centro de Recife Centro para Jaboatão via Coqueiral:

Nome da estação	Nome abreviado	Posição em km
Recife (Centro)	(REC_c)	0,346
Joana Bezerra (Centro)	(JOA_c)	1,627
Afogados	(AFO)	2,921
Ipiranga	(IPI)	3,733
Mangueira	(MAG)	4,618
Santa Luzia	(LUZ)	5,773
Werneck	(WEK)	6,475
Barro	(BAR)	7,617
Tejipió	(TEJ)	8,850
Coqueiral	(COQ)	9,756
Cavaleiro	(CAV)	10,761
Florianópolis	(FLO)	13,718
Engenho Velho	(ENG)	15,088
Jaboatão	(JAB)	16,253

**Tabela 3-1: Posições das estações na Linha Centro de REC para JAB via COQ**

A tabela a seguir mostra as posições das estações na Linha Centro de Alto do Céu para Camaragibe iniciando em Coqueiral:

Nome da estação	Nome abreviado	Posição em km
Alto do Céu	(CEU)	1,428
Curado	(CDO)	2,502
Rodoviária	(ROD)	3,825
Cosme e Damião	(CDA)	7,050
Camaragibe	(GIB)	8,530

**Tabela 3-2: Posições das estações na Linha Centro de CEU para GIB iniciando em COQ**

A tabela a seguir mostra as posições das estações na Linha Sul de Recife Sul para Cajueiro Seco:

Nome da estação	Nome abreviado	Posição em km
Recife (Sul)	(REC_s)	0,098
Joana Bezerra (Sul)	(JOA_s)	1,383
Largo da Paz	(PAZ)	2,870
Imbiribeira	(IMB)	3,888
Antônio Falcão	(FAL)	6,099
Shopping	(SHO)	6,814
Tancredo Neves	(NEV)	7,512
Aeroporto	(PTO)	8,860
Porta Larga	(LAR)	10,318
Monte dos Guararapes	(GUA)	11,190
Prazeres	(PRZ)	12,229
Cajueiro Seco	(CAJ)	13,368

**Tabela 3-3: Posições das estações na Linha Sul de REC para CAJ**

### 3.3 Headways (Intervalo entre trens)

Para conseguir se assumir um headway, foi realizado o estudo a seguir. O modelo de simulação da linha e do trem é utilizado para se calcular o tempo de volta completa de um trem (missão) para que seja possível se assumir o headway das linhas Sul e Centro.

Tempo para uma volta completa em uma linha de trem (tempo que um trem precisa para estar novamente em seu ponto inicial):

Linha Centro (REC – COQ – JAB – COQ – REC ou REC – COQ – GIB – COQ – REC): 60 min

Linha Sul (REC – CAJ – REC): 45 min

Os headways definidos (tempo entre dois trens) são conforme a seguir:

#### Linha Centro:

*headway de 2017: 16 trens na linha => Headway de 3,75 min. (225 s) (REC – COQ) / (divisão nas ramificações COQ – GIB e COQ – JAB => (450 s))*

*headway de 2020: 17 trens na linha => Headway de 3,5 min. (210 s) (REC – COQ) / (divisão nas ramificações COQ – GIB e COQ – JAB => (420 s))*

*headway de 2025: 20 trens na linha (exibido como cronograma gráfico) => Headway de 3 min. (180 s) (REC – COQ) (Figura 3-9) / (divisão nas ramificações COQ – GIB (consulte Figura 3-10) e COQ – JAB (consulte Figura 3-11) => (360 s)) => headway mínimo → **utilizado para simulação***

#### Linha Sul:

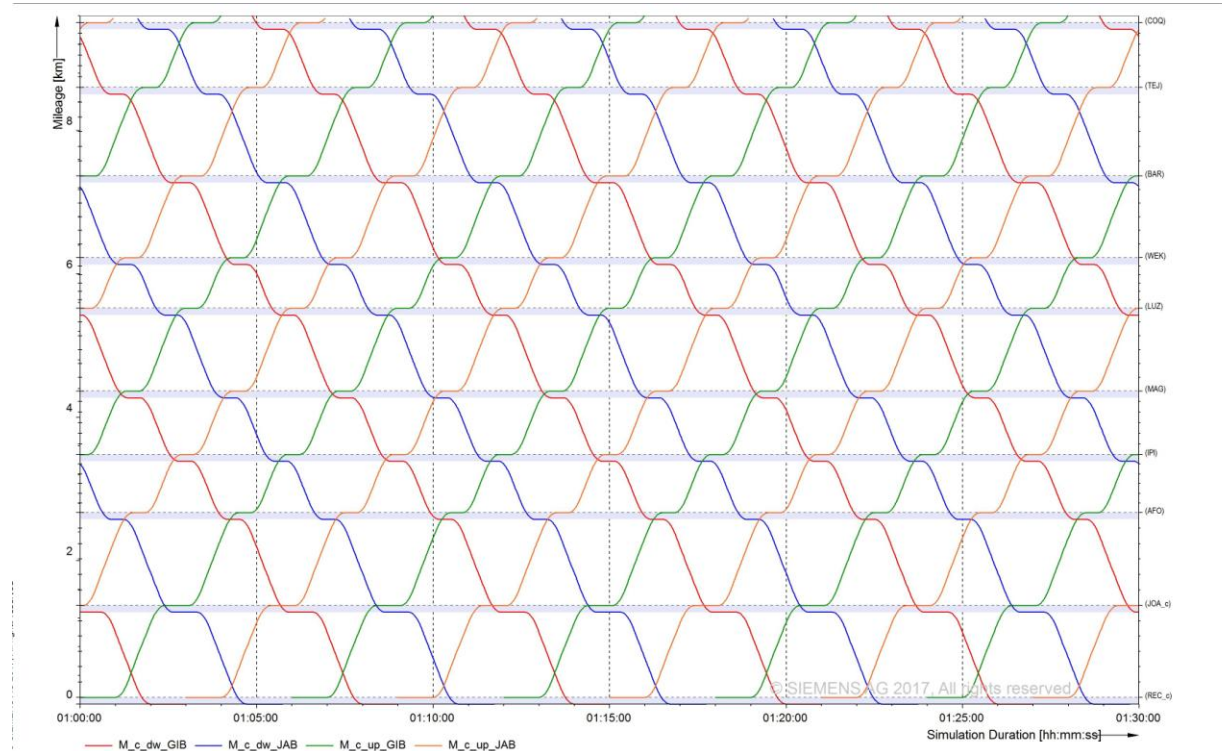
*headway de 2017: 9 trens na linha => Headway de 5 min. (300 s) (REC – CAJ)*

*headway de 2020: 12 trens na linha => Headway de 3,75 min. (225 s) (REC – CAJ)*

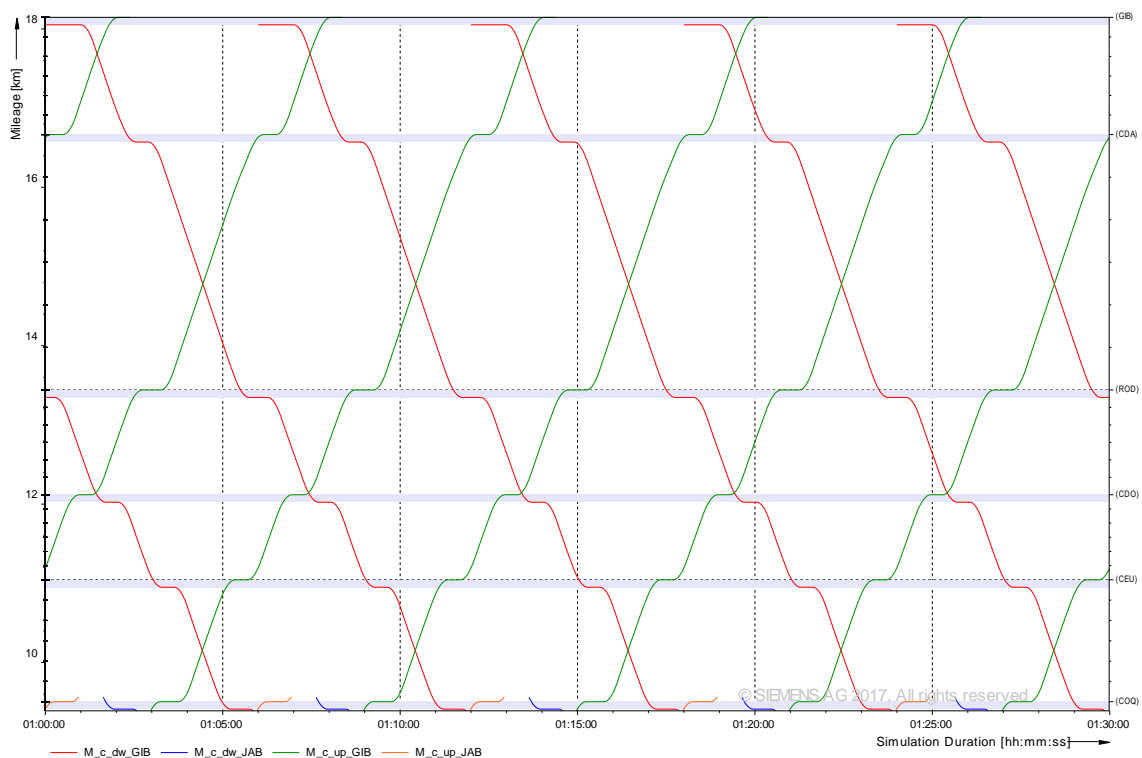
*headway de 2025: 15 trens na linha (exibido como cronograma gráfico) => Headway de 3 min. (180 s) (REC – CAJ) (consulte Figura 3-12) => headway mínimo → **utilizado para simulação***

O headway utilizado para simulação representa o "pior caso"/headway mínimo. Esse headway mínimo é utilizado para uma simulação que consegue avaliar a capacidade do sistema elétrico de tração do Metrô Recife.

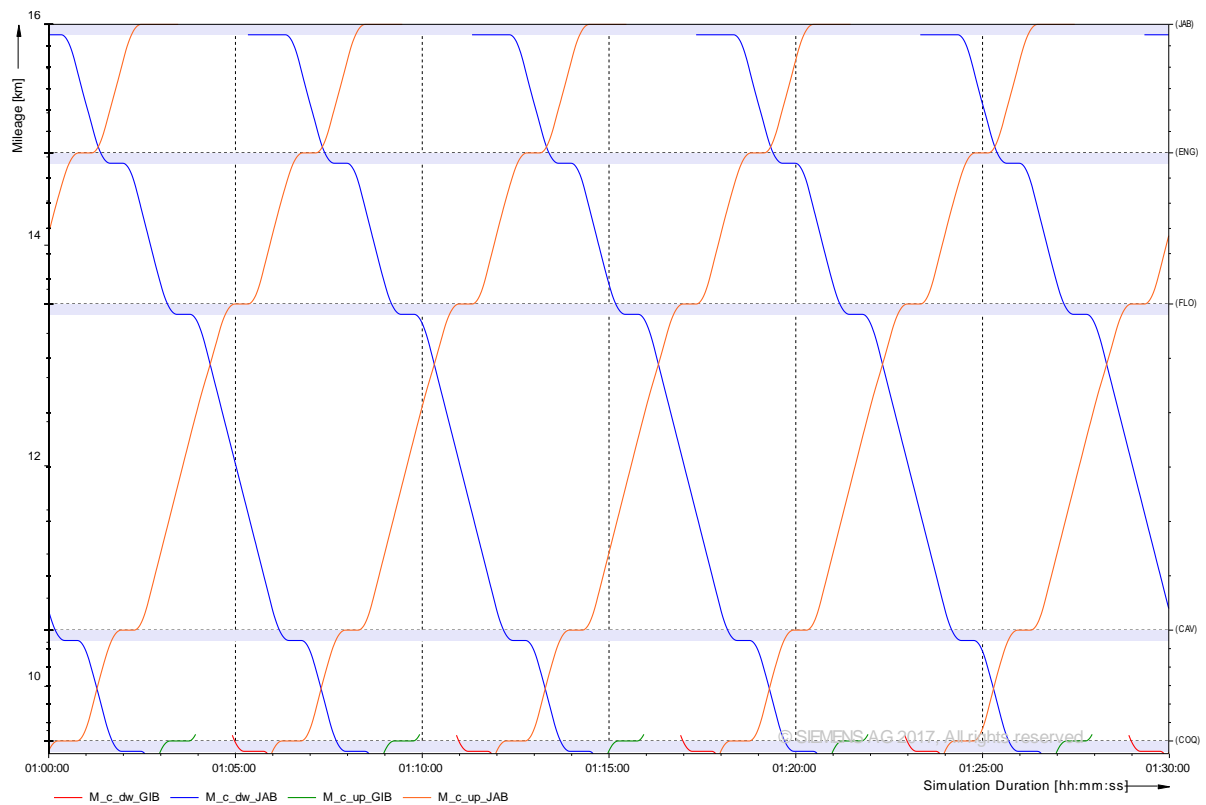
As figuras a seguir mostram o cronograma gráfico da Linha Centro e da Linha Sul para o headway do ano 2025 (headway mínimo) conforme definido acima:



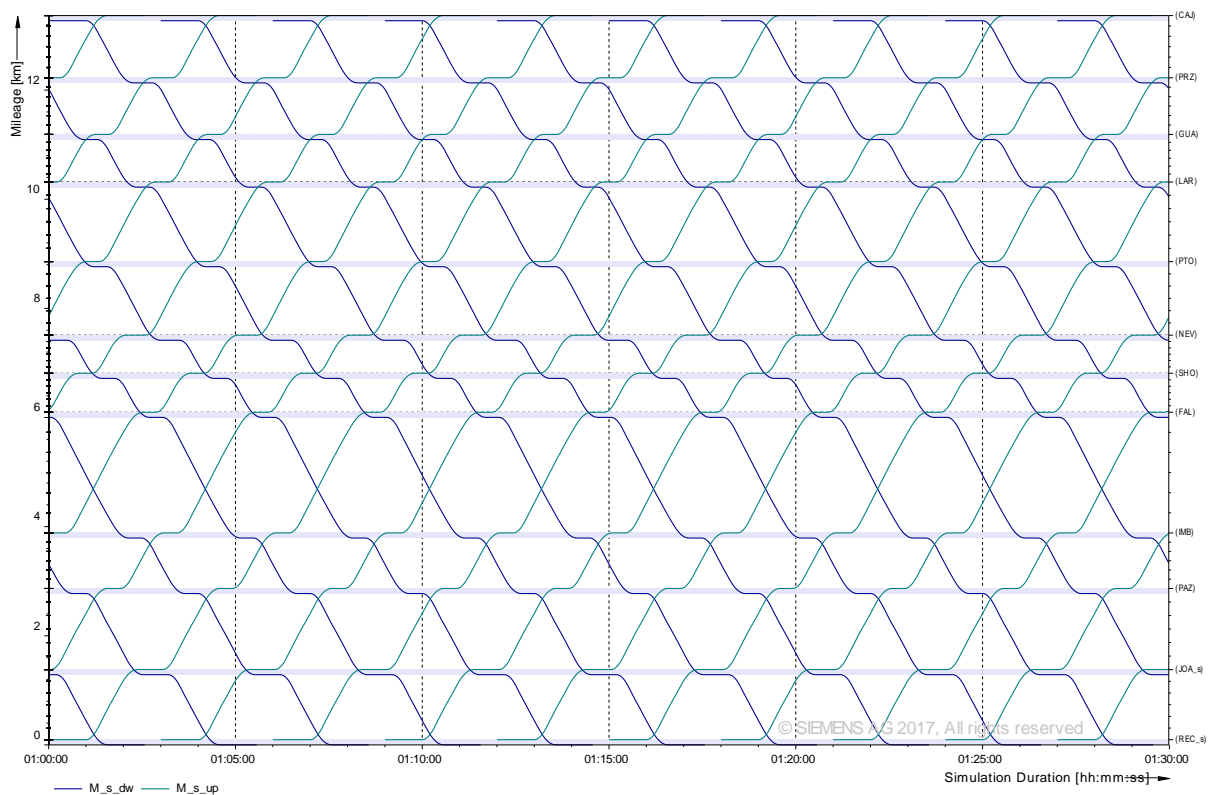
**Figura 3-9: Linha Centro de Recife Centro para Coqueiral com headway de 3 min.**



**Figura 3-10: Linha Centro de Coqueiral para Camaragibe com headway de 6 min.**



**Figura 3-11: Linha Centro de Coqueiral para Jaboatão com headway de 6 min.**



### Figura 3-12: Linha Sul de Recife Sul para Cajueiro Seco com headway de 3 min.

Os tempos de permanência nas estações a seguir (tempo de parada na estação) foram considerados na simulação para as duas direções na Linha Centro e na Linha Sul:

Nome abreviado	Tempo de permanência [s]
(REC_c)	60
(JOA_c)	40
(AFO)	20
(IPI)	20
(MAG)	20
(LUZ)	20
(WEK)	20
(BAR)	30
(TEJ)	20
(COQ)	30

**Tabela 3-4: Tempos de permanência nas estações na Linha Centro de REC para COQ**

Nome abreviado	Tempo de permanência [s]
(CEU)	20
(CDO)	20
(ROD)	30
(CDA)	20
(GIB)	20

**Tabela 3-5: Tempos de permanência nas estações na Linha Centro de COQ para GIB**

Nome abreviado	Tempo de permanência [s]
(CAV)	20
(FLO)	20
(ENG)	20
(JAB)	60

**Tabela 3-6: Tempos de permanência nas estações na Linha Centro de COQ para JAB**

Nome abreviado	Tempo de permanência [s]
(REC_s)	60
(JOA_s)	40
(PAZ)	20
(IMB)	20
(FAL)	20
(SHO)	20
(NEV)	30
(PTO)	20
(LAR)	20
(GUA)	20
(PRZ)	30
(CAJ)	60

**Tabela 3-7: Tempos de permanência nas estações na Linha Sul de REC para CAJ**

### 3.3.1 Modo de condução

Para as simulações, adotou-se um padrão de condução realista com uma reserva de tempo de 3% para a simulação do Metrô Recife. A reserva de tempo é percebida enquanto os trens estão rodando antes da fase de frenagem final nas estações.

A reserva de tempo em % é citada para a condução "all out mode" (todos os modos de saída), que é o mínimo teórico do período de um ciclo de condução entre duas estações.

"All out mode" consiste em três fases:

- aceleração com um valor máximo
- estado estável
- frenagem com um valor máximo

"Reserva de tempo com rodagem" significa um padrão de condução mais realista, especialmente com a condução ATO, e consiste em quatro fases:

- aceleração com um valor máximo
- estado estável
- rodagem
- frenagem com um valor máximo

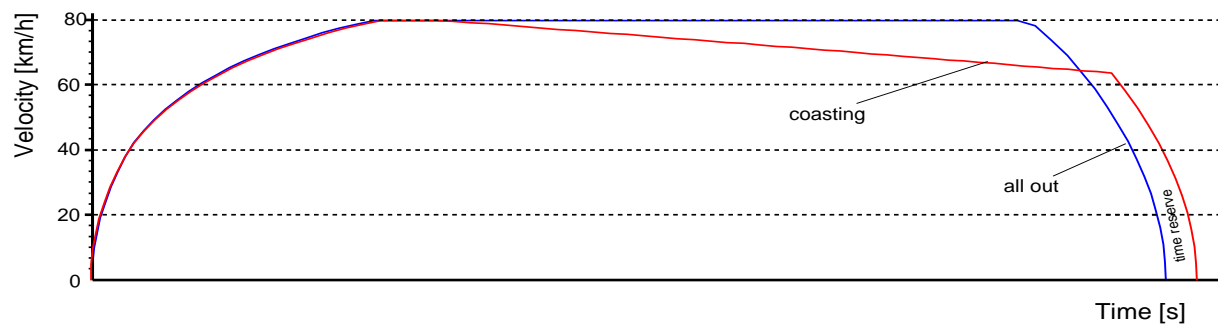


Figura 3-13: Diferentes modos de condução (princípios)

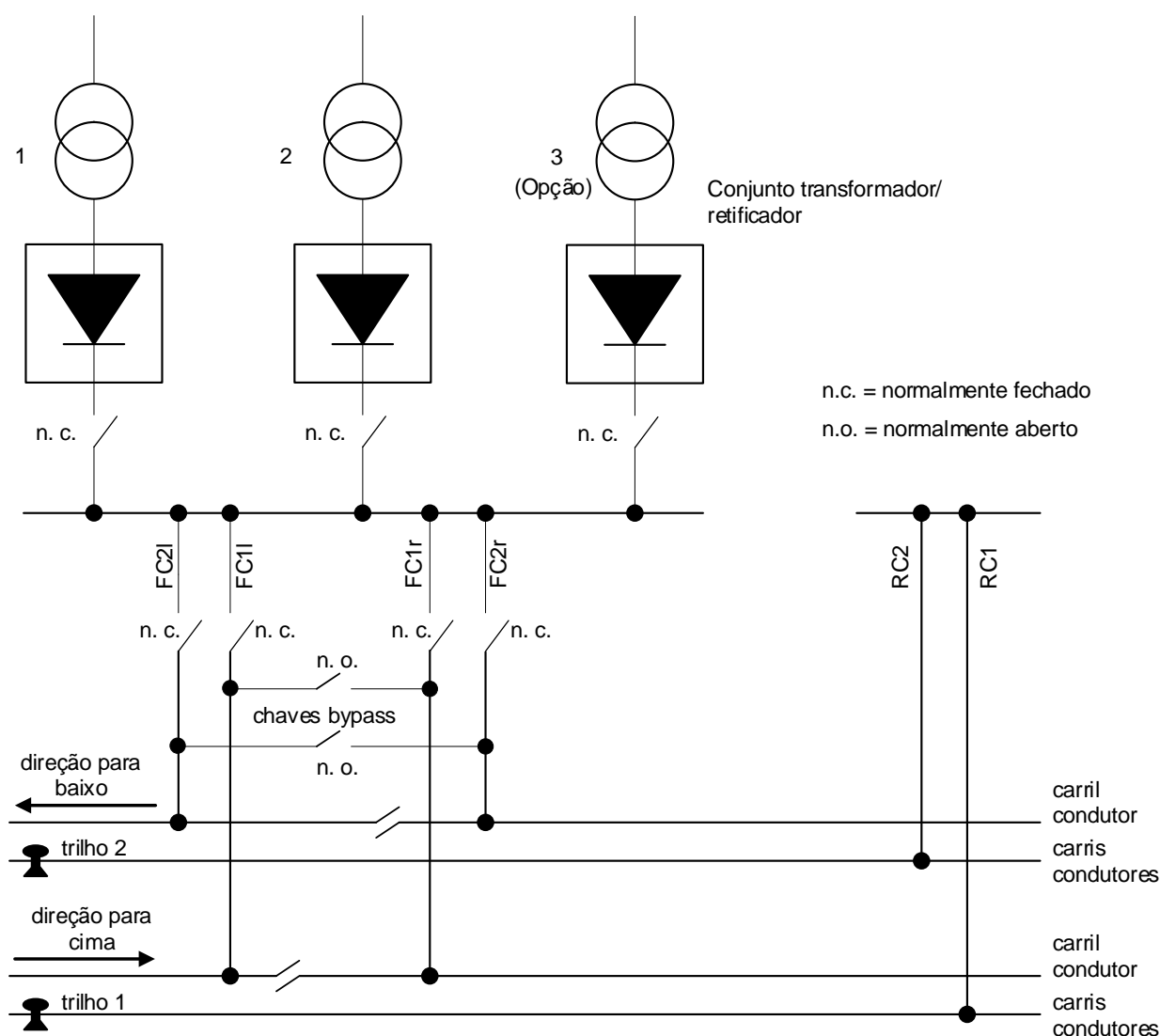


### 3.4 Dados elétricos

#### 3.4.1 Subestações retificadoras de tração (SSR)

A figura abaixo mostra o layout esquemático de alimentação de grande parte das subestações de tração com quatro linhas alimentadoras e duas linhas de retorno. Em caso de interrupção da subestação, os disjuntores do alimentador abrirão e as chaves bypass fecharão de acordo com RD02.

Este diagrama tem apenas fins ilustrativos. O número de transformadores utilizados é 2 ou 3.



**Figura 3-14: Alimentação pela subestação retificadora de tração com um conjunto retificador/transformador**

O número de transformadores e o tipo de transformador são fornecidos na lista a seguir.

Os alimentadores de linha da subestação são: FC2l, FC1l, FC1r, FC2r.

Os alimentadores bypass são utilizados (fechados) em caso de interrupção da subestação para garantir uma alimentação dupla ou a alimentação da seção final restante da linha.

A tabela abaixo oferece uma visão geral das posições das subestações e a potência aplicada na linha Centro e na linha Sul, de acordo com RD02.

Linha	Seção	Nome da subestação	Potência	Transformador	Número de alimentadores de linha	Chaves bypass
Centro/Sul	REC – JAB / REC - CAJ	SSR_REC	3 x 3000 kVA	GEC	4	não
Centro	REC - JAB	SSR_IPI	3 x 3000 kVA	GEC	4	sim
Centro	REC - JAB	SSR_COQ	3 x 3000 kVA	GEC	6	sim
Centro	REC - JAB	SSR_JAB	2 x 3000 kVA	GEC	2	não
Centro	COQ - GIB	SSR_ROD	2 x 3000 kVA	GEC	4	sim
Sul	REC - CAJ	SSR_SHO	2 x 3000 kVA	GEC	4	sim
Sul	REC - CAJ	SSR_CAJ	3 x 3300 kVA	WEG	4	sim

**Tabela 3-8: Localizações das subestações e potência aplicada**

As tabelas a seguir oferecem uma visão geral da localização dos pontos de alimentação e de acoplamento. Todas as posições estimadas são exibidas em RD02.

A tabela abaixo oferece uma visão geral das posições dos painéis de alimentação e acoplamento das subestações na linha Centro, seção REC para JAB:

Ponto de alimentação	Posição em km	Direção da alimentação
SSR_c_REC	0,02	Linha Centro (dois alimentadores principais)
SSR_IPI	3,85	ambas
CSP_WEK	6,6	Painel de acoplamento com alimentadores de linha dianteiros e seccionamento em cada sistema de catenária
SSR_COQ_1	9,83	Direção REC
SSR_COQ_2	9,95	Direção JAB
SSR_JAB	16,4	Instalado no fim da via, somente dois alimentadores principais

**Tabela 3-9: Localizações do painel de alimentação e acoplamento das subestações, REC para JAB**

A tabela abaixo oferece uma visão geral das posições dos painéis de alimentação e acoplamento para catenária das subestações na linha Centro, seção COQ para GIB:

Ponto de alimentação	Posição em km	Direção da alimentação
SSR_COQ_3	0,05	Direção GIB
SSR_ROD	3,65	ambas
CP_GIB	8,2	Conexão entre os sistemas de catenária das vias 1 e 2

**Tabela 3-10: Localizações do painel de alimentação e acoplamento das subestações, COQ para GIB**

A tabela abaixo oferece uma visão geral das posições dos painéis de alimentação e acoplamento das subestações na linha Sul, seção REC para CAJ:

Ponto de alimentação	Posição em km	Direção da alimentação
SSR_s_REC	0,02	Linha Sul (dois alimentadores principais)
CSP_PAZ	3,1	Painel de acoplamento com alimentadores de linha dianteiros e seccionamento em cada sistema de catenária
SSR_SHO	6,7	ambas
CSP_LAR	10,5	Painel de acoplamento com alimentadores de linha dianteiros e seccionamento em cada sistema de catenária
SSR_CAJ	13,5	ambas

**Tabela 3-11: Localizações do painel de alimentação e acoplamento das subestações, REC para CAJ**

### 3.4.2 Transformador e retificador de tração

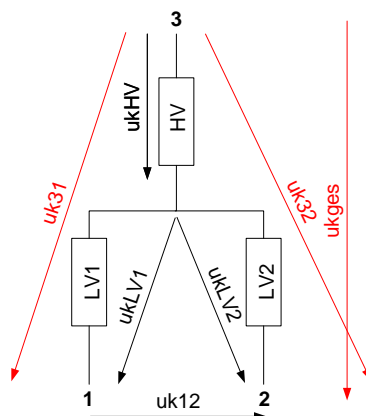
Cada subestação consiste em no mínimo 2 conjuntos retificador/transformador. Os dados de um único conjunto, resumidos abaixo, estão de acordo com RD03, RD04, RD05.

#### 3.4.2.1 Conjuntos retificador/transformador com transformador GEC

##### Dados do transformador

Tipo:	-	
Tensão em vazio $U_{v0}$ :	1278 V AC	
Potência nominal aparente $S_r$ :	3000 kVA	
Tensão relativa de curto circuito $u_k$ :	11,13%	(premissa)
Perdas de carga:	300 kW	(premissa)
Sobrecarga classe VI, IEC 60146-1-1	150% 2 h, 300% 1 min.	

Modelo de transformador adotado para calcular os dados de transformador exigidos:



**Figura 3-15: Tensões de curto circuito do transformador**

Para fins de simulação, é necessário saber o fator de acoplamento dos enrolamentos do transformador. Se não for fornecido diretamente, este valor pode ser calculado a partir de  $u_{kges}$  (11,13%) e um dos outros valores  $u_k$  exibidos na Figura 3-15. Na simulação, adotou-se um fator de acoplamento de 0,9.

### Dados do retificador

Tipo:	-
Potência nominal	-
Tensão nominal $U_{dn}$	3 000 V CC
Sem tensão de carga $U_{di0}(=U_{v0}*1,35)$ :	3450 V CC
Sobrecarga classe VI, IEC 60146-1-1	150% 2 h, 300% 1 min.

### 3.4.2.2 Conjuntos retificador/transformador com transformador WEG

#### Dados do transformador

Tipo:	-
Tensão em vazio $U_{v0}$ :	1277 V AC
Potência nominal aparente $S_r$ :	3300 kVA
Tensão relativa total de curto circuito $u_k$ :	6%
Tensão secundária de curto circuito $u_{k12}$ :	2 x 3,2%
Fator de acoplamento:	0,3 (premissa)
Perdas de carga:	330 kW (premissa)
Sobrecarga classe VI, IEC 60146-1-1	150% 2 h, 300% 1 min.

#### Dados do retificador

Tipo:	-
Potência nominal	-
Tensão nominal $U_{dn}$	3 000 V CC
Sem tensão de carga $U_{di0}(=U_{v0}*1,35)$ :	3450 V DC
Sobrecarga classe VI, IEC 60146-1-1	150% 2 h, 300% 1 min.

### 3.4.3 Catenária

A catenária (rede aérea) é modelada de acordo com as informações fornecida em RD01. Todos os valores são calculados para uma temperatura de 60 °C.

#### 3.4.3.1 Sistema de catenária da Linha Centro, REC para COQ

Fio de contato:	2 x Ri 107 (Desgaste: 25%)
Resistência CC a 60 °C:	129 mΩ/km
Cabo mensageiro:	2 x Cu 65
Resistência CC a 60 °C:	159 mΩ/km
Cabo de apoio:	1 x Cu 65
Resistência CC a 60 °C:	318 mΩ/km

#### 3.4.3.2 Sistema de catenária da Linha Centro, COQ para JAB e COQ para GIB

Fio de contato:	2 x Ri 107 (Desgaste: 25%)
Resistência CC a 60 °C:	129 mΩ/km
Cabo mensageiro:	2 x Cu 65
Resistência CC a 60 °C:	159 mΩ/km

#### 3.4.3.3 Sistema de catenária da Linha Sul, REC para CAJ

Fio de contato:	2 x Ri 107 (Desgaste: 25%)
Resistência CC a 60 °C:	129 mΩ/km
Cabo mensageiro:	1 x Cu 153
Resistência CC a 60 °C:	136 mΩ/km

### 3.4.4 Trilhos de rolamento (negativo)

Já que o trilho TR 57 não faz parte do banco de dados padrão utilizado para a simulação, adotou-se um trilho UIC 60. Uma pesquisa rápida mostrou que o UIC 60 é um “caso pior” (mais conservador) que o TR 57.

Tipo:	UIC 60	(premissa)
Resistência CC:	22,5 mΩ/km	
Condutância ao sistema de aterramento:	0,1 S/km	

### 3.4.5 Cabos CC

#### 3.4.5.1 Cabos CC para alimentação e caminho de retorno

400 mm<sup>2</sup> de cabo de cobre

Resistência CC por cabo: 52 mΩ/km (Temperatura do condutor de 60 °C)

#### 3.4.5.2 Cabos CC alimentadores

Número de vias por alimentador	3
Número de alimentadores	4
Comprimento:	150 m

#### 3.4.5.3 Cabos CC de retorno

Número de vias por retorno	3
Número de retornos	2
Comprimento:	150 m

### 3.5 Dados dos trens

O(s) veículo(s) a seguir foi(foram) considerado(s) no cálculo de rede: Trem CAF com 4 carros.

#### 3.5.1 Condições elétricas

Conjunto de trens:	CAF
Tensão nominal:	3 000 V
Tensão mínima:	2 000 V
Tensão máxima:	3 600 V

#### 3.5.2 Características mecânicas

Comprimento:	90,453 m
Tara:	182,7 t
Carga útil máxima:	93,1 t
Porção rotatória da tara:	10,15% <b>(premissa)</b>

#### 3.5.3 Características de movimentação

Velocidade máxima:	90 km/h
Aceleração máxima:	1,0 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração máxima:	1,2 m/s <sup>2</sup>

#### 3.5.4 Eficiências

Eficiência:	87%	<b>(premissa)</b>
-------------	-----	-------------------

#### 3.5.5 Auxiliares

Carga independente de tensão:	140 kVA
-------------------------------	---------

### 3.5.6 Resistência do trem

#### 3.5.6.1 Fórmula de resistência do trem fornecida como dado de entrada

De acordo com RD10, a resistência do trem  $F$  é fornecida como:

$$F = 208 + 0,64 \cdot m + 0,014 \cdot m \cdot v + 0,078469 \cdot v^2$$

Em que:

$F$	=	força em daN
$v$	=	velocidade do trem em km/h
$m$	=	massa do trem em toneladas (neste caso: $m = 275,8$ t)

A partir dessa equação, é possível calcular a resistência do trem no modelo de Davis:

$$R_{res,train} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

$R_{res,trem}$  é a resistência mecânica absoluta do trem em [kN] e  $v$  é a velocidade em [km/h]. Os fatores  $A$ ,  $B$  e  $C$  dependem da configuração e da carga do trem. Os valores são fornecidos para a massa total do trem de 275,8 t:

Fator $A$ em [kN]:	3,84512	(premissa)
Fator $B$ em [kN/(km/h)]:	0,038612	(premissa)
Fator $C$ em [kN/(km/h) <sup>2</sup> ]:	0,00078469	(premissa)

#### 3.5.6.2 Coeficientes de resistência do trem para a fórmula utilizada no Sidytrac

Fórmula de resistência do trem utilizada no software de simulação Sidytrac:

$$F_w = k_0 + k_3 \cdot m \cdot v + k_5 \cdot m \cdot v^2$$

$F_w$  = Resistência mecânica [N]  
 $m$  = Peso total do trem [kg]  
 $v$  = velocidade do veículo [m/s]

Os coeficientes gerados utilizados no modelo do Sidytrac:

Coeficientes	Valor
$k_0$	3,84512
$k_3$	0,0005
$k_5$	0,000037

**Tabela 3-12: Coeficientes de resistência do trem para a fórmula utilizada no Sidytrac**



### 3.5.7 Esforço de tração, esforço de frenagem e resistência do trem

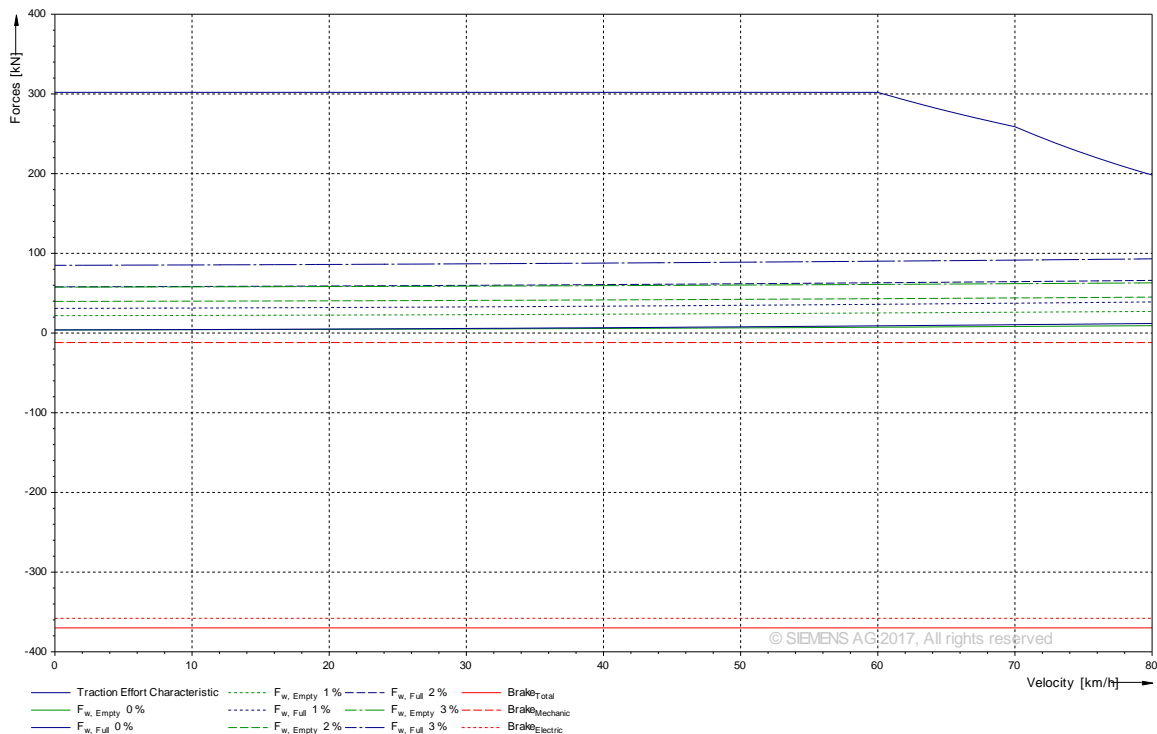


Figura 3-16: Esforço de tração, esforço de frenagem e resistência do trem (CAF)

### 3.5.8 Limitação da corrente de tração e de frenagem

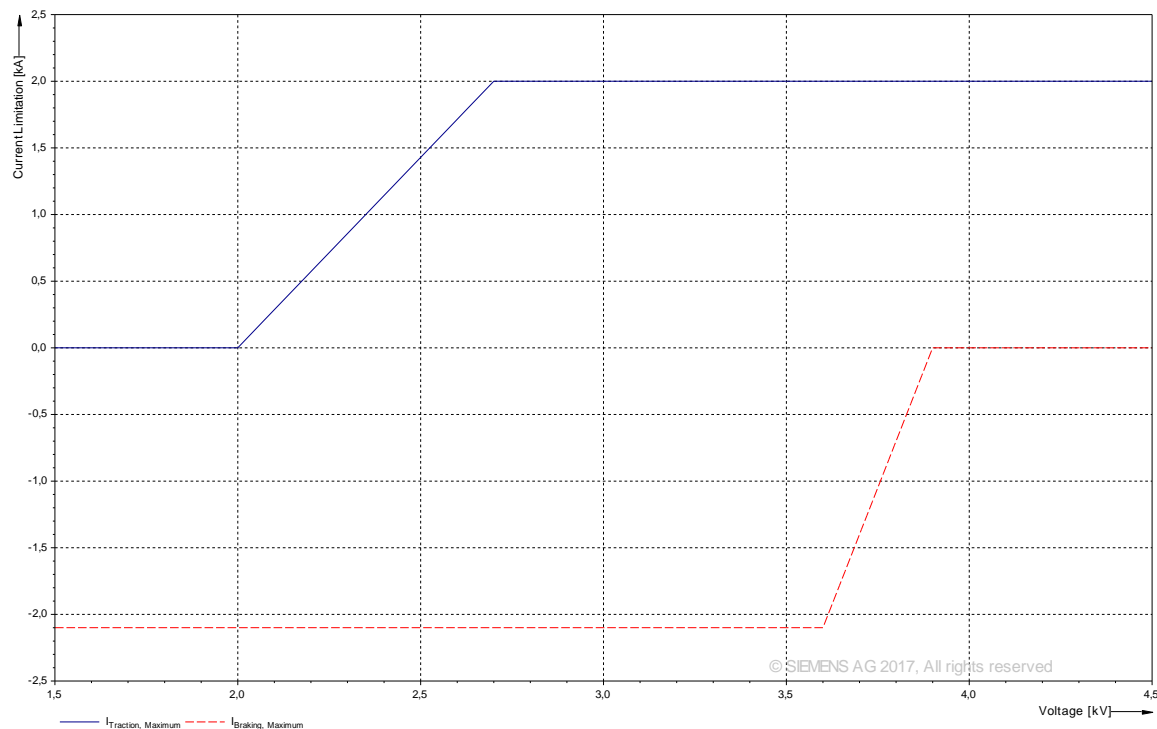


Figura 3-17: Corrente de tração e de frenagem - trem CAF

## 4 Cálculos

### 4.1 Programa de simulação SITRAS® SIDYTRAC

Com o Sitras® Sidytrac, o serviço programado do trem na rota indicada foi simulado considerando-se a rede elétrica modelada.

Usando o procedimento de passo de tempo, o Sitras® Sidytrac determina o perfil de velocidade dos trens. Em cada passo de tempo, todas as tensões e correntes na rede são calculadas. Por meio desse procedimento de cálculo, o perfil de velocidade e o consumo de energia dos trens são determinados com os efeitos na rede sendo considerados.

Os resultados dos cálculos são níveis de potência, níveis de energia, valores RMS, perdas etc., que são ilustrados nos diagramas a seguir.

Na Figura 4-1 é exibido o diagrama de procedimento de cálculo do Sitras® Sidytrac.

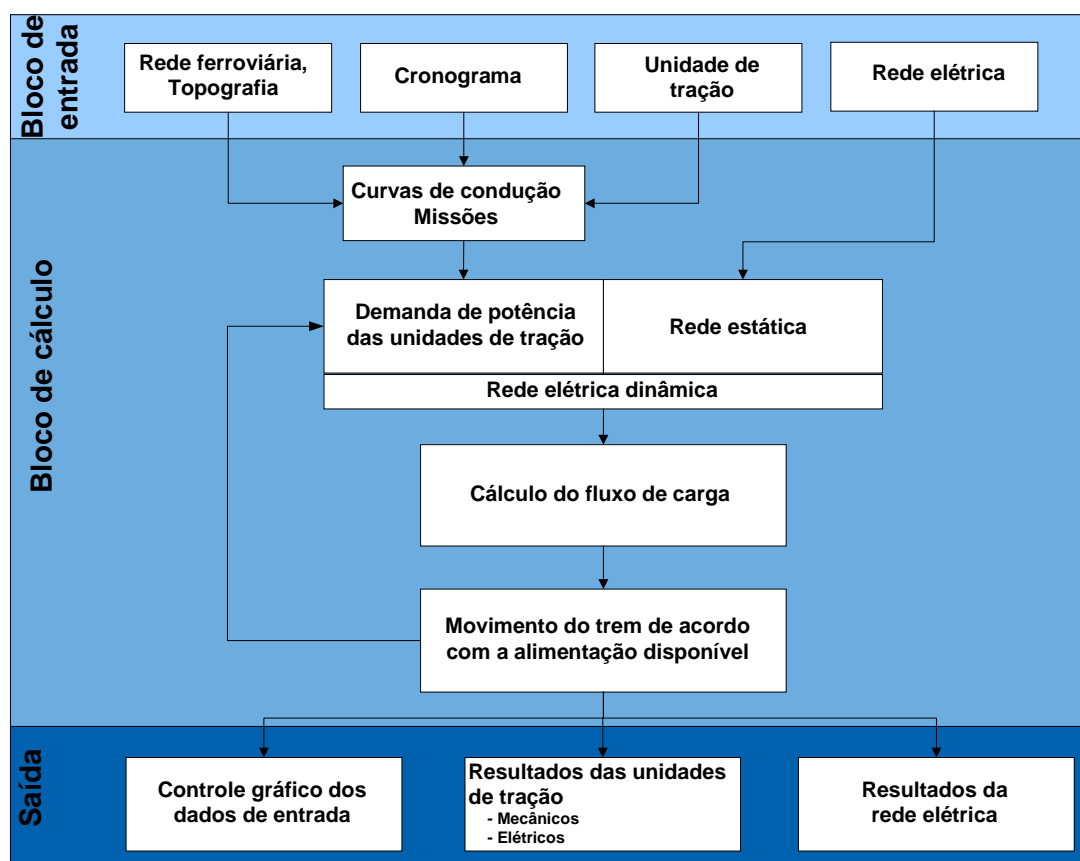


Figura 4-1: Procedimento de cálculo do Sitras® Sidytrac

## 5 Resultados

### 5.1 Resultados para as Linhas Centro e Sul eletricamente acopladas

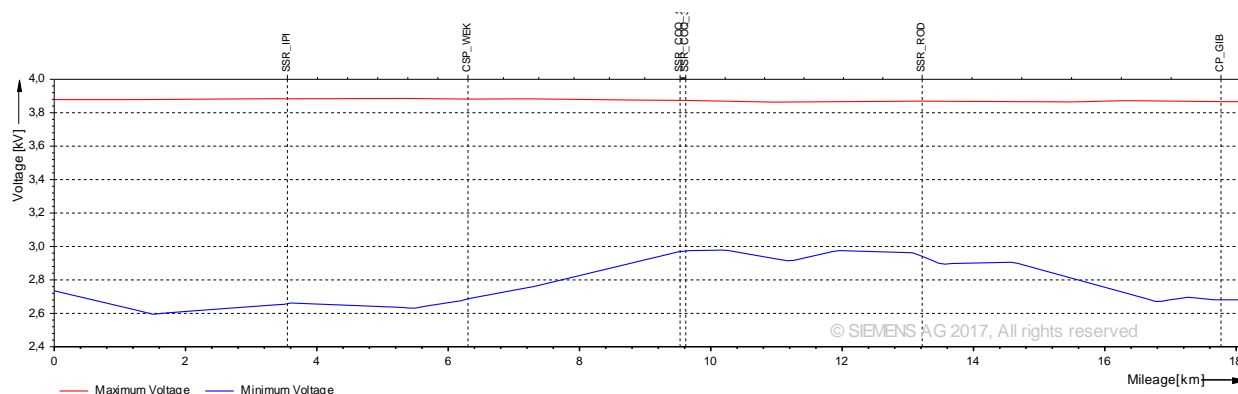
#### 5.1.1 Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

A tabela a seguir resume a tensão mínima de alimentação do trem e o potencial máximo dos trilhos para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Na descrição de cada variante, “OUT” indica que a subestação está fora de operação (por exemplo, “OUT\_REC” indica que a subestação Recife está fora de operação). Os resultados destacados indicam os piores casos:

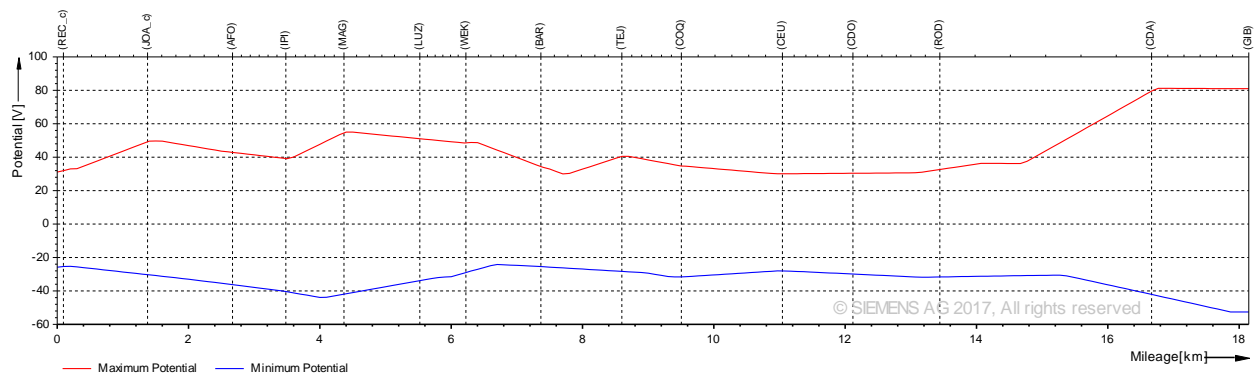
Variante	Tensão mínima de alimentação do trem em V	Potencial máximo dos trilhos em V
Operação normal	2 587	115
OUT_CAJ	<b>2 156</b>	109
OUT_SHO	2 301	115
OUT_REC	2 189	-113
OUT_IPI	2 326	119
OUT_COQ	2 390	110
OUT_JAB	2 399	120
OUT_ROD	2 341	<b>133</b>

**Tabela 5-1: Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos**

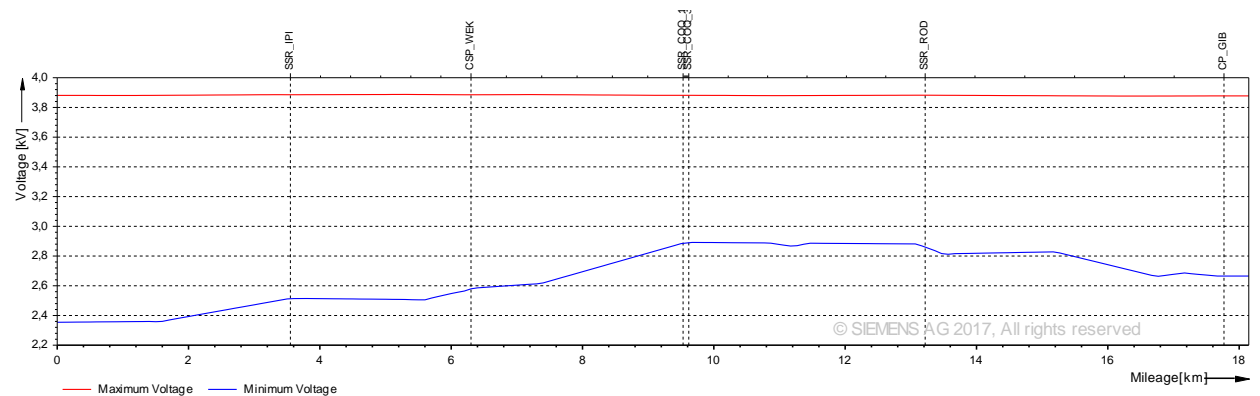
Os gráficos a seguir oferecem uma visão geral da tensão mín./máx. de alimentação e do potencial mín./máx. dos trilhos na Linha Centro:



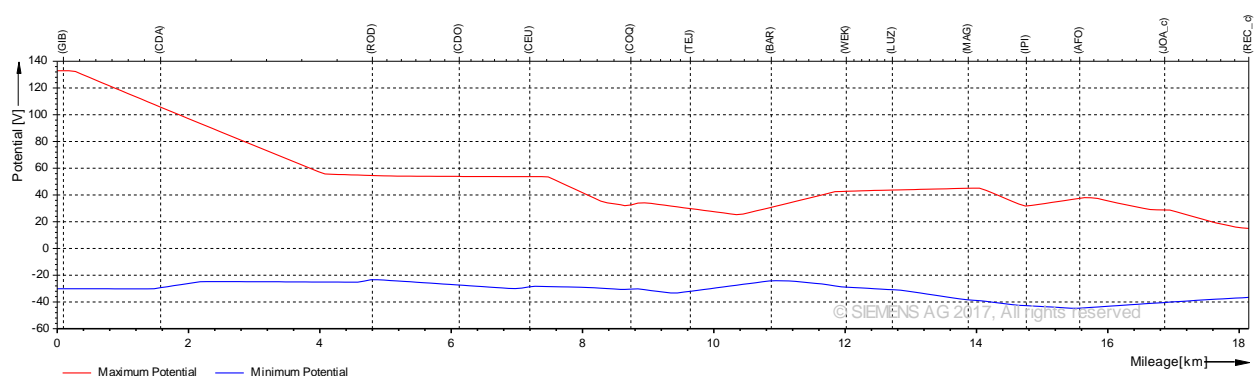
**Figura 5-1: Tensão mín./máx. de alimentação versus via em operação normal na Linha Centro de Recife Centro para Camaragibe**



**Figura 5-2: Potencial mín./máx. dos trilhos versus via em operação normal na Linha Centro de Recife Centro para Camaragibe**

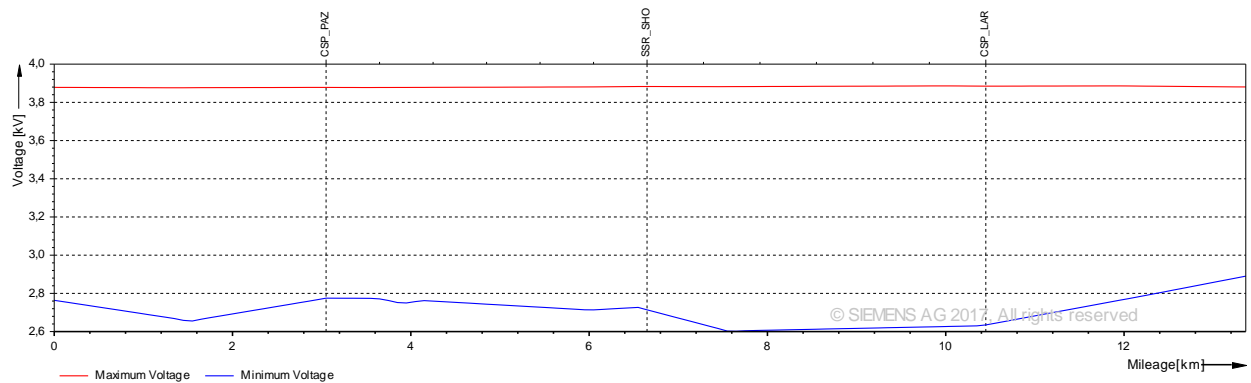


**Figura 5-3: Tensão mín./máx. de alimentação versus via em caso de interrupção de SSR REC**

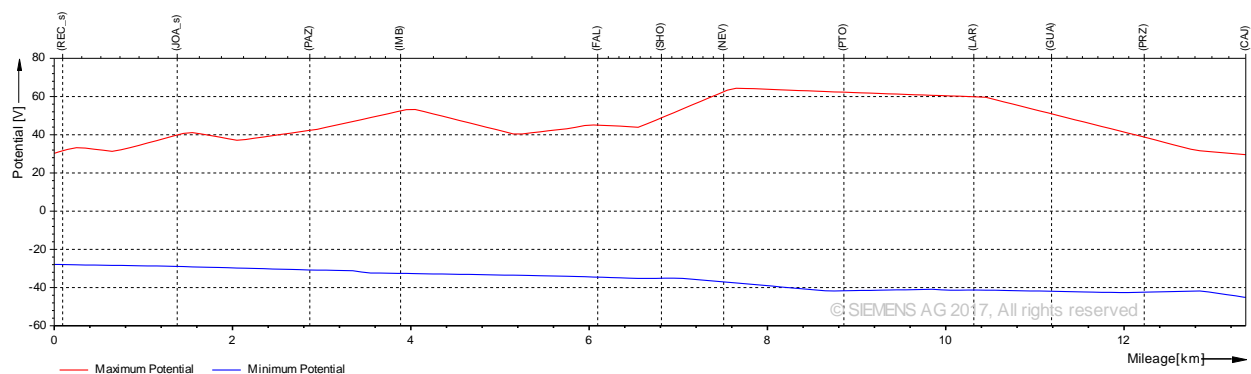


**Figura 54: Potencial mín./máx. dos trilhos versus via em caso de interrupção de SSR ROD**

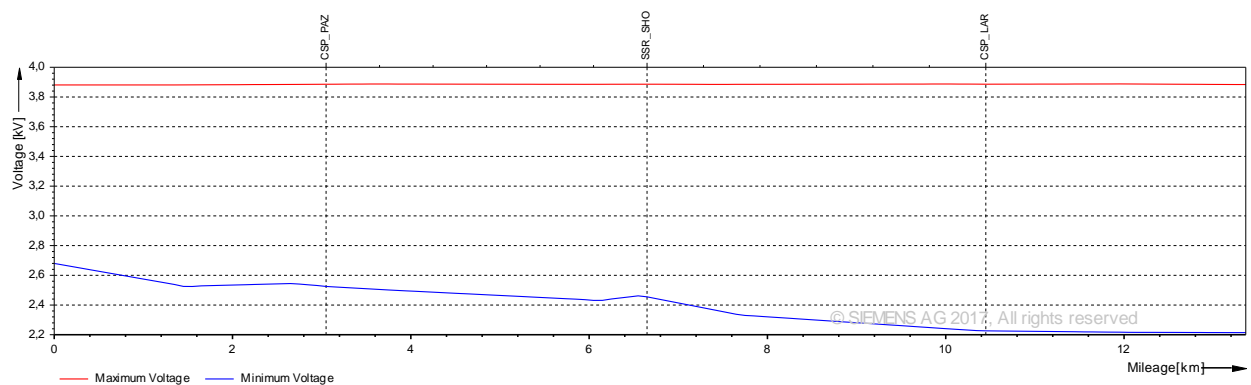
Os gráficos a seguir oferecem uma visão geral da tensão mín./máx. de alimentação e do potencial mín./máx. dos trilhos na Linha Sul:



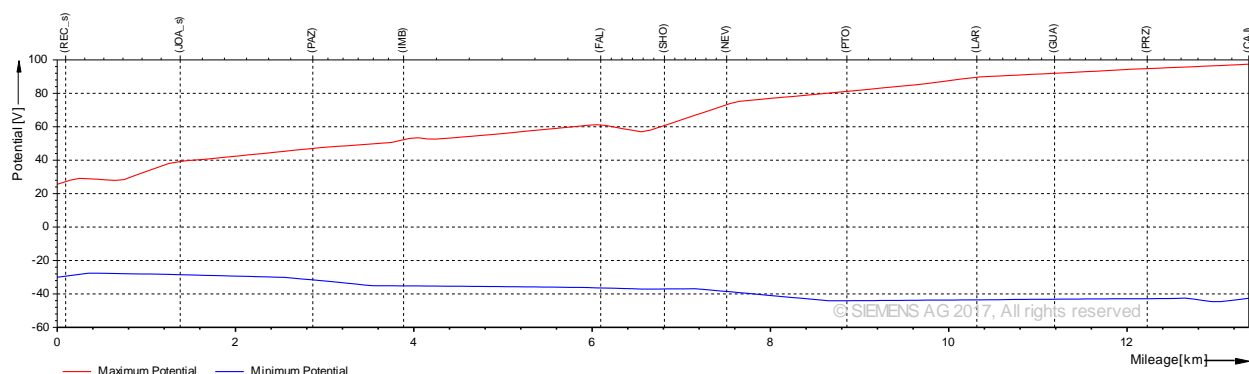
**Figura 5-5: Tensão mín./máx. de alimentação versus via em operação normal na Linha Sul de Recife Sul para Cajueiro Seco**



**Figura 5-6: Potencial mín./máx. dos trilhos versus via em operação normal na Linha Sul de Recife Sul para Cajueiro Seco**



**Figura 5-7: Tensão mín./máx. de alimentação versus via em caso de interrupção de SSR CAJ**



**Figura 5-8: Potencial mín./máx. dos trilhos versus via em caso de interrupção de SSR CAJ**

### 5.1.2 Demanda de potência do transformador e do retificador

A tabela a seguir resume a demanda máxima de potência do transformador e do retificador para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência máx. [kVA]	Potência máx. [kVA]	Variante
TR_CAJ	1	3 860	4 401	OUT_SHO
	2	3 860	4 401	OUT_SHO
	3	3 860	4 401	OUT_SHO
TR_SHO	1	4 325	<b>5 978</b>	OUT_CAJ
	2	4 325	<b>5 978</b>	OUT_CAJ
TR_REC	1	4 118	<b>4 959</b>	OUT_IPI
	2	4 118	<b>4 959</b>	OUT_IPI
	3	4 118	<b>4 959</b>	OUT_IPI
TR_IPI	1	<b>4 751</b>	<b>5 675</b>	OUT_REC
	2	<b>4 751</b>	<b>5 675</b>	OUT_REC
	3	<b>4 751</b>	<b>5 675</b>	OUT_REC
TR_COQ	1	2 852	3 821	OUT_ROD
	2	2 852	3 821	OUT_ROD
	3	2 852	3 821	OUT_ROD
TR_JAB	1	2 327	3 537	OUT_COQ
	2	2 327	3 537	OUT_COQ
TR_ROD	1	2 883	<b>4 372</b>	OUT_COQ
	2	2 883	<b>4 372</b>	OUT_COQ

**Tabela 5-2: demanda máxima de alimentação do transformador (1 s)**

A tabela a seguir resume a demanda de potência do transformador e do retificador RMS de 900 s para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência r.m.s. [kVA]	Potência r.m.s. [kVA]	Variante
TR_CAJ	1	1 283	1 870	OUT_SHO
	2	1 283	1 870	OUT_SHO
	3	1 283	1 870	OUT_SHO
TR_SHO	1	<b>1 691</b>	<b>2 831</b>	OUT_CAJ
	2	<b>1 691</b>	<b>2 831</b>	OUT_CAJ
TR_REC	1	1 458	2 116	OUT_IPI
	2	1 458	2 116	OUT_IPI
	3	1 458	2 116	OUT_IPI
TR_IPI	1	1 548	2 105	OUT_REC
	2	1 548	2 105	OUT_REC
	3	1 548	2 105	OUT_REC
TR_COQ	1	1 140	1 584	OUT_ROD
	2	1 140	1 584	OUT_ROD
	3	1 140	1 584	OUT_ROD
TR_SHO	1	887	1 514	OUT_COQ
	2	887	1 514	OUT_COQ
TR_REC	1	1 157	1 877	OUT_COQ
	2	1 157	1 877	OUT_COQ

**Tabela 53: Demanda de potência do transformador RMS de 900 s**

O diagrama a seguir representa a carga de cada SSR em uma visão geral para todas as subestações de tração e todas as situações operacionais (variantes de interrupção):

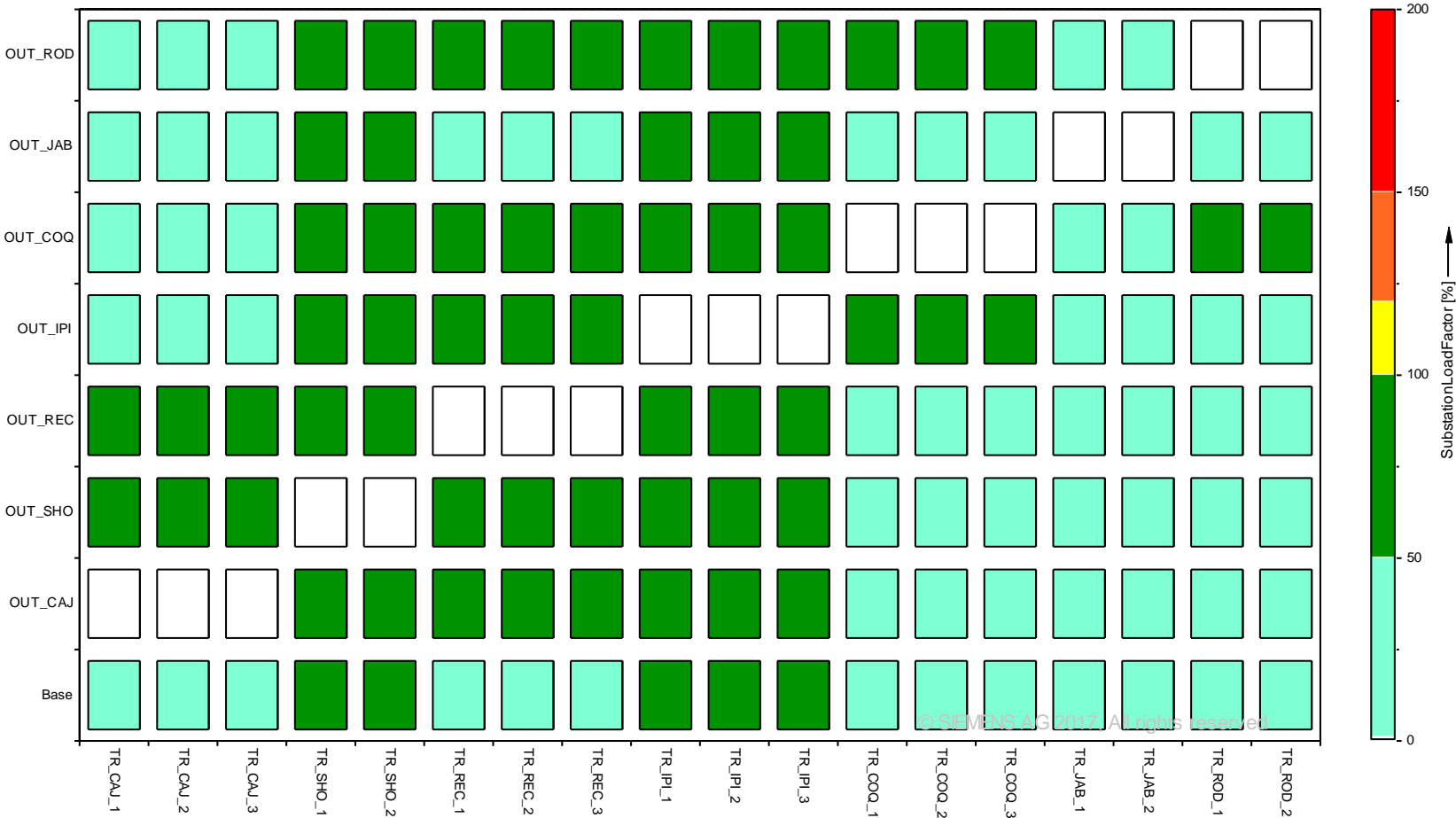


Figura 5-9: Demanda de potência de cada grupo transformador/retificador (RMS de 900 s) em cada situação operacional



### 5.1.3 Correntes dos cabos

A tabela a seguir resume as correntes máximas dos cabos alimentadores para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam o valor máximo.

Cabo		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Alimentador	corrente máx. [A]	corrente máx. [A]	Variante
SSR_CAJ_SG	DVB_81_CAJ-1s	1 758	2 233	OUT_SHO
	DVB_84_CAJ-2s	2 151	2 335	OUT_SHO
	DV_83_CAJ-1s	0	0	OUT_SHO
	DV_86_CAJ-2s	0	0	OUT_SHO
SSR_SHO_SG	DV_77_SHO-1s	1 895	2 514	OUT_REC
	DV_78_SHO-2s	1 784	2 667	OUT_REC
	DV_79_SHO-1s	2 046	2 811	OUT_CAJ
	DV_80_SHO-2s	1 658	2 583	OUT_CAJ
SSR_REC_SG	DV_A3_REC-1c	1 385	2 290	OUT_IPI
	DV_4_REC-2c	1 679	2 384	OUT_IPI
	DV_71_REC-1s	1 419	1 928	OUT_CAJ
	DV_72_REC-2s	1 950	2 646	OUT_SHO
SSR_IPI_SG	DVB_3_IPI-1c	2 539	3 660	OUT_REC
	DV_8_IPI-2c	1 883	2 584	OUT_REC
	DVA_5_IPI-1c	2 745	3 339	OUT_COQ
	DV_10_IPI-2c	1 771	2 477	OUT_COQ
SSR_COQ_SG	DV_11_COQ-1c	1 550	2 191	OUT_IPI
	DV_16_COQ-1c	3 070	3 684	OUT_IPI
	DV_13_COQ-2c	1 637	2 050	OUT_JAB
	DV_18_COQ-2c	1 459	2 087	OUT_JAB
	DV_41_COQ-3c	1 794	2 438	OUT_ROD
	DV_42_COQ-3c	1 358	2 190	OUT_ROD
SSR_JAB_SG	DV_21_JAB-1c	1 507	1 690	OUT_COQ
	DV_24_JAB-2c	1 767	1 981	OUT_COQ
SSR_ROD_SG	DV_43_ROD-1c	1 245	2 050	OUT_COQ
	DV_44_ROD-2c	1 556	2 024	OUT_COQ
	DV_45_ROD-1c	1 926	1 945	OUT_IPI
	DV_46_ROD-2c	2 071	2 123	OUT_IPI

Tabela 5-4: Corrente máxima dos cabos alimentadores (1 s)

A tabela a seguir resume as correntes dos cabos alimentadores RMS de 900 s para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam o valor máximo.

Cabo		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Alimentador	corrente r.m.s. [A]	corrente r.m.s. [A]	Variante
SSR_CAJ_SG	DVB_81_CAJ-1s	580	821	OUT_SHO
	DVB_84_CAJ-2s	726	939	OUT_SHO
	DV_83_CAJ-1s	0	0	OUT_SHO
	DV_86_CAJ-2s	0	0	OUT_SHO
SSR_SHO_SG	DV_77_SHO-1s	439	675	OUT_COQ
	DV_78_SHO-2s	451	618	OUT_COQ
	DV_79_SHO-1s	558	566	OUT_IPI
	DV_80_SHO-2s	515	520	OUT_IPI
SSR_REC_SG	DV_A3_REC-1c	507	862	OUT_IPI
	DV_4_REC-2c	516	835	OUT_IPI
	DV_71_REC-1s	604	892	OUT_SHO
	DV_72_REC-2s	544	813	OUT_SHO
SSR_IPI_SG	DVB_3_IPI-1c	631	924	OUT_REC
	DV_8_IPI-2c	690	1 028	OUT_REC
	DVA_5_IPI-1c	721	972	OUT_COQ
	DV_10_IPI-2c	506	718	OUT_COQ
SSR_COQ_SG	DV_11_COQ-1c	741	1 004	OUT_IPI
	DV_16_COQ-1c	<b>842</b>	<b>1 083</b>	OUT_IPI
	DV_13_COQ-2c	480	761	OUT_JAB
	DV_18_COQ-2c	445	835	OUT_JAB
	DV_41_COQ-3c	384	719	OUT_ROD
	DV_42_COQ-3c	361	638	OUT_ROD
SSR_JAB_SG	DV_21_JAB-1c	451	604	OUT_COQ
	DV_24_JAB-2c	537	649	OUT_COQ
SSR_ROD_SG	DV_43_ROD-1c	476	861	OUT_REC
	DV_44_ROD-2c	600	990	OUT_REC
	DV_45_ROD-1c	672	993	OUT_CAJ
	DV_46_ROD-2c	584	954	OUT_CAJ

**Tabela 5-5: Corrente dos cabos alimentadores RMS (900 s)**

A tabela a seguir resume as correntes máximas dos cabos de retorno para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam o valor máximo.

Cabo		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Retorno	corrente r.m.s. [A]	corrente r.m.s. [A]	Variante
SSR_CAJ_SG	RR_CAJ_1s	1 798	2 262	OUT_SHO
	RR_CAJ_2s	2 175	2 357	OUT_SHO
SSR_SHO_SG	RR_SHO_1s	2 112	2 553	OUT_REC
	RR_SHO_2s	1 620	2 139	OUT_REC
SSR_REC_SG	RR_REC_1c	1 380	2 120	OUT_IPI
	RR_REC_2c	1 601	2 332	OUT_IPI
	RR_REC_1s	1 318	1 785	OUT_SHO
	RR_REC_2s	1 832	2 468	OUT_SHO
SSR_IPI_SG	RR_IPI_1c	<b>2 398</b>	<b>2 905</b>	OUT_REC
	RR_IPI_2c	2 102	2 616	OUT_REC
SSR_COQ_SG	RR_COQ_1_1c	1 605	2 061	OUT_IPI
	RR_COQ_1_2c	1 738	2 095	OUT_IPI
SSR_JAB_SG	RR_JAB_1c	1 467	1 852	OUT_COQ
	RR_JAB_2c	1 726	2 069	OUT_COQ
SSR_ROD_SG	RR_ROD_1c	1 818	2 027	OUT_COQ
	RR_ROD_2c	1 580	1 950	OUT_COQ

**Tabela 5-6: corrente máxima dos cabos de retorno (1 s)**

A tabela a seguir resume as correntes dos cabos de retorno RMS de 900 s para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam o valor máximo.

Cabo		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Retorno	corrente r.m.s. [A]	corrente r.m.s. [A]	Variável
SSR_CAJ_SG	RR_CAJ_1s	580	823	OUT_SHO
	RR_CAJ_2s	723	936	OUT_SHO
SSR_SHO_SG	RR_SHO_1s	563	687	OUT_COQ
	RR_SHO_2s	553	694	OUT_COQ
SSR_REC_SG	RR_REC_1c	493	808	OUT_IPI
	RR_REC_2c	497	797	OUT_IPI
	RR_REC_1s	576	836	OUT_SHO
	RR_REC_2s	506	752	OUT_SHO
SSR_IPI_SG	RR_IPI_1c	<b>826</b>	<b>1 042</b>	OUT_REC
	RR_IPI_2c	778	977	OUT_REC
SSR_COQ_SG	RR_COQ_1_1c	637	813	OUT_ROD
	RR_COQ_1_2c	583	736	OUT_ROD
SSR_JAB_SG	RR_JAB_1c	441	579	OUT_COQ
	RR_JAB_2c	525	636	OUT_COQ
SSR_ROD_SG	RR_ROD_1c	708	1 018	OUT_CAJ
	RR_ROD_2c	664	936	OUT_CAJ

**Tabela 5-7: Corrente dos cabos de retorno RMS de 900 s**

### 5.1.4 Correntes na rede aérea

A corrente no sistema de catenária (rede aérea) corresponde diretamente à corrente no cabo alimentador, vide as tabelas 5-4 a 5-7.

O gráfico mostra:

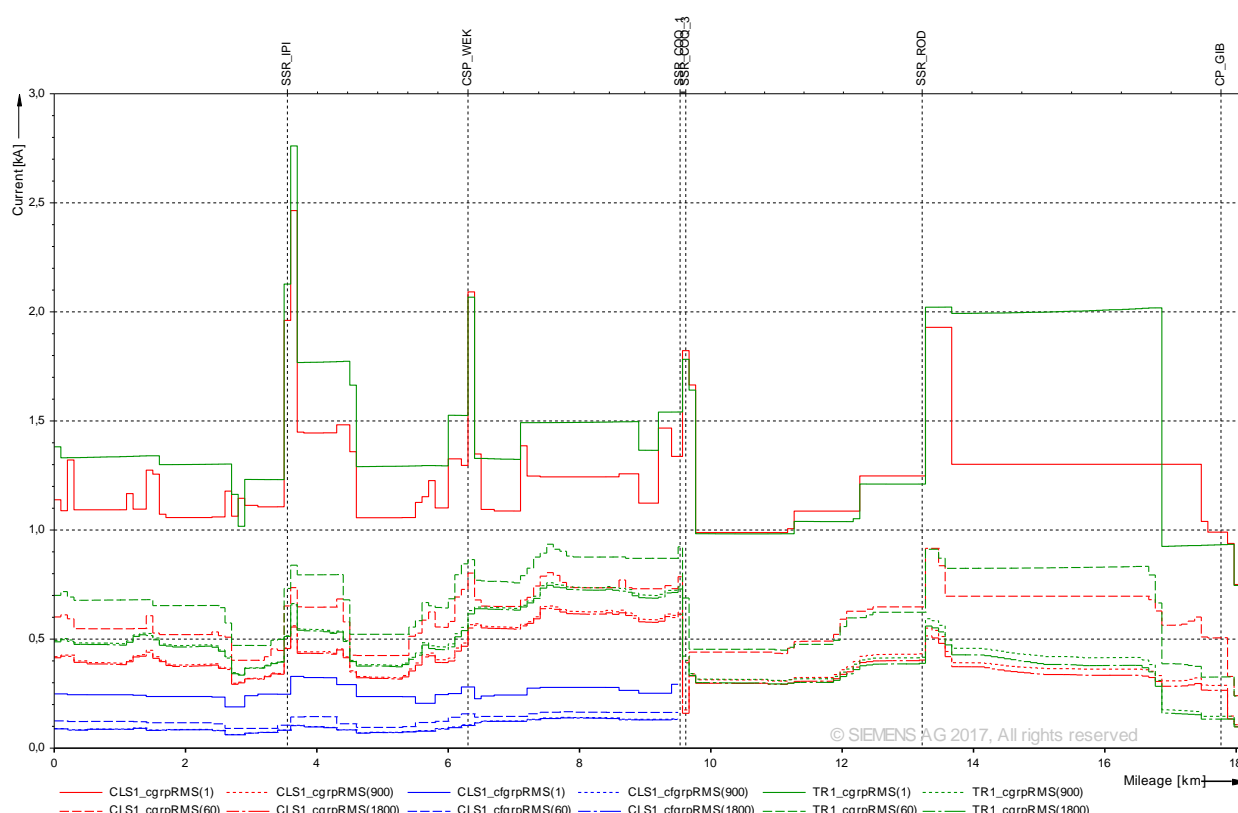
- A corrente na catenária para uma direção.

As diferentes linhas indicam:

- Linha cheia: corrente máxima vs. via na catenária para dada situação operacional.
- Linha tracejada: corrente de valor RMS de 60 s vs. via na catenária para dada situação operacional.
- Linha pontilhada: corrente de valor RMS de 900 s vs. via na catenária para dada situação operacional.
- Linha tracejada-pontilhada: corrente de valor RMS de 1800 s vs. via na catenária para dada situação operacional.

A figura a seguir mostra as correntes na rede aérea versus via para operação normal na linha Centro:

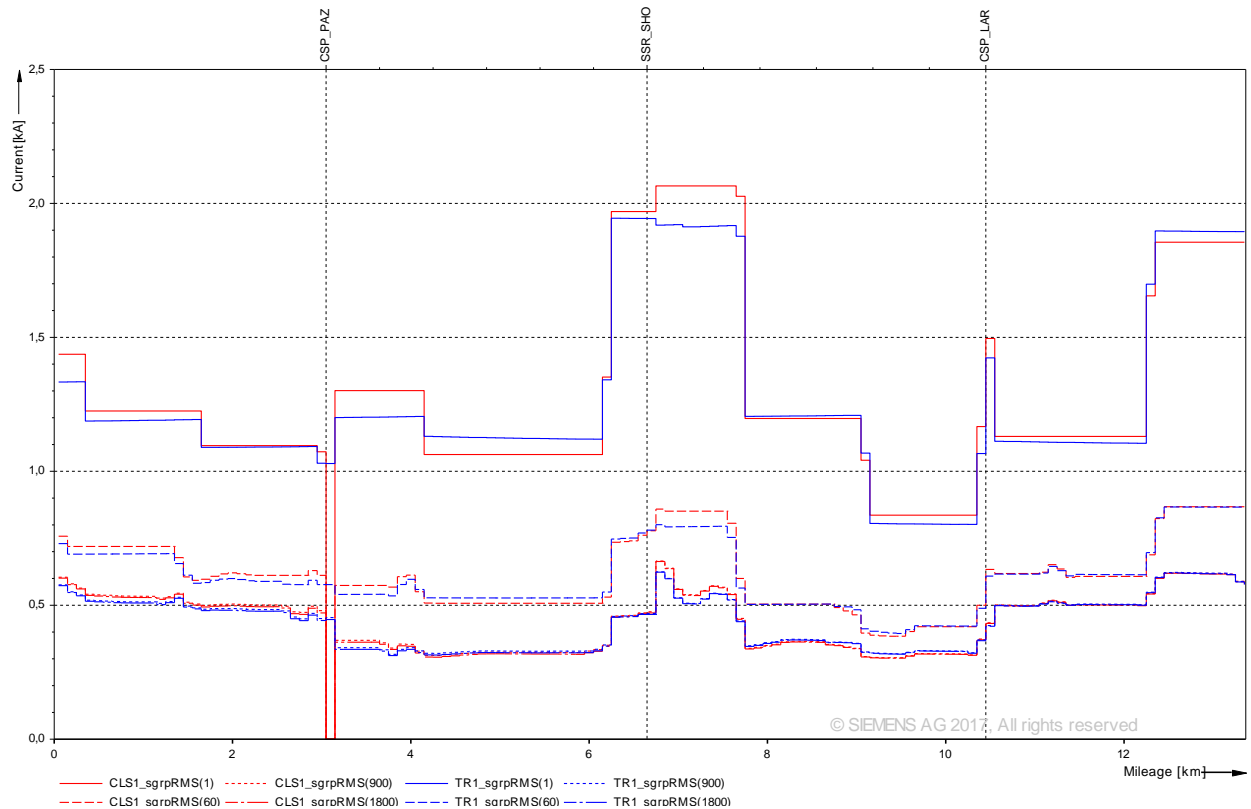
- Gráfico VERMELHO: Corrente na rede aérea, via 1
- Gráfico AZUL: Corrente no condutor de reforço (cabo de apoio), via 1
- Gráfico VERDE: Corrente de retorno (trilhos de rolamento), via 1



**Figura 5-10: Correntes na catenária versus via, operação normal, Linha Centro, de REC a GIB**

A figura a seguir mostra a corrente na rede aérea versus via para operação normal na linha Sul:

- Gráfico VERMELHO: Corrente na rede aérea, via 1
- Gráfico AZUL: Corrente de retorno (trilhos de rolamento), via 1



**Figura 5-11: Corrente na catenária versus via, operação normal, Linha Sul, de REC a CAJ**

## 5.2 Resultados para a Linha Centro eletricamente separada

### 5.2.1 Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

A tabela a seguir resume a tensão mínima de alimentação do trem e o potencial máximo dos trilhos para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os piores casos:

Variante	Tensão mínima de alimentação do trem em V	Potencial máximo de trilhagem em V
Operação normal	2 589	108
OUT_REC	<b>2 324</b>	111
OUT_IPI	2 342	114
OUT_COQ	2 391	<b>104</b>
OUT_JAB	2 418	106
OUT_ROD	2 378	125

Tabela 5-8: Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

### 5.2.2 Demanda de potência do transformador e do retificador

A tabela a seguir resume a demanda máxima de potência do transformador e do retificador para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência máx. [kVA]	Potência máx. [kVA]	Variante
TR_REC	1	3 537	4 608	OUT_IPI
	2	3 537	4 608	OUT_IPI
	3	3 537	4 608	OUT_IPI
TR_IPI	1	<b>4 539</b>	<b>5 676</b>	OUT_REC
	2	<b>4 539</b>	<b>5 676</b>	OUT_REC
	3	<b>4 539</b>	<b>5 676</b>	OUT_REC
TR_COQ	1	2 785	3 772	OUT_ROD
	2	2 785	3 772	OUT_ROD
	3	2 785	3 772	OUT_ROD
TR_JAB	1	2 272	3 454	OUT_COQ
	2	2 272	3 454	OUT_COQ
TR_ROD	1	2 857	4 372	OUT_COQ
	2	2 857	4 372	OUT_COQ

Tabela 5-9: Demanda máxima de alimentação do transformador (1 s)

A tabela a seguir resume a demanda de potência do transformador e do retificador RMS de 900 s para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência r.m.s. [kVA]	Potência r.m.s. [kVA]	Variante
TR_REC	1	1 026	1 798	OUT_IPI
	2	1 026	1 798	OUT_IPI
	3	1 026	1 798	OUT_IPI
TR_IPI	1	<b>1 375</b>	<b>2 106</b>	OUT_REC
	2	<b>1 375</b>	<b>2 106</b>	OUT_REC
	3	<b>1 375</b>	<b>2 106</b>	OUT_REC
TR_CAJ	1	1 062	1 499	OUT_ROD
	2	1 062	1 499	OUT_ROD
	3	1 062	1 499	OUT_ROD
TR_SHO	1	848	1 458	OUT_COQ
	2	848	1 458	OUT_COQ
TR_REC	1	1 101	1 878	OUT_COQ
	2	1 101	1 878	OUT_COQ

**Tabela 5-10: Demanda de potência do transformador e do retificador RMS de 900 s**

### 5.3 Resultados para a Linha Sul eletricamente separada

#### 5.3.1 Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

A tabela a seguir resume a tensão mínima de alimentação do trem e o potencial máximo dos trilhos para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os piores casos:

Variante	Tensão mínima de alimentação do trem em V	Potencial máximo de trilhagem em V
Operação normal	2 597	-42
OUT_CAJ	<b>2 162</b>	-64
OUT_SHO	2 301	-50
OUT_REC	2 190	<b>68</b>

Tabela 5-11: Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

#### 5.3.2 Demanda de potência do transformador e do retificador

A tabela a seguir resume a demanda máxima de potência do transformador e do retificador para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência máx. [kVA]	Potência máx. [kVA]	Variante
TR_CAJ	1	3 820	4 413	OUT_SHO
	2	3 820	4 413	OUT_SHO
	3	3 820	4 413	OUT_SHO
TR_SHO	1	<b>4 258</b>	<b>5 881</b>	OUT_CAJ
	2	<b>4 258</b>	<b>5 881</b>	OUT_CAJ
TR_REC	1	2 905	3 867	OUT_SHO
	2	2 905	3 867	OUT_SHO
	3	2 905	3 867	OUT_SHO

Tabela 5-12: Demanda máxima de alimentação do transformador (1 s)



A tabela a seguir resume a demanda de potência do transformador e do retificador RMS de 900 s para operação normal e em diferentes casos de interrupção de uma subestação. Os resultados destacados indicam os valores máximos.

		Situação operacional		
		Base	Pior caso de interrupção	
Subestação	Conjunto retificador/transformador	Potência r.m.s. [kVA]	Potência r.m.s. [kVA]	Variante
TR_CAJ	1	1 258	1 885	OUT_SHO
	2	1 258	1 885	OUT_SHO
	3	1 258	1 885	OUT_SHO
TR_SHO	1	<b>1 621</b>	<b>2 833</b>	OUT_CAJ
	2	<b>1 621</b>	<b>2 833</b>	OUT_CAJ
TR_REC	1	1 157	1 812	OUT_SHO
	2	1 157	1 812	OUT_SHO
	3	1 157	1 812	OUT_SHO

**Tabela 5-13: Demanda de potência do transformador e do retificador RMS de 900 s**

## 6 Avaliação

### 6.1 Geral

Os resultados mostram que os parâmetros elétricos das linhas Centro e Sul operando separadamente e como uma rede única são quase os mesmos. As linhas, quando separadas, operam em condições menos exigentes para o sistema em comparação com a operação das linhas eletricamente combinadas.

Portanto, a avaliação a seguir é feita para a rede completa (linhas combinadas).

### 6.2 Avaliação dos resultados

#### 6.2.1 Tensão mínima de alimentação do trem e potencial máximo dos trilhos

Os resultados demonstram que a tensão mínima de alimentação é 2.587 V em caso de operação normal e 2.156 V no pior caso de interrupção. O valor permanece acima das exigências mínimas de 2.100 V.

De acordo com a Norma Internacional IEC 62128-1, o potencial dos trilhos não deve ser maior que uma tensão contínua de 120 V. Durante menos de 300 segundos, o limite é 150 V e aumenta para 170 V durante 1 segundo.

O potencial máximo dos trilhos durante uma operação normal é 115 V e, no pior caso de interrupção, é 133 V; estes valores atendem aos requisitos de acordo com a IEC 62128-1.

#### 6.2.2 Demanda de potência do transformador de tração

A demanda máxima de potência em regime permanente (RMS) para um transformador é de 1.691 kVA em SSR SHO em caso de operação normal e 2.831 kVA em SSR SHO no pior caso de interrupção (OUT\_CAJ). A potência RMS do transformador para operação normal e para o pior caso de interrupção está abaixo da potência nominal de 3.000 kVA de cada transformador. Portanto, as subestações do Metrorec estão dimensionadas para atender à demanda futura total em regime permanente.

Entretanto, para se avaliar a demanda máxima instantânea de 1 s, torna-se relevante verificar as limitações dos dispositivos de proteção da entrada em 69 kVca das subestações. Conforme descrito no documento de referência DC-RD11, a Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) impôs que as proteções de entrada de cada SSR do Metrorec fossem ajustadas para atuar em 1 s caso a subestação tenha uma sobrecarga de 150% neste intervalo. Como os grupos retificadores representam praticamente a carga total da SSR, a potência deles reflete aproximadamente a demanda total da SSR.

Pela tabela 5-2, verifica-se que a SSR IPI pode ter uma demanda acima de 150% de sua potência nominal por 1 s (4.751 kVA) em condições normais de operação, o que significa que eventualmente a proteção de entrada desta subestação irá atuar e a desligará. Caso isto ocorra, a SSR REC terá uma demanda acima de 150% por 1 s (4.959 kVA) e, portanto, também irá desligar. Com duas subestações fora de serviço, todas as SSR's se desligariam na sequência para evitar grandes sobrecargas dos equipamentos.

Dessa forma, verifica-se que a SSR IPI precisa de um reforço de potência para que não haja risco de queda sequencial das subestações do Metrorec, o que causaria a interrupção total da operação.

Além disso, a SSR SHO atinge valores de demanda próximos de 150% da carga nominal (4.325 kVA) em operação normal e, por isso, também possui o risco de eventualmente ultrapassar o limite de proteção. Portanto é também importante que ela tenha um reforço de potência.

A SSR ROD atinge uma sobrecarga muito próxima de 150% em situação de contingência, por isso é importante se verificar a necessidade de reforçá-la eletricamente.

### 6.2.3 Corrente nos alimentadores de 3 kVcc

A corrente máxima RMS em um alimentador é de 842 A em caso de operação normal e 1.083 A no pior caso de interrupção. Como a corrente nominal de operação dos disjuntores alimentadores (3 kVcc) é de 2.000 A (vide DC-RD12), verifica-se que o equipamento está adequadamente dimensionado para operação em regime permanente.

No entanto, conforme DC-RD11, os relés de proteção dos disjuntores de 3 kVcc estão ajustados para atuação instantânea caso a corrente atinja um valor de 2.400 A. Este limite de proteção não poderia ser aumentado por conta de restrições de corrente dos componentes do sistema de rede aérea (catenária).

Pela tabela 5-4, observa-se que alguns alimentadores da SSR IPI e COQ podem carregar uma corrente acima de 2.400 A em condições normais de operação, o que implicaria na abertura dos seus respectivos disjuntores. Com a queda desses alimentadores, vários outros disjuntores poderiam ter uma corrente instantânea maior do que 2.400 A, o que causaria o desligamento sequencial de todas as SSR's.

Assim como no caso da análise de potência demandada, em relação à limitação de corrente nos alimentadores a SSR IPI é um local crítico que precisa de reforço. A SSR COQ apresenta um único alimentador com sobrecorrente por 1 s, sendo que este alimenta a Linha Centro no sentido da SSR IPI. Portanto, constata-se que o trecho IPI-COQ é crítico em termos de sobrecarga e sobrecorrente.

Ainda na tabela 5-4, observa-se que em situação de contingência todos os alimentadores de 3 kVcc da SSR SHO podem ter uma corrente acima de 2.400 A. Por isso esta SSR também consiste em um local que precisa de reforço.

### 6.2.4 Corrente na rede aérea

A corrente que circula pela rede aérea apresenta alguns picos (1 s) acima de 2.000 A em alguns trechos de ambas as linhas. Tais valores não devem causar sobreaquecimento da rede aérea, desde que os cabos estejam em condições de suportar sobrecorrentes de curta duração.

### 6.2.5 Frenagem regenerativa

Conforme solicitado na documentação recebida para os dados de entrada da simulação, este estudo foi feito para avaliação da demanda operacional futura das linhas, com 100% da frota com trens da CAF, especificados na seção 3.5. Tais trens possuem sistema de frenagem regenerativa, que pode trazer uma contribuição relevante para a redução do consumo de energia elétrica do sistema.

Para o Metrorec estimou-se que a contribuição da energia proveniente de frenagem regenerativa pode chegar, no total, a 35% do conteúdo energético que circula pelo sistema de tração (3 kVcc). Este percentual só poderia ser atingido em condições ideais de operação, com circulação de trens contínua e headway praticamente constante. Dessa forma, principalmente no trecho com headway menor (REC-COQ, 3 min) os trens em aceleração aproveitariam a energia dos trens em frenagem próximos. As condições ideais de operação (carrossel contínuo) não dependem apenas da confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico, mas também de outros sistemas importantes para o metrô (sinalização, SCADA, material rodante, entre outros), que precisam possuir os recursos necessários para manter o pleno controle dos trens e das linhas.

Um fator relevante para o conteúdo energético de frenagem regenerativa são os gradientes ao longo da via. Os trens acelerando em aclives podem aproveitar a energia regenerada por trens freando em declives, de forma a reduzir a carga das subestações retificadoras e melhorar o balanço energético das linhas.

## 7 Conclusão

### 7.1 Considerações

Este estudo foi completamente baseado em informações de entrada, referenciadas pelos documentos da tabela 2-2, e em solicitações e dados complementares enviados pela CBTU por e-mail. Conforme descrito anteriormente neste documento, algumas premissas foram adotadas para dados necessários à execução da simulação, com base na experiência do departamento de eletrificação metro-ferroviária da Siemens, uma vez que algumas informações não estavam 100% completas nos documentos de referência. Portanto, os resultados deste relatório refletirão a realidade de forma integral apenas se as linhas do Metrô de Recife operarem em conformidade com as premissas e os parâmetros de entrada descritos ao longo do documento.

Baseando-se na avaliação dos resultados feita na seção 6 e considerando-se o exposto no parágrafo anterior, é possível se encontrar alguns pontos de melhoria do sistema elétrico para que este opere confiavelmente no futuro.

### 7.2 Indicação de ações baseada nos resultados

A avaliação do sistema de alimentação elétrica do Metrô de Recife mostra que, em regime permanente, a instalação atenderia à demanda futura em relação aos parâmetros verificados de potência, tensão de alimentação e potencial dos trilhos. **Analisando-se exclusivamente a capacidade e especificações dos equipamentos das subestações, com base no ciclo *heavy duty traction – class VI* (150% da carga por 2 horas e 300% por 1 minuto), verifica-se que eles estão adequadamente dimensionados.**

Entretanto, quando são incluídas as limitações de proteção das subestações na análise, conforme seção anterior, constata-se que há algumas subestações em condição crítica que eventualmente ocasionarão o desligamento de todo o sistema de alimentação elétrica dos trens.

Inicialmente, como os equipamentos das subestações (excluindo-se os cabos) são dimensionados para suportar uma carga consideravelmente maior do que as proteções estão configuradas para permitir **(as proteções estão ajustadas para 150% de sobrecarga por 1 s no lado de 69 kVca e 2.400 A no lado de 3 kVcc)**, torna-se necessário avaliar se as proteções podem ser reajustadas para limites maiores. A definição de ações a serem adotadas no sistema por causa dos limites das proteções pode ser feita a partir dos seguintes passos:

1. Avaliar a alteração da configuração dos limites de proteção dos relés (reajuste / aumento dos limites), desde que os equipamentos do sistema suportem valores maiores de carga / corrente;
2. Substituir os relés de proteção por dispositivos mais modernos, a fim de se obter outras funções de proteção (mais flexibilidade) e tornar o sistema mais seletivo;
3. Substituir disjuntores e outros possíveis equipamentos, caso eles não sejam capazes de suportar uma corrente e carga maior quando se fizer o reajuste das proteções;
4. Ampliar e/ou construir subestações, caso as ações anteriores não sejam viáveis.

Em relação ao passo 1, sabe-se que o limite de proteção da entrada em 69 kVca, 150% de sobrecarga por 1 s, vem da própria concessionária de energia (Celpe), ou seja, em princípio não haveria flexibilidade para se reajustar a proteção. Por isso, esta proteção não poderia ser alterada.

O limite de proteção em 3 kVcc, de 2.400 A, foi estabelecido em princípio por causa de restrições dos componentes de catenária. Além disso, não se sabe exatamente quais são as condições de instalação dos cabos que alimentam a catenária a partir das subestações, o que traz outro fator limitante ao reajuste da proteção. Portanto, esta proteção só poderia ser alterada após uma avaliação detalhada das instalações em campo, principalmente dos cabos e da rede aérea. Por fim, o aumento do limite da proteção em 3 kVcc está condicionado à proteção de entrada em 69 kVca, sendo esta outra restrição para o ajuste da proteção em 3 kVcc.

Considerando-se as restrições que existem para se alterar os limites de proteção, principalmente a determinação da Celpe, a substituição dos relés de proteção (passo 2) se torna um passo não prioritário, mas que pode ser realizado ao longo do tempo para se modernizar o sistema.

Mantendo-se as configurações de proteção da forma como estão atualmente, por conta das restrições mencionadas nos parágrafos anteriores, do ponto de vista de capacidade se torna irrelevante fazer a substituição de disjuntores (passo 3).

Por fim, considerando-se o que foi exposto acima, o passo 4 se torna bem importante, uma vez que não existe flexibilidade para se alterar as proteções.

Pelas análises de potência e corrente feitas na seção anterior, verifica-se que a SSR IPI é um local crítico para a Linha Centro, uma vez que nesta subestação pode haver 150% de sobrecarga por 1 s em condições normais de operação e a corrente em alimentadores de 3 kVcc pode ultrapassar 2.400 A. Uma vez que a SSR IPI já possui três grupos retificadores, e considerando que a SSR COQ também apresenta nível de corrente crítico em um de seus alimentadores, uma possível forma para se reforçar o sistema no trecho IPI-COQ seria através da instalação de dois grupos retificadores (3 MW cada) no local onde hoje se encontra a CSP WEK.

Outro local que pode enfrentar condições críticas de operação é a SSR SHO. Esta subestação possui dois grupos retificadores e, portanto, para se reduzir a carga dos equipamentos atuais, ela pode ser ampliada através de mais um grupo retificador de 3 MW (ampliação da SSR de 6 MW para 9 MW no total).

Porém, a SSR REC também pode acabar operando em condições acima do limite das proteções, em caso de queda da SSR IPI, por isso ela também precisa de um reforço de potência. Uma alternativa para se evitar que a SSR REC e, inclusive, a SSR SHO opere em sobrecarga consiste na instalação de dois grupos retificadores de 3 MW no local da CSP PAZ. Esta opção fará com que o sistema elétrico da Linha Sul opere com mais folga e elimina a necessidade de ampliação da SSR SHO.

A instalação de grupos retificadores no local da CSP PAZ também contribui para se evitar que a SSR CAJ opere em sobrecarga de 150% na situação de queda da SSR SHO.

Em relação à SSR ROD, para se evitar que ocorra um potencial desligamento da subestação por causa de sobrecarga na situação de queda da SSR COQ, há a alternativa de se construir uma nova SSR de 3 MW no local da estação GIB, que é a ponta da linha.

Todas as novas instalações indicadas também contribuiriam para uma melhora nas condições de queda de tensão na rede aérea e potencial entre o negativo e o terra (tensão terra-trilho). Dessa forma, possíveis problemas com essas grandezas em situações de contingência poderiam ser evitados. Adicionalmente, as novas subestações criariam outros caminhos de retorno de corrente, minimizando os picos de corrente de retorno nas subestações existentes.

A figura a seguir representa o que foi descrito nesta seção:

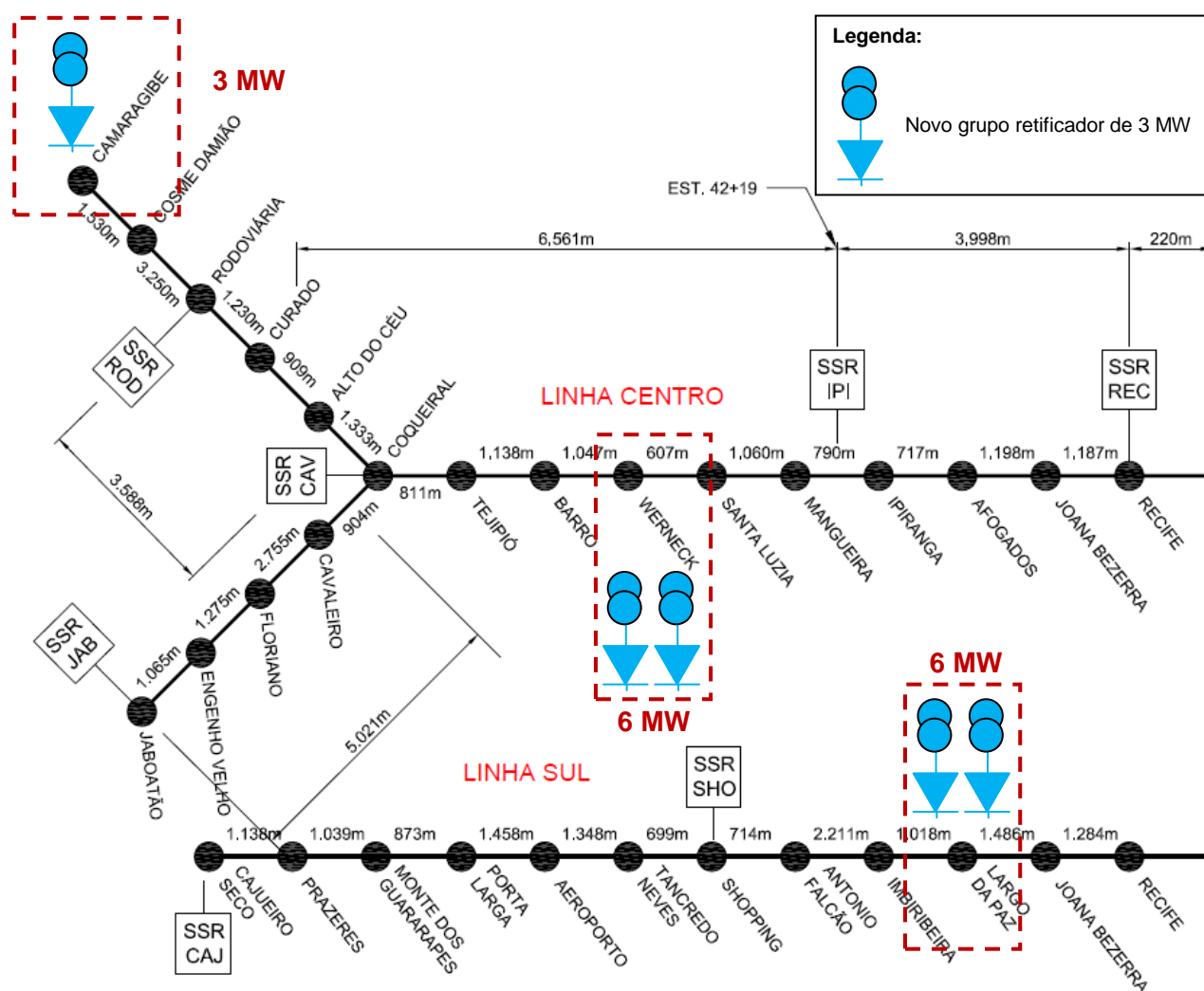


Figura 7-1: Indicação de possíveis locais de instalação para novos grupos retificadores