

ALBERTH JOSÉ SILVA SOUTO
RODRIGO TADEU BERNARDES
TOMAS TOLEDO ARRUDA

ESTUDO DE CASO DE CARREGAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO
DE TRAÇÃO DA LINHA 9 – ESMERALDA

São Paulo
2012

ALBERTH JOSÉ SILVA SOUTO
RODRIGO TADEU BERNARDES
TOMAS TOLEDO ARRUDA

ESTUDO DE CASO DE CARREGAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO
DE TRAÇÃO DA LINHA 9 – ESMERALDA

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para
obtenção de título de especialista em
Tecnologia Metroferroviária

Área de concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Lobo Pires

São Paulo
2012

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado às três mulheres da minha vida: mãe, esposa e irmã.

Alberth José Silva Souto

Dedico este trabalho à minha esposa, Patrícia, pela paciência e compreensão, aos meus pais (Amaury e Leda) e às minhas irmãs (Luciene e Regiane), que sempre estiveram ao meu lado.

Rodrigo Tadeu Bernardes

Pelo apoio e compreensão incondicionais, e pelas palavras de encorajamento fundamentais na conclusão de mais esta etapa de nossas vidas, dedico este trabalho a minha companheira Ana Paula.

Tomás Toledo Arruda

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Cassiano Lobo Pires, que durante o curso de “Tecnologia Metroferroviária” no PECE já se mostrou solícito em nos orientar nesta empreitada, auxiliando-nos com os artigos, com a sua tese de doutorado (maior documentação em simulação elétrica que conheço) e, adicionalmente, pelas infinitas idéias, apoio, sugestões e correções para melhoria contínua deste trabalho.

Ao Eng. Mauro Issamu Kamitani, pelo incentivo, pelas opiniões concretas, pelas correções e pela participação “full-time” na confecção do desenvolvimento e validação do trabalho.

Aos colegas de CPTM que contribuíram para execução dos testes em campo, sem os quais não teríamos conseguido desenvolver este trabalho - Engenheiros Marcos Lira de Almeida, Fabrício Matos Souto, José Américo Pelloso e Neemias Xavier Pereira dos Santos e aos Técnicos Robson Eduardo Gomes, Onivaldo Pereira da Silva e Valdivino Romais.

RESUMO

A proposta do presente trabalho é desenvolver uma nova metodologia de simulação elétrica que permita uma análise rápida das diferentes situações de carga, possibilitando um melhor ajuste das proteções, bem como a compreensão das situações limites de suportabilidade de alguns componentes. Neste sentido, o trabalho é iniciado pela apresentação do estado da arte em relação à simulação elétrica de tração. O capítulo seguinte é dedicado ao desenvolvimento do modelo a ser aplicado, ou seja, a modelagem dos sistemas presentes: instalações elétricas e material rodante. Após esta passagem, é dedicada especial atenção para a instrumentação do “trem-teste” e subestações retificadoras. O capítulo seguinte é voltado para caracterização do trecho de análise, do desenvolvimento das medições e ensaios de campo. Posteriormente são apresentadas as simulações elétricas realizadas e pormenorizados os resultados obtidos. Por fim um capítulo é integralmente dedicado à criação de cenários, representando condições operacionais atuais, futuras e contingenciais para ilustração do modelo proposto.

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a new simulation methodology that allows a fast electrical analysis of different load situations, allowing a better adjustment of the protections and understanding the limits of situations supportability of some components. In this sense, the work begins with the presentation of the state of the art regarding the simulation of electric traction. The next chapter is devoted to developing the model to be applied, ie the modeling of the existing systems: electrical and rolling stock. After this passage, special attention is devoted to the instrumentation of "train-test" and rectifier substations. The next chapter is focused on characterization of the section of analysis, development of measurements and field trials. Later electrical simulations performed and the results are presented. Finally a chapter is fully devoted to creating scenarios representing current operating conditions, and future contingency for illustration of the proposed model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 A Linha 9 – Esmeralda da CPTM	17
1.2 Objetivo	19
2 ESTADO DA ARTE	20
2.1 Simulação elétrica	21
3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	24
3.1 Subestações retificadoras	24
3.1.1 Modelamento das subestações retificadoras da Linha 9	25
3.2 Rede aérea de tração – CPTM	28
3.2.1 Modelamento da rede aérea de tração da Linha 9	30
3.3 Cabines de seccionamento e de paralelismo - CPTM	31
3.3.1 Modelamento das cabines da Linha 9	32
3.4 Circuito de retorno – CPTM	33
3.4.1 Circuito de retorno e aterramento – CPTM	34
3.4.2 Modelamento do circuito de retorno da Linha 9	35
3.5 Resistências do circuito de tração da Linha 9	36
3.6 Frotas de trens da Linha 9	36
3.6.1 Modelamento da frota circulante da Linha 9	37
3.7 Introdução ao modelamento	38
3.8 Modelo proposto	39
3.9 Instrumentações	43
3.9.1 “Trem-teste” - Série 2070	43
3.9.2 Subestações Morumbi e Cidade Dutra	45
4 Verificação da aplicabilidade do modelo	50
4.1 Trecho de análise	50
4.2 Medições em vazio	52
4.3 Cálculo de RSE	55
4.4 Ensaio em campo	56

4.4.1	Execução do teste	56
4.5	“Foto” do sistema de tração	59
4.5.1	Considerações para verificação da aplicabilidade do modelo	59
4.6	Instante de tempo escolhido para verificação da aplicabilidade.....	64
4.7	Ratificação do modelo.....	66
4.7.1	Localização de trens e instalações	66
4.7.2	Cálculo das resistências equivalentes da rede aérea de 3 kVCC e circuito de retorno	68
4.7.3	Correntes associadas aos trens não instrumentados	69
4.7.4	Correntes registradas nas subestações Morumbi e Cidade Dutra.....	72
4.7.5	Simulação - Considerações sobre frenagem e restrições do modelo....	72
4.7.6	Simulação - PSIM 6.0	73
4.7.7	Resultados - Simulação	75
4.7.8	Resultado – Diminuição do erro relativo	81
5	Cenários.....	87
5.1	Descrições dos cenários	87
6	Conclusão	104
ANEXO A		106
ANEXO B		108
ANEXO C		115
ANEXO D		117
ANEXO E		123
ANEXO F		125
ANEXO G		127
LISTA DE REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....		159

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da Linha 9 - Esmeralda	17
Figura 2 – Evolução do número de usuários e da frota de trens disponível na Linha 9.....	18
Figura 3 – Modelo Simplificado de uma subestação retificadora	24
Figura 4 – Retificador 12 pulsos, não controlado da Linha 9 - CPTM, Fonte: Komatsu et. al, 2010.....	27
Figura 5 – Circuito equivalente de uma subestação retificadora	27
Figura 6 – Esquema da rede aérea de tração	29
Figura 7 – Interação pantógrafo – Rede aérea.....	30
Figura 8 – Diagrama unifilar de cabine de Seccionamento (a) e cabine de Paralelismo (b)	32
Figura 9 – Trem Série 2070 (Fabricante Alstom/Bombardier/CAF) e Trem Série 3000 (Fabricante Siemens)	36
Figura 10 – Trem Série 7000 (Fabricante CAF) e Trem Série 7050 (Fabricante CAF)	37
Figura 11 – Painel sinóptico CCO – Região de interligação da Linha 8 com a Linha 9.....	42
Figura 12 – “Trem-teste” Série 7000 e detalhe do sensor de corrente	45
Figura 13 – Detalhes da instalação do cabeamento junto ao trem.....	45
Figura 14 – Diagrama unifilar de 3 kVCC das Subestações Morumbi e Cidade Dutra.....	48
Figura 15 – Instalação dos Yokogawa modelo DL750P nas subestações	49
Figura 16 – Diagrama simplificado da Rede Aérea entre a Subestação Morumbi e o fim da eletrificação da Linha 9	51
Figura 17 – Yokogawa – Medição a vazio - SE Cidade Dutra.....	55
Figura 18 – Curvas dos trens CAF e COFESBRA II AW0.....	63
Figura 19 – Painel sinóptico do CCO às 17:27:34 do dia 04.04.2012 entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú	65
Figura 20 – Circuito elétrico equivalente – Correntes referidas aos trens não instrumentados para verificação da aplicabilidade do modelo.....	79

Figura 21 – Simulação circuito elétrico equivalente – Curvas e resultados PSIM 6.0 – Correntes referidas aos trens não instrumentados para verificação da aplicabilidade do modelo	80
Figura 22 – Circuito elétrico equivalente corrigido – Fonte de corrente em V1S respectiva a MVO1	84
Figura 23 – Simulação circuito elétrico equivalente corrigido – Curvas e resultados PSIM 6.0 – Fonte de corrente em V1S respectiva a MVO1	85
Figura 24 – Relatório de acompanhamento de trens no CCO – Parte I	106
Figura 25 – Relatório de acompanhamento de trens no CCO – Parte II	107
Figura 26 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC453 às 17:35:50.....	108
Figura 27 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC454 às 16:49:07.....	109
Figura 28 – (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC818 às 16:55:15	110
Figura 29 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC455 às 17:25:13.....	111
Figura 30 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC829 às 17:21:50.....	112
Figura 31 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC816 às 17:05:07.....	113
Figura 32 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC831 às 17:16:02.....	114
Figura 33 – Corrente circulante pelos alimentadores MSO1 e MSO2 da subestação Morumbi às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa.....	115
Figura 34 – Corrente circulante pelos alimentadores CSO1, CSO2, CIN1 e CIN2 da subestação Cidade Dutra às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa.....	116
Figura 35 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 100 amostras referidas aos trens não instrumentados	117
Figura 36 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 100 amostras referidas aos trens não instrumentados	118

Figura 37 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras iniciais referidas aos trens não instrumentados.....	119
Figura 38 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras iniciais referidas aos trens não instrumentados	120
Figura 39 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras finais referidas aos trens não instrumentados	121
Figura 40 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras finais referidas aos trens não instrumentados	122
Figura 41 – Circuito elétrico equivalente – Resistência das subestações elevada para $RSE = 2G\Omega$	123
Figura 42 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Resistência das subestações elevada para $RSE = 2G\Omega$	124
Figura 43 – Soma e corrente circulante pelos alimentadores MSO1, MSO2, MVO1 e MVO2 da subestação Morumbi às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa.....	125
Figura 44 – Painel sinóptico do CCO às 17:27:34 – Trecho Ceasa – Granja Julieta	126
Figura 45 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 1.....	127
Figura 46 – Simulação, curvas e resultados do cenário 1.....	128
Figura 47 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 2.....	129
Figura 48 – Simulação, curvas e resultados do cenário 2.....	130
Figura 49 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 3.....	131
Figura 50 – Simulação, curvas e resultados do cenário 3.....	132
Figura 51 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 4.....	133
Figura 52 – Simulação, curvas e resultados do cenário 4.....	134
Figura 53 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 5.....	135
Figura 54 – Simulação, curvas e resultados do cenário 5.....	136
Figura 55 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 6.....	137
Figura 56 – Simulação, curvas e resultados do cenário 6.....	138
Figura 57 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 7.....	139
Figura 58 – Simulação, curvas e resultados do cenário 7.....	140
Figura 59 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 8.....	141

Figura 60 – Simulação, curvas e resultados do cenário 8.....	142
Figura 61 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 9.....	143
Figura 62 – Simulação, curvas e resultados do cenário 9.....	144
Figura 63 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 10.....	145
Figura 64 – Simulação, curvas e resultados do cenário 10.....	146
Figura 65 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 11.....	147
Figura 66 – Simulação, curvas e resultados do cenário 11.....	148
Figura 67 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 12.....	149
Figura 68 – Simulação, curvas e resultados do cenário 12.....	150
Figura 69 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 13.....	151
Figura 70 – Simulação, curvas e resultados do cenário 13.....	152
Figura 71 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 14.....	153
Figura 72 – Simulação, curvas e resultados do cenário 14.....	154
Figura 73 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 15.....	155
Figura 74 – Simulação, curvas e resultados do cenário 15.....	156
Figura 75 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 16.....	157
Figura 76 – Simulação, curvas e resultados do cenário 16.....	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potência das Subestações Retificadoras da Linha 9	26
Tabela 2 – Cabines da Linha 9 – Esmeralda	32
Tabela 3 – Relatório de Eventos SGDO	41
Tabela 4 – Características do Trem Série 2070	43
Tabela 5 – Características dos transformadores das Subestações Morumbi e Cidade Dutra	46
Tabela 6 – Características dos retificadores das Subestações Morumbi e Cidade Dutra	47
Tabela 7 - Tensões medidas no TP de entrada da subestação Cidade Dutra	53
Tabela 8 – Tensões medidas no TP de entrada da Subestação Morumbi	54
Tabela 9 – Tempos de chegada e carregamento na primeira viagem	57
Tabela 10 – Tempos de chegada e carregamento na segunda viagem	58
Tabela 11 – Frotas e quantidades de trens circulando no dia 04.04.2012	62
Tabela 12 – Trens presentes às 17:27:34 do dia 04.04.2012 entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú, com respectiva série	64
Tabela 13 – Posição quilométrica das instalações fixas	66
Tabela 14 – Relatório SGDO de posicionamento dos trens	67
Tabela 15 – Posicionamento dos trens metropolitanos	68
Tabela 16 – Distância entre instalações fixas s trens na V1S	68
Tabela 17 – Distância entre instalações fixas s trens na V2S	68
Tabela 18 – Resistências entre instalações fixas s trens na V1S	69
Tabela 19 – Resistências entre instalações fixas s trens na V2S	69
Tabela 20 – Status do “trem-teste”	70
Tabela 21 – Correntes registradas pelo “trem-teste” sem correção	71
Tabela 22 – Correntes registradas pelo “trem-teste” corrigidas para os trens não instrumentados	71
Tabela 23 – Correntes registradas pelos alimentadores das subestações	72
Tabela 24 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes - Disjuntores de 3 kVCC	76
Tabela 25 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes secundárias	76

Tabela 26 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo	78
Tabela 27 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC	79
Tabela 28 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC	81
Tabela 29 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes secundárias	81
Tabela 30 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo	82
Tabela 31 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo	83
Tabela 32 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC	84
Tabela 33 – Resultados - Cenários 1 e 2	91
Tabela 34 – Resultados - Cenários 3, 4 e 5	93
Tabela 35 – Resultados - Cenários 6, 7 e 8	94
Tabela 36 – Resultados - Cenários 9, 10 e 11	96
Tabela 37 – Resultados - Cenários 12, 13 e 14	99
Tabela 38 – Resultados - Cenários 15 e 16	101
Tabela 39 – Resumo dos resultados - Cenários 1 à 16	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C – Graus Celsius

A – Ampere (unidade de corrente)

AT – Alta Tensão

AUT – Estação Autódromo

BRR – Estação Berrini

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CCO – Centro de Controle Operacional

CDU – Cidade Dutra

CEA – Estação Ceasa

CIN1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Interlagos da SE Cidade Dutra

CIN2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Interlagos da SE Cidade Dutra

CJD – Estação Cidade Jardim

CP – Cabine de Paralelismo

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

CS – Cabine de Seccionamento

CSO1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Socorro da SE Cidade Dutra

CSO2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Socorro da SE Cidade Dutra

GJT – Estação Granja Julieta

GRA – Estação Grajaú

HBR – Estação Hebraica-Rebouças

IHM – Interface Homem Máquina

ILE – Estação Imperatriz Leopoldina

INT – Estação Primeira-Interlagos

JAG – Estação Jaguaré

JOS1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Osasco da SE Jaguaré

JOS2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Osasco da SE Jaguaré

JUR – Estação Jurubatuba

JVO1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Vila Olímpia da SE Jaguaré

JVO2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Vila Olímpia da SE Jaguaré

MRB – Morumbi

MSO1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Socorro da SE Morumbi

MSO2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Socorro da SE Morumbi

MVO1 – Disjuntor alimentador da via 1, sentido Vila Olímpia da SE Morumbi

MVO2 – Disjuntor alimentador da via 2, sentido Vila Olímpia da SE Morumbi

OSA – Osasco

PAL – Estação Presidente Altino

PIN – Estação Pinheiros

PVS – Plano de Vias Sinalizado

RSE – Resistência equivalente

SAM – Santo Amaro

SE – Subestação

SITRAS® – Relé de proteção, fabricante Siemens

SGDO – Sistema de Gerenciamentos de Dados Operacionais

SOC – Socorro

STO – Sistema de Transmissão Óptico

TE – Terra Externo

TP – Transformador de Potencial

TUE – Trem Unidade Elétrico

TV – Terra do sistema de tração

USP – Estação Cidade Universitária

UTR – Unidade de Transmissão Remota

V – Volt (unidade de tensão)

V1S – Via 1 da Linha 9

V2S – Via 2 da Linha 9

VOL – Estação Vila Olímpia

W – Watt (unidade de potência)

1 INTRODUÇÃO

1.1 A Linha 9 – Esmeralda da CPTM

A Linha 9 – Esmeralda da CPTM liga as estações Osasco a Grajaú na cidade de São Paulo, perfazendo um total de 31,8 km com tempo de viagem aproximado (operação-padrão) de 42 minutos (ida e volta), em 2 (duas) vias denominadas V1S (Osasco para Grajaú) e V2S (Grajaú para Osasco).

Esta possui 18 estações: Osasco, Presidente Altino, Ceasa, Villa-Lobos/Jaguare, Cidade Universitária, Pinheiros, Hebraica-Rebouças, Cidade Jardim, Vila Olímpia, Berrini, Morumbi, Granja Julieta, Santo Amaro, Socorro, Jurubatuba, Autódromo, Primavera-Interlagos e Grajaú (Figura 1).



Linha 9 - Esmeralda

Figura 1 – Mapa da Linha 9 - Esmeralda

A Linha 9 – Esmeralda funciona entre 04h00 e 24h00. Nos sábados, a operação inicia às 04h00, e se encerra às 01h00 do domingo. Atualmente, nos dias úteis, a CPTM pratica operações diferenciadas em horários de vale e pico específicos. Os horários de vale da CPTM compreendem os períodos das 04h00 às 06h00; das 08h45 às 16h45 e das 19h40 às 24h00 onde o “headway” (intervalo entre trens) está entre 07min e 08min. Os horários de pico ou “rush” compreendem os períodos das 06h00 às 08h45 e das 16h45 às 19h40 onde o “headway” médio é inferior a 4 minutos. Também é adotada a estratégia de “looping interno” entre as estações Pinheiros e Jurubatuba, para atendimento do trecho de maior demanda da linha.

A demanda média de passageiros transportados em dias úteis sofreu aumento de aproximadamente 60% entre o fim de 2010 e o fim de 2011 (Figura 2).

Este aumento, já esperado, foi causado principalmente pelo início da operação da linha 4 Amarela do Metro e integração com a CPTM na estação Pinheiros. Para o

atendimento desta demanda, a CPTM aumentou para 8 o número de carros dos trens e vem diminuindo o intervalo entre trens para atuais 4 minutos no horário de pico, visando os 3 minutos do Plano de Expansão do Governo do Estado de São Paulo.

Este fato provocou o aumento do número de ocorrências de aberturas dos disjuntores de alimentação da rede aérea, e consequente necessidade de aumento da calibração destes disjuntores. Este fato, evidenciou que a CPTM não possuía uma ferramenta que auxiliasse a determinar para que valor a calibração destes disjuntores deveria ser alterada. Surgiu então a necessidade de executar este estudo sem a necessidade de ferramentas complexas existentes no mercado hoje, que demandam de enorme número de informações de campo e demandam muito tempo para a sua implementação.

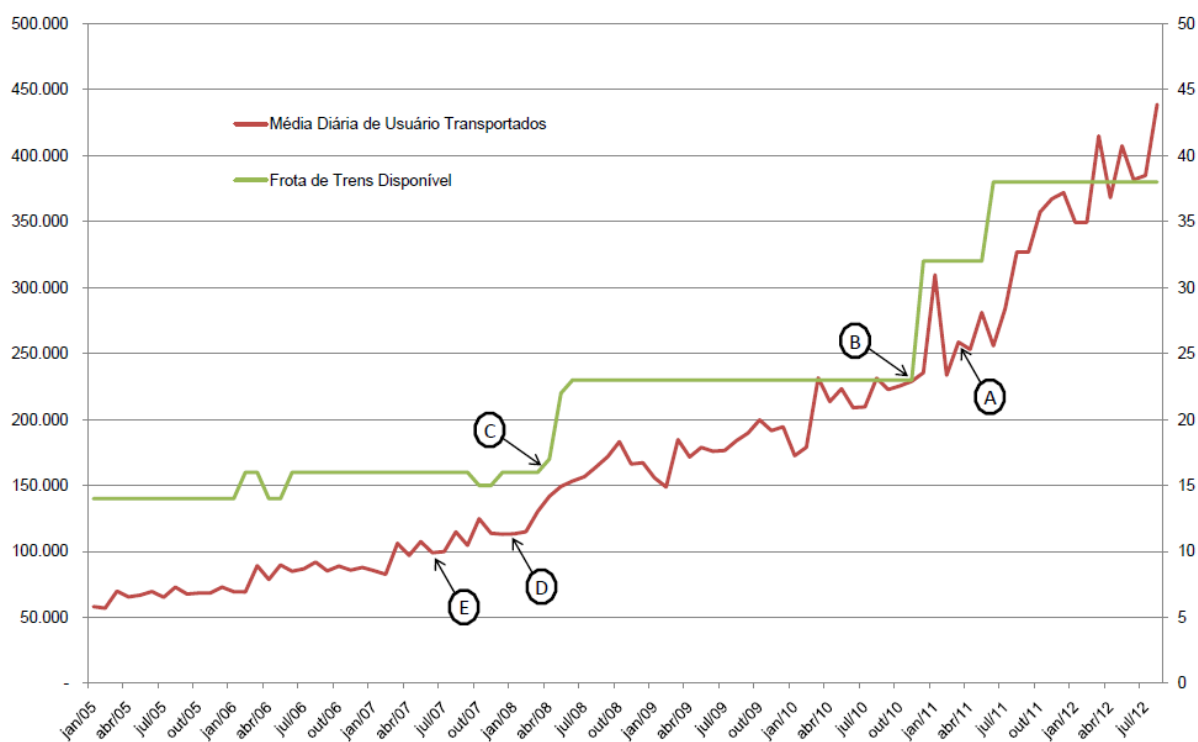


Figura 2 – Evolução do número de usuários e da frota de trens disponível na Linha 9

Eventos:

- A – Início da transferência gratuita para a Linha 4 – Amarela na estação Pinheiros;
- B – Chegada dos trens da série 7000;
- C – Chegada dos trens da série 2070;
- D – Inauguração das estações Grajaú e Interlagos;
- E – Inauguração da estação Autódromo.

1.2 Objetivo

O objetivo do presente estudo é desenvolver uma nova metodologia de simulação elétrica que permita uma análise rápida das diferentes situações de carga, possibilitando um melhor ajuste das proteções, bem como a compreensão das situações limites de suportabilidade de alguns componentes. Este novo método é baseado em informações obtidas através de medições de campo e não depende de informações de características civis da via e mecânicas dos trens para realizar uma simulação do sistema de alimentação elétrica da tração, possibilitando a análise de cenários operacionais futuros e/ou de contingência.

Para tal foi escolhida a linha 09 Esmeralda da CPTM, que conforme apresentado, encontrasse em situação crítica.

2 ESTADO DA ARTE

A simulação da tração elétrica ferroviária não é um assunto novo e data das primeiras linhas de bondes eletrificados implantadas. Esta consiste no modelamento, equacionamento e resolução deste sistema que pode ser dividido, quanto ao tipo de grandezas a serem equacionadas, em três grupos equações:

- A energia necessária para vencer as forças de resistências ao movimento dos trens (carga mecânica);
- O Sistema de alimentação elétrica dos trens;
- O sistema motor dos trens, que transforma a carga mecânica em carga elétrica.

Para se determinar a potência necessária e o consumo de energia para o movimento de um trem, é necessário conhecer os dados do trem, as velocidades desejadas e os parâmetros da via. Desta maneira, os cálculos das grandezas relativas à tração podem ser divididos em três passos, para cada instante de tempo em cada ponto da via. O primeiro passo consiste no cálculo do esforço motor necessário, pela soma das resistências ao movimento e da aceleração do trem. De início, somente os pontos críticos da via são avaliados, visto que são os pontos onde os maiores esforços de tração são esperados. Em seguida, é verificado se este esforço motor não ultrapassa os limites impostos pela força de aderência entre a roda do trem e o trilho. Após estabelecer a característica total do veículo de tração, o processo de cálculos é finalizado através da determinação, ponto a ponto ao longo de toda a via, do tempo de percurso e do aquecimento das máquinas elétricas e outros elementos. Caso os limites sejam ultrapassados, o esforço motor é corrigido. Por fim, a potência desenvolvida pelo trem é obtida através do produto entre o esforço motor e a velocidade a ele associada (Filipovic, 1995).

2.1 Simulação elétrica

A simulação de marcha de um trem em um sistema ferroviário depende de informações como geometria da via e características elétricas dos trens, determinando a cinemática do movimento destes. A partir destas informações, são calculadas as velocidades de deslocamento de um trem tipo no traçado da via em questão e a energia necessária para tal, de acordo com o tempo deste deslocamento. Em seguida, com base neste deslocamento e respeitando as restrições operacionais, é calculado o tráfego do conjunto de trens que forma o sistema.

Antigamente, nas primeiras aplicações, estas análises eram executadas com base em cálculos analíticos e bastante simples, dando origens a métodos gráficos, como os métodos de Kopniaeff (1918) e do professor Antonio Carlos Cardoso, bastante aplicados no Brasil, associando as tensões elétricas a momentos fletores (Cardoso, 1922). Este último mais especificamente possibilitava a simulação de marcha, tráfego e elétrica. Durante a década de 50, foram desenvolvidas diversas metodologias analógicas, baseadas em ferramentas mecânicas, como o integrador mecânico utilizado pela Société Nationale des Chemins de fer Français (S.N.C.F.).

As simulações utilizando computadores foram introduzidas no fim da década de 60 nos Estados Unidos e na Europa, por diferentes instituições, que apresentavam tabelas de dados como saída, diferentemente das saídas gráficas dos métodos analógicos. Com a evolução dos computadores e dos métodos de resolução de sistemas de equações e circuitos elétricos, os métodos digitais computacionais evoluíram para métodos de resolução destes sistemas simplesmente, ou utilizando algumas simplificações de modelos matemáticos. Estes foram desenvolvidos para serem capazes de calcular não só a marcha, o tráfego e consumo de energia, mas também aspectos que vão desde a queda de tensão na rede aérea, até os campos eletromagnéticos destas, potenciais de passo e de toque no circuito de retorno de corrente, entre outros.

Atualmente, existem diferentes métodos de simulações elétricas aplicadas à tração elétrica metroferroviária como o método gráfico, o método analógico e os métodos numéricos.

Os métodos numéricos se baseiam em resolução de circuitos elétricos, sendo divididos em dois tipos: os métodos diretos e os métodos iterativos. Os métodos iterativos são mais recomendados para a resolução através de sistemas computacionais porque, apesar da grande quantidade de cálculos necessários, estes são relativamente simples e mais fáceis de serem programados. Assim, com a grande velocidade de processamento dos computadores atuais, os cálculos são realizados em um pequeno intervalo de tempo.

Devido a este sistema ser composto por cargas que se locomovem no tempo alterando a cada instante a configuração tanto da parte física (devido à alteração das distâncias entre fonte e carga) como também da alteração das próprias cargas (através da variação do esforço exercido por estas a cada instante de tempo) é necessária à execução da resolução deste modelamento matemático.

Atualmente, existem diversos softwares que realizam a simulação da tração elétrica metro ferroviária por meio de métodos numéricos iterativos. Dentre eles, os dois mais utilizados são: o Elbas Sinanet do Instituto Kema e o OpenPowerNet desenvolvido para funcionar em conjunto com o simulador da empresa OpenTrack (Hofman et al. 2001 e Stephan, 2008).

Estes softwares necessitam de uma grande quantidade de dados de entrada, os quais são utilizados para determinação tanto dos valores dos elementos elétricos que irão compor o circuito a ser resolvido, quanto para definir a configuração deste circuito propriamente dita. Os dados a serem fornecidos para o sistema são basicamente divididos entre dados característicos da via permanente, dos trens (parte mecânica e elétrica) e dados referentes ao sistema de alimentação elétrica destes.

A simulação elétrica feita pelos softwares é dividida em três etapas:

- Cálculo da marcha e consequentemente do tráfego (dinâmica do movimento);
- Transformação do esforço mecânico em elétrico (resolve acionamento do trem);
- Cálculo do equivalente elétrico do sistema.

Com os dados de saída do equivalente elétrico e pelas restrições impostas pelo sistema de alimentação elétrica, é definido o novo conjunto de parâmetros de entrada para a resolução do novo instante do cálculo mecânico, reiniciando o ciclo. Esse ciclo se repete até que a diferença entre os resultados das iterações seja pequeno suficiente, ou seja, até que o erro seja minimizado.

Com base nos resultados obtidos em cada módulo para cada instante, são apresentadas tabelas e gráficos contendo o comportamento de cada variável durante todo o ciclo operacional do sistema. De acordo com os valores limites pré-definidos para cada variável de saída, são apresentados relatórios indicando os pontos críticos do sistema (Stephan, 2008).

Este trabalho não se propõe ao estudo do cálculo e determinação da marcha a ser desenvolvida pelo conjunto trem-via estudado. Desta maneira utilizou-se como dado de entrada para esta parte a medição dos parâmetros elétricos necessários em uma corrida operacional típica. Estes dados foram utilizados como entrada na resolução do sistema elétrico, objeto de interesse do presente estudo.

Considerando que este trabalho trata da simulação de um sistema inserido em um ambiente conhecido e determinado, adotou-se como conhecido o modelo equivalente de thevenin da fonte de energia elétrica até o ponto de alimentação da subestação retificadora.

Deste ponto em diante, são modelados os elementos compostos de cada parte do sistema que envolve a alimentação propriamente dita dos trens, que pode ser resumida em: elementos de condução de corrente, modelados através da impedância linear por metro, o grupo transformador retificador, modelado matematicamente através de valores normatizados que serão apresentados mais a frente, e os elementos de proteção, que indicam quando um determinado parâmetro elétrico ultrapassa certo valor predefinido.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

3.1 Subestações retificadoras

As subestações retificadoras da CPTM são instalações que recebem a energia elétrica de uma fonte interna ou da rede pública, transformando-as adequadamente, a níveis requeridos pelos diversos tipos de equipamentos, máquinas, aparelhos e sistemas de distribuição (Figura 3).

As subestações retificadoras da Linha 9 – Esmeralda recebem a energia da Concessionária AES Eletropaulo em 88 kV, rebaixando-a para alimentação de trens metropolitanos, alimentação de sistemas de sinalização e sistemas auxiliares. Nas Linhas 7 – Rubi, 10 – Turquesa e pequenas extensões da Linha 11 – Coral da CPTM, existe a transformação do 88 kVCA da concessionária na subestação retificadora para alimentação de linhas de subtransmissão em 34,50 kVCA. Esta linha de subtransmissão alimenta outras subestações retificadoras com entrada neste nível de tensão, promovendo flexibilidade em situações contingenciais, aumento da confiabilidade, dentre outras vantagens.

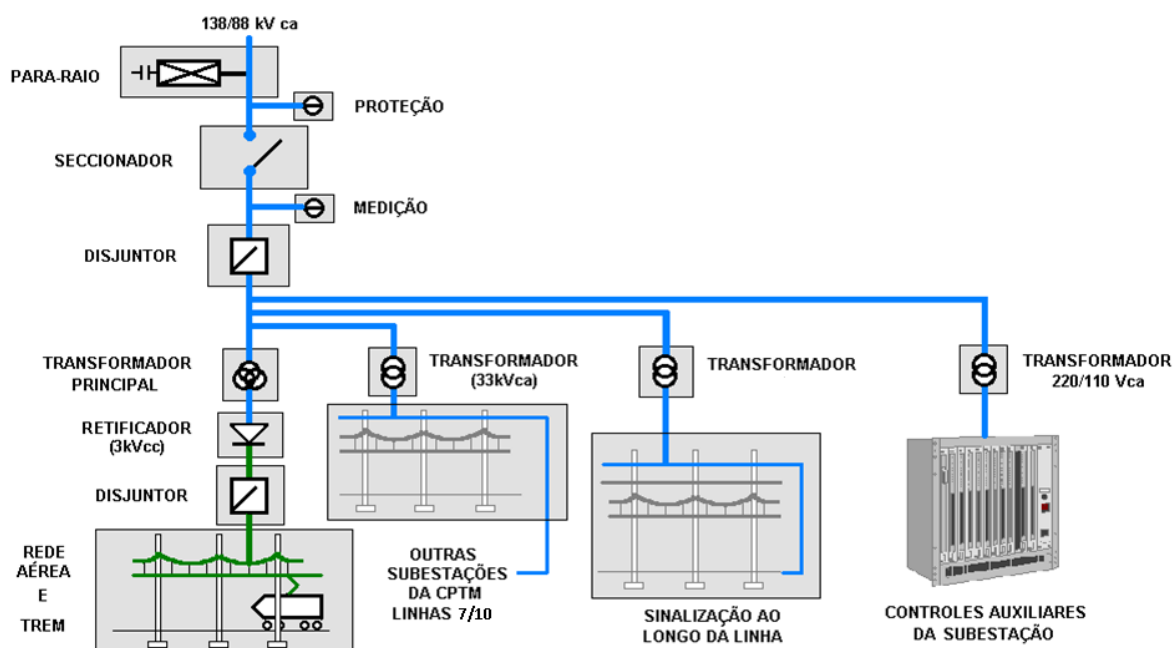


Figura 3 – Modelo Simplificado de uma subestação retificadora

A alimentação dos sistemas de sinalização da Linha 9 é realizada em 6,6 kVCA, enquanto os sistemas auxiliares são energizados em baixa tensão (220/127 VCA) para alimentação das pequenas cargas.

A função primordial de uma subestação retificadora de tração é prover alimentação para os trens metropolitanos. Em todo o parque energético da CPTM, as subestações retificadoras alimentam a rede aérea de tração (ou linha de contato) no nível de 3000 VCC.

O valor de 3000 VCC é utilizado nas linhas de subúrbio ou trens metropolitanos por razões históricas. Vários parâmetros influenciam a escolha do nível de tensão. Entre elas podem-se destacar a capacidade de transporte, a potência unitária dos trens, o modo de captação da energia pelo trem, as possibilidades de instalação de subestações, as interferências eletromagnéticas causadas ao ambiente e a viabilidade técnica em termos de material rodante (Pires, 2006). Na CPTM, a corrente para alimentação dos trens é captada pelo pantógrafo, energizando posteriormente os motores de tração que convertem a energia elétrica em mecânica para movimento do trem.

3.1.1 Modelamento das subestações retificadoras da Linha 9

A potência das subestações retificadoras da Linha 9 é destinada ao fornecimento de energia para alimentação dos trens metropolitanos. A parcela que é destinada para utilização de outros subsistemas (sinalização e auxiliares) é desprezível.

Deste modo, o circuito equivalente (ou modelo) de uma subestação retificadora pode ser dimensionado pela sua principal fonte em corrente contínua, o retificador. Existem 5 (cinco) subestações retificadoras em funcionamento na Linha 9 (Tabela 1).

Subestação	Potência [kW]
Osasco	8000
Imperatriz Leopoldina	8000
Jaguaré	8000
Morumbi	8000
Cidade Dutra	8000

Tabela 1 – Potência das Subestações Retificadoras da Linha 9

As subestações retificadoras de Osasco e Imperatriz Leopoldina alimentam, concomitantemente, cargas pertencentes à Linha 8 – Diamante da CPTM e se localizam fora do trecho de circulação da Linha 9.

Os retificadores de tração das subestações da Linha 9 são dodecafásicos não controlados, obedecendo à configuração de dupla ponte de Graëtz, formados pela associação em série de 2 (dois) retificadores de 6 (seis) pulsos. Para conseguir esta característica, o transformador principal necessita de 2 (dois) enrolamentos secundários, sendo um fechado em estrela para alimentação de um retificador e outro fechado em delta para alimentação do outro retificador (Figura 4). Como os lados CA de cada retificador são defasados de 30° entre si, na associação em série entre ambos, a tensão retificada será formada por 12 pulsos.

Uma das vantagens da utilização dos retificadores de 12 (doze) pulsos é o aumento da qualidade da corrente CA no secundário/primário do transformador principal, pela menor incidência de harmônicas (Komatsu et. al, 2010).

De um modo geral, a ligação em série é empregada quando se deseja uma tensão de saída elevada que não poderia ser obtida com uma única ponte (Pires, 2006) e (Barton, 1994).

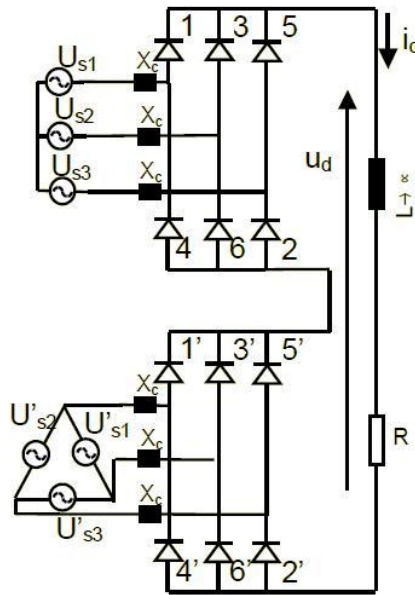


Figura 4 – Retificador 12 pulsos, não controlado da Linha 9 - CPTM,
Fonte: Komatsu et. al, 2010

Deste modo, um circuito equivalente do retificador, como visto do seu lado CC e mostrado na Figura 5, pode então ser montado. As três quedas de tensão podem ser representadas através de três resistências em série (que compõem RSE) com uma fonte de tensão de valor U_{d0} . A queda de tensão nos diodos pode ser representada por uma resistência constante (R_1 na Figura 5) ou, de um modo mais preciso, através de uma queda de tensão constante (potencial de junção) associada à resistência do corpo de silício (Pires, 2006), (Lander, 1987) e (Barton, 1994).

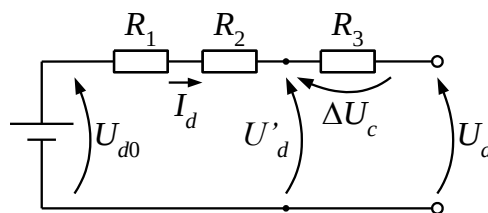


Figura 5 – Circuito equivalente de uma subestação retificadora

A resistência da fonte CA e cabos associados podem ser consideradas constante na maioria dos casos. Se em um ciclo, a corrente está sempre presente em duas fases, então a resistência por fase pode ser dobrada e adicionada ao circuito CC equivalente (R_2 na Figura 5) (Pires, 2006) e (Lander, 1987).

A terceira e última resistência é a chamada resistência de comutação (R_3 na Figura 5) e seu valor depende do tipo de montagem utilizada. Esta queda de tensão

devido à comutação é justamente uma queda produzida pela resistência de comutação quando percorrida pela corrente I_d (Pires, 2006)

Deste modo, a tensão na saída do retificador é dada por:

$$U_d = U_{d0} - I_d \cdot R_{SE} \quad (1)$$

Caso apenas a resistência de comutação for levada em conta, a eq.(1) torna-se:

$$\begin{aligned} U_d &= U_{d0} - \Delta U_c \\ (U_{d0} &= U'_d) \end{aligned} \quad (2)$$

É importante observar que na prática, a subestação é composta de grupos retificadores ligados em paralelo. Assim, a resistência interna total da subestação é calculada através das resistências de cada grupo em paralelo (Pires, 2006).

Num retificador dupla ponte de Graëtz da CPTM, com ligação série, cada ponte fornece metade da tensão média da linha de contato e é percorrida pela corrente I_d . Deste modo, calculando-se a contribuição para a ponte com alimentação do secundário em estrela:

$$U_d = U'_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} V_{MÁX} \cdot \cos \theta d\theta \Rightarrow U_d = \frac{3}{\pi} \cdot V_{MÁX} \cdot [\sin \theta]_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \Rightarrow U_d = \frac{3}{\pi} \cdot V_{MÁX} \quad (3)$$

Como o valor eficaz da tensão na rede vale $V_{MÁX}/\sqrt{2}$, logo a tensão média na saída desta ponte vale:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{Lsec} \Rightarrow U_d = 1,35 \cdot U_{Lsec} \quad (4)$$

A tensão média da linha de contato do retificador da Figura 4 possui o dobro do valor da eq. 4:

$$U_d = 2,70 \cdot U_{Lsec} \quad (5)$$

3.2 Rede aérea de tração – CPTM

A rede aérea de tração elétrica é o sistema responsável pela transmissão de energia elétrica através do contato físico entre fio de contato e o pantógrafo dos trens.

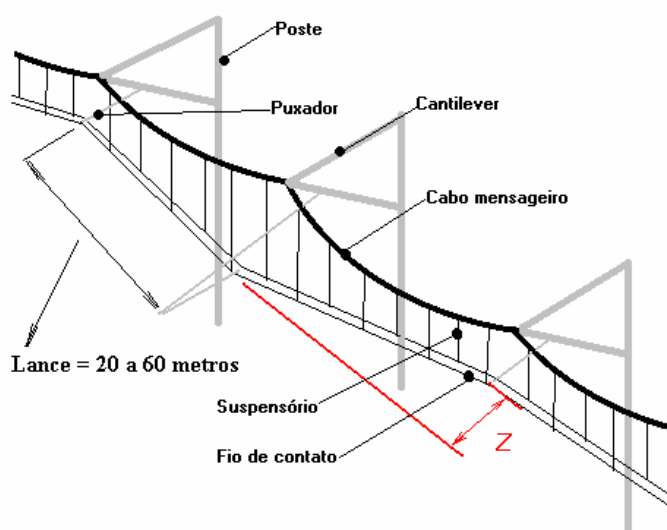


Figura 6 – Esquema da rede aérea de tração

A distância Z da Figura 6 representa o deslocamento da rede aérea de tração, responsável pela mitigação do desgaste concentrado da canoa/lâmina de cobre do pantógrafo.

A rede aérea de tração da Linha 9 ou linha de contato é composta por 1 (um) cabo de cobre denominado mensageiro, com secção transversal de 253 mm^2 , responsável pela captação da energia elétrica junto às subestações retificadoras, condução elétrica e sustentação da catenária; e também por 02 (dois) fios de contato (trolley), com secção 107 mm^2 , responsáveis pela transmissão por contato da energia elétrica proveniente das subestações de tração (que fornecem corrente contínua sob tensão de 3000 VCC) aos trens metropolitanos. (Teranishi, 2008).

A conexão do cabo mensageiro até o terminal positivo (“+”) dos retificadores de tração das subestações é realizado por cabos isolados, preferencialmente fabricados a partir de cobre eletrolítico.

O cabo mensageiro é constituído por encordoamentos simples de cabos de cobre eletrolíticos (37 fios). O fio trolley é um fio ranhurado, de cobre eletrolítico de têmpera dura, de alta condutibilidade e elevada resistência mecânica, próprio para interação com o pantógrafo do trem (Figura 7).

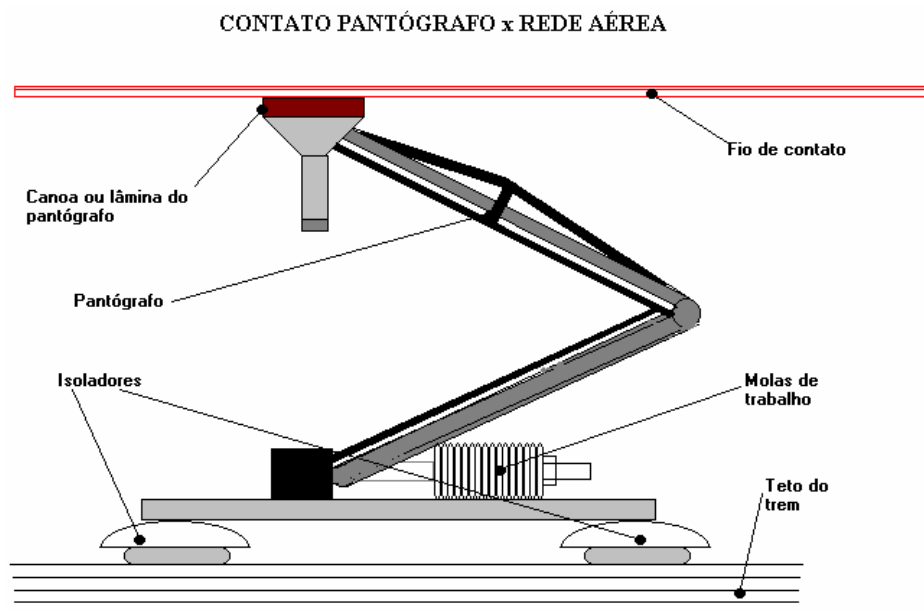


Figura 7 – Interação pantógrafo – Rede aérea

Para sustentação da rede aérea são utilizadas diversas estruturas, tais como postes, bastões puxadores, cantileveres, consoles, dentre outros aparatos. Estas estruturas isoladas dos fios e cabos em potencial em 3000 VCC através de cadeias de isoladores.

Outros componentes fundamentais da rede aérea de tração são os suspensórios, que possuem a função principal de suportar mecanicamente o fio trolley e as ligações equipotenciais, com a função principal de transferir a energia do cabo mensageiro ao fio trolley. Ao longo do trecho, existem componentes responsáveis pelo isolamento de seções da rede aérea (chaves seccionadoras) e pela separação elétrica entre circuitos de via (isoladores de seção e gaps).

3.2.1 Modelamento da rede aérea de tração da Linha 9

O circuito equivalente da rede aérea de tração pode ser dimensionado pela resistência do circuito alimentador como um todo. Esta resistência será responsável pela queda de tensão ao longo do trecho na rede aérea de tração quando da passagem da corrente na linha.

Em (Pires, 2006) pode-se encontrar uma expressão prática para cálculo da resistência da catenária por quilômetro a 20° C, onde a secção equivalente em cobre

S_{Cu} é a secção do condutor de cobre que teria a mesma resistência (por quilômetro) de todos os condutores utilizados. Neste caso, devem-se levar em conta os fios de contato e o cabo mensageiro existente.

$$R_{cat}(20^{\circ}C) = \frac{\rho_{Cu} \cdot 10^3}{S_{Cu}} = \frac{17,8}{S_{Cu}} \quad (6)$$

Conforme mencionado, a rede aérea de tração da Linha 9 é composta por 1 (um) cabo mensageiro de 253 mm² e por 2 (dois) fios de contato (trolley) de 107 mm², totalizando 467 mm². Pela eq.(6), a resistência da catenária por quilômetro a 20° C (R_{cat}) é igual a 38,115 mΩ/km.

3.3 Cabines de seccionamento e de paralelismo - CPTM

As cabines de seccionamento da Linha 9 da CPTM são instalações que possuem a função de diminuir a queda de tensão no trecho e permitir o seccionamento da rede aérea de tração em caso de anormalidade ou serviços de manutenção, para isolamento do trecho avariado ou em serviço. Também podem atuar como equalizadores na distribuição da corrente fornecida entre vias para alimentação dos trens metropolitanos (Figura 8).

Devido a sua localização estratégica, as cabines de seccionamento possibilitam minimizar a isolação do trecho avariado ou em serviço entre 2 (duas) subestações, interrompendo o fornecimento de energia em parte reduzida da rede aérea de tração, não comprometendo assim a completa operacionalidade dos trens metropolitanos.

As cabines de paralelismo da Linha 9 têm como função apenas equilibrar a distribuição da corrente fornecida entre vias para alimentação dos trens metropolitanos.

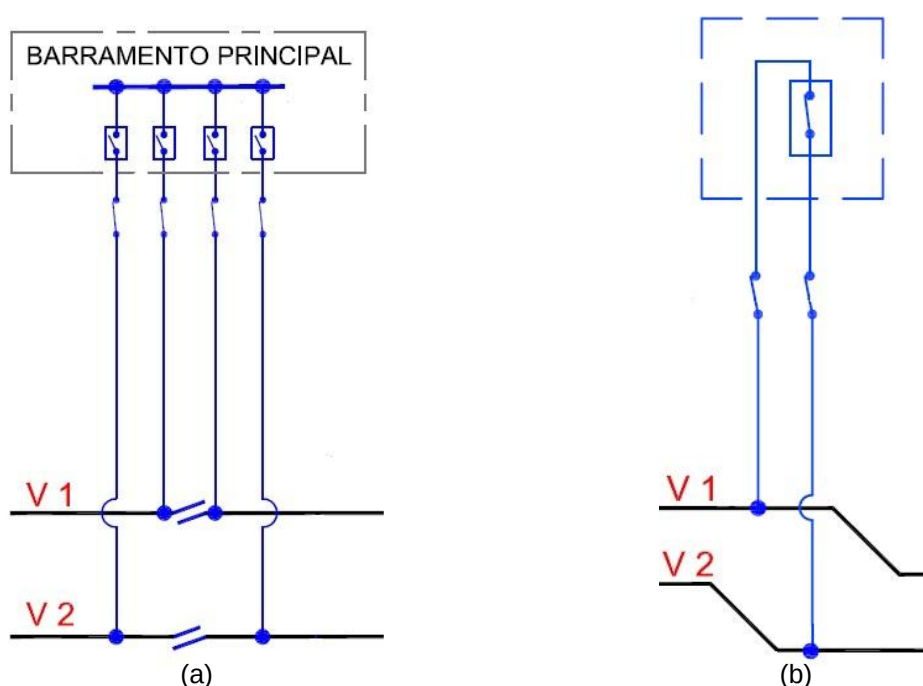


Figura 8 – Diagrama unifilar de cabine de Seccionamento (a) e cabine de Paralelismo (b)

A Linha 9 possui em funcionamento 2 (duas) cabines de seccionamento e 3 (três) cabines de paralelismo, conforme apresentado na Tabela 2.

Seccionamento	Paralelismo
Osasco	Cidade Jardim
Presidente Altino	Santo Amaro
	Grajaú

Tabela 2 – Cabines da Linha 9 – Esmeralda

3.3.1 Modelamento das cabines da Linha 9

O circuito equivalente das cabines de seccionamento e de paralelismo pode ser dimensionado pela resistência do circuito como um todo, compreendendo a resistência equivalente dos cabos de ligação às linhas de contato/barramentos associados em série com as resistências de contato das chaves seccionadoras/disjuntores envolvidos.

Devido às resistências dos cabos de ligação às linhas de contato/barramentos (pequeno comprimento) e às resistências de contato das chaves seccionadoras/disjuntores serem de baixíssimo valor, o modelamento das cabines de seccionamento e de paralelismo pode ser representado por um curto-circuito entre vias, não comprometendo o resultado final da simulação.

3.4 Circuito de retorno – CPTM

O circuito de retorno da corrente de tração é composto principalmente pelos trilhos, bobinas de impedância, cross bonds e rails bonds. Para assegurar a tração do trem, esta corrente deve retornar às subestações através de um circuito de retorno (Pires, 2006) e (Tessier, 1978).

Os trilhos de rolagem, por onde circulam os rodéis dos trens metropolitanos, também são responsáveis pelo retorno da corrente contínua às subestações retificadoras. Em geral, os 2 (dois) trilhos de rolagem, que são responsáveis por 1 (uma) via de circulação dos trens, são equipotenciais entre si pela ligação elétrica dos chamados cross bonds.

A bobina de impedância ou bond de impedância é o equipamento diretamente conectado aos trilhos, por cabo elétrico, com a principal função permitir a condução da corrente elétrica de tração, proveniente dos motores de tração do material rodante em corrente contínua. A bobina de impedância, por ser um grande reator, oferece baixa resistência à passagem da corrente contínua e uma alta impedância à passagem da corrente CA dos circuitos de sinalização (Teranishi, 2008).

A conexão do circuito de retorno (trilho) até o terminal negativo ("-") dos retificadores de tração é derivada dos terminais de bonds de impedância especificamente instalados em frente às subestações retificadoras. Esta conexão é realizada por cabos isolados, preferencialmente fabricados a partir de cobre eletrolítico.

Os rails bonds são condutores de cobre soldados entre as duas extremidades dos trilhos (barras). Este condutor é feito com secção de cobre tal que tenha a mesma resistência da secção em aço dos trilhos, garantindo a continuidade elétrica do circuito de retorno (Pires, 2006). A existência dos rails bonds se deve a constituição não contínua dos trilhos (fabricados em barras/perfis de 12 m). As barras são

emendadas na via por um par de placas especiais aparafusadas aos trilhos a fim de assegurar a continuidade mecânica para o material rodante. Estas placas são chamadas de talas de junção ou juntas. As talas de junção ou juntas, entretanto, não estabelecem uma ligação elétrica boa entre os trilhos, uma vez que o contato entre barras é feito simplesmente por pressão entre a tala de junção e trilhos resultando em uma resistência grande, justificando a aplicação dos rails bonds (Pires, 2006).

3.4.1 Circuito de retorno e aterramento – CPTM

Os trilhos não estão totalmente isolados da terra pelos dormentes sobre os quais estão assentados. Uma parte da corrente de tração utiliza o solo para retornar às subestações. Perto das subestações, esta parte da corrente de tração volta do solo para os trilhos e para o aterramento das subestações (Pires, 2006).

Esta corrente que circula pela terra, conhecida como corrente de fuga, pode encontrar em seu caminho canos metálicos, estruturas metálicas, ou cabos, instalados paralelamente à via, e utilizá-los como condutor (Pires, 2006) e (Case, 1999). A corrente de fuga circulante aumenta a corrosão das tubulações metálicas citadas em epígrafe, enterradas nas proximidades das vias férreas.

Deste modo, no tocante ao sistema de aterramento encontrado na CPTM, tem-se a aplicação do modelo dois terras (Silva, 1997), referência para sistemas de transporte metroferroviários. Conforme (Cardoso, 2002), o modelo de aterramento constituído por dois terras é normalmente utilizado em sistemas de transportes metroferroviários construídos a céu aberto.

O primeiro terra deste modelo é o terra externo (TE), definido como uma massa de solo cujo potencial elétrico em qualquer ponto é convencionalmente igual a zero e o segundo terra do modelo é o terra do sistema de tração (TV), constituído pelos trilhos, quando estes são utilizados como circuito de retorno e estão conectados intencionalmente ao terra. Em uma via férrea, devido à interação terra-trilho mencionada, ocorre o aparecimento de uma tensão entre TE e TV, variando pontualmente, pois existe uma queda de tensão devido à circulação da corrente de retorno pela resistência do trilho (Pires, 2006).

No tocante ao modelo de dois terras descrito anteriormente, como ocorre o aparecimento de uma tensão terra-trilho que varia pontualmente com a corrente de retorno, a corrente de fuga também será variável pontualmente. Deste modo, neste no modelo de dois terras, inclui-se uma condutância entre o terra externo e o trilho (terra do sistema de tração).

3.4.2 Modelamento do circuito de retorno da Linha 9

O circuito equivalente de retorno pode ser dimensionado pela resistência do circuito de retorno como um todo.

Em (Pires, 2006) pode-se encontrar uma expressão prática para cálculo da resistência do circuito de retorno, através da resistividade do trilho ρ_t ; da massa específica do material do trilho γ_t ; da massa do trilho m_t ; do comprimento do trilho l_t ; do comprimento de trilho equivalente l_{et} de mesma resistência elétrica que a resistência das junções e do número de trilho em paralelo n_{tp} .

$$R_{rt} = \frac{\gamma_t \cdot \rho_t}{m_t} 10^3 \left(\frac{l_t + l_{et}}{l_t} \right) \cdot \frac{1}{n_{tp}} \Rightarrow R_{rt} = \frac{7,83 \cdot 10^3 \cdot 0,210 \cdot 10^{-6}}{m_t} 10^3 \left(\frac{12,5 + 2,5}{12,5} \right) \cdot \frac{1}{2} = \frac{0,987}{m_t} \quad (7)$$

A resistência de cada trilho considerando-se as conexões e bondes de impedância, como é igual a 19,1 mΩ/km (Pires, 2006) e (De Filippi, 2004), totalizando para 2 (dois) trilhos em paralelo a resistência de trilho equivalente de 9,55 mΩ/km para cada via.

Objetivando-se evitar a complexidade no modelamento do circuito de retorno, será atribuído um valor de condutância terra-trilho (G) igual à zero (ou seja, corrente de fuga igual a zero), uma vez que a divisão de parte da corrente de retorno para a corrente de fuga não é escopo deste trabalho, tampouco irá influir no resultado final do mesmo.

3.5 Resistências do circuito de tração da Linha 9

De acordo com os modelamentos citados acima e levando-se em conta a inexistência de corrente de fuga e a atribuição de um curto-circuito no circuito equivalente das cabines de seccionamento e de paralelismo, a resistência do circuito de tração depende de duas componentes, a resistência da rede aérea (ou catenária) e a resistência do trilho (ou circuito de retorno).

O valor da corrente que circula através da linha de contato em qualquer ponto da linha é igual ao valor da corrente que circula através do circuito de retorno no mesmo ponto. Deste modo, a resistência equivalente do circuito de tração é dada por (Pires, 2006):

$$R_{trac} = R_{cat} + R_{rt} \quad (8)$$

3.6 Frotas de trens da Linha 9

A Linha 9 da CPTM possui 4 (quatro) frotas de trens que realizam as viagens de Osasco à Grajaú.



Figura 9 – Trem Série 2070 (Fabricante Alstom/Bombardier/CAF) e Trem Série 3000 (Fabricante Siemens)



Figura 10 – Trem Série 7000 (Fabricante CAF) e Trem Série 7050 (Fabricante CAF)

Cada uma das frotas rodantes na Linha 9 é formada por 2 (dois) TUE's, sendo a formação de 1 (um) TUE composta por 04 (quatro) carros do tipo MC + R + R1 + MC1, sendo:

- MC – Carro motor com cabine de condução;
- R – Carro reboque;
- R1 – Carro reboque diferenciado¹;
- MC1 – Carro motor diferenciado com cabine de condução.

Deste modo, cada uma das frotas circulantes na Linha 9 é composta por 8 (oito) carros.

Atualmente, ressalta-se que a maior parte da frota circulante pela Linha 9 é composta pelos trens série 7000 e 7500 (Figura 10) (que inclusive possuem as mesmas características, desempenho e capacidade) e em menor número pelas frotas série 2070 e 3000 (Figura 9).

3.6.1 Modelamento da frota circulante da Linha 9

Conforme (Pires, 2006) e (Tse et al, 1998), os trens podem ser modelados por fontes de corrente ideais, sendo que estas fontes de corrente são consideradas:

- Positivas: Quando o trem absorve potência elétrica das subestações retificadoras (via rede aérea de tração), convertendo-a em potência mecânica

¹ O termo “diferenciado” é utilizado quando os carros possuem diferentes equipamentos instalados, tais como compressores de ar, conversores de tensão, entre outros.

(produzida pelo eixo), ou seja, o motor de tração está funcionando no “modo motor”, com conjugado e velocidade positivas (por exemplo, no estado de aceleração).

- Negativas: Quando o trem injeta potência elétrica na rede aérea de tração, através da absorção de potência mecânica pelo eixo, ou seja, o motor de tração está funcionando no “modo gerador”, com conjugado negativo e velocidade positiva (por exemplo, no estado de frenagem regenerativa).

3.7 Introdução ao modelamento

Motivada pela atual conjuntura operacional da Linha 9 da CPTM objetivou-se criar um modelo para simulação dos sistemas de tração elétrica ferroviária, eliminando preliminarmente os resultados obtidos das simulações de marcha e de tráfego dos trens, concentrando os esforços nos resultados obtidos da simulação elétrica.

A simulação de marcha visa determinar as características do movimento do veículo (trem) de tração elétrica. Para esta simulação é necessário o conhecimento das características geométricas das vias que integram a rota dos trens (rampas, curvas, etc.), sendo que 1 (um) trem está sujeito aos esforços:

- Esforço de tração, função da velocidade;
- Resistências de rampa e curva, função da posição do veículo;
- Resistências normais ao movimento, função da velocidade (Toledo et. al, 1988).

A simulação de tráfego fornece a caracterização do movimento simultâneo dos veículos na malha, movimento este representado através do diagrama horário do sistema. Normalmente, a posição dos trens é obtida de uma marcha-padrão calculada, supondo uma tensão constante no pantógrafo das unidades de tração (Toledo et. al, 1988).

A simulação elétrica é realizada montando-se o circuito equivalente a cada instante de tempo (“fotografia”) do sistema de tração. Esta “fotografia” deverá considerar a localização física real (posição quilométrica) das subestações, cabines de seccionamento e/ou paralelismo e a localização física aproximada dos trens

metropolitanos. A posição quilométrica destas instalações e veículos é fundamental para melhor equacionamento das quedas de tensão ao longo da rede aérea de tração e do trilho, representadas pelas resistências quando da passagem das correntes de linha e de retorno, respectivamente.

A resistência equivalente da catenária, quando da passagem da corrente de linha, representa uma queda de tensão na rede aérea entre:

- Trem – subestação;
- Trem – trem;
- Trem – cabine;
- Subestação – cabine;
- Subestação – subestação (com menor frequência).

A resistência quando da passagem da corrente de retorno, representa uma queda de tensão no trilho entre:

- Trem – subestação;
- Trem – trem;
- Subestação – subestação (com menor frequência).

A resistência equivalente subestação – subestação apenas durante a inexistência de trens em um trecho longo.

No circuito equivalente, num instante de tempo específico (por exemplo, 11:58:50), posicionam-se (de acordo com as posições quilométricas) as subestações de tração (representadas pela fonte de tensão em série com a sua respectiva resistência equivalente R_{SE}), as cabines de seccionamento e/ou paralelismo (representadas por um curto-circuito entre vias) e os trens (representados por fontes de corrente) e calcula-se, de acordo com as posições quilométricas das subestações, cabines e trens, sendo R_{cat} igual a 38,115 m Ω /km e R_{rt} igual a 9,55 m Ω /km.

3.8 Modelo proposto

O modelamento proposto para avaliação da condição de carregamento do sistema de tração da Linha 9 é baseado em medições de campo e simulações.

Este modelo consiste na instrumentação de um “trem-teste” com todo aparato necessário para coleta das seguintes grandezas:

- Tensão captada pelo veículo;
- Corrente absorvida pelo motor ou injetada na rede;
- Distância percorrida;
- Velocidade durante o trajeto;
- Tempo de percurso.

Munidos das grandezas mencionadas acima, dispensa-se o conhecimento de parâmetros relativos à simulação de marcha do veículo, tais como: Geometria das vias (ida e volta) e diagramas de esforço motor e freante do trem.

Este “trem-teste” executou uma viagem-padrão com 2 (duas) voltas na Linha 9, ou seja, faria o percurso Osasco-Grajaú/Grajaú-Osasco e novamente Osasco-Grajaú/Grajaú-Osasco. Deste percurso, foram registradas, a cada instante, as grandezas mencionadas acima.

A proposição fundamental deste modelo está centrada em “tomar” os parâmetros elétricos do “trem-teste” (tais como tensão e corrente absorvida pelo motor ou injetada na rede) e referi-los para os demais trens distribuídos ao longo do trecho da Linha 9, de acordo com seu posicionamento.

Por exemplo: O “trem-teste” passa pelo quilômetro x da Linha 9 num instante de tempo t , registrando a corrente I e a tensão V ; quando um trem T1 (não instrumentado) passar pelo quilômetro x da Linha 9 num instante de tempo $t+\Delta t$ (após a passagem do “trem-teste”) ou $t-\Delta t$ (antes da passagem do “trem-teste”), será associado a este trem a corrente I e a tensão V que foram registradas pelo “trem-teste”.

Deste modo, para conhecimento da posição quilométrica aproximada dos trens não instrumentados da Linha 9, utilizaram-se as informações geradas pelo sistema de sinalização da Linha 9. As informações geradas pelos equipamentos vitais do sistema de sinalização (circuitos de via, sinais e máquinas de chave) são enviadas através de cabos de controle para unidades de transmissões remotas (UTRs) localizadas nas salas técnicas das estações mais próximas. As UTRs destas estações enviam as informações, através de um sistema de transmissão óptico (STO), para uma estação domínio, onde as informações são processadas,

gerenciadas e enviadas ao Centro de Controle Operacional (CCO) da CPTM, localizado na estação Brás, também via STO.

No CCO, as informações de campo são sistematizadas em servidores dualizados (agregando as funções de banco de dados e de controle de tráfego dos trens) e interfaces homem máquina (IHM), constituídas de consoles de operação, console de supervisão, consoles de manutenção e engenharia e painéis sinópticos retroprojetados. As IHMs permitem a visualização de indicações operacionais, tais como o posicionamento e prefixação das composições ferroviárias circulantes; a identificação e rastreamento automático dos trens; correspondência das máquinas de chave; estado operacional dos sinais a margem da via; estado operacional das funções avançadas e de controle e alarmes.

Das IHMs é possível gerar um relatório (com o horário ou instante de tempo em que os trens partiram ou se encontram em determinado circuito de via). Este relatório (exportado para Excel, denominado relatório SGDO – Sistema de Gerenciamento de Dados Operacionais) identifica a data, o horário, o evento (trem que partiu ou se encontra em determinado circuito de via de acordo com a sua prefixação), o local e o sinal (circuito de via), ou seja, ele retrata o “status” da sinalização e tráfego, no caso específico da Linha 9 (Tabela 3).

De posse deste relatório, é necessário compará-lo com um documento padrão conhecido como PVS (Plano de Vias Sinalizado, no caso da Linha 9), que identifica cada circuito de via com a sua provável posição quilométrica mapeada, ou seja, conhecendo a posição quilométrica do circuito de via, pode-se conhecer a posição quilométrica aproximada do trem em incógnita.

REGISTROS SGDO					
DATA	HORÁRIO		EVENTO	LOCAL	SINAL
4/4/2012	15:00:00	IND:	Trem UC789 no circuito	UTR:JUR	CDV:2E05
4/4/2012	15:00:01	IND:	Trem ET614 no circuito	UTR:CEA	CDV:1BT
4/4/2012	15:00:01	IND:	Trem UC776 no circuito	UTR:GRA	CDV:1W08
4/4/2012	15:00:02	IND:	Trem UC779 partiu do circuito	UTR:CEA	CDV:BE2
4/4/2012	15:00:03	IND:	Trem UC781 no circuito	UTR:JAG	CDV:JAGPL2
4/4/2012	15:00:05	IND:	Trem UC781 partiu do circuito	UTR:JAG	CDV:JAG4A
4/4/2012	15:00:07	IND:	Trem ET614 no circuito	UTR:CEA	CDV:1T
4/4/2012	15:00:09	IND:	Trem UC778 partiu do circuito	UTR:SAM	CDV:SAM-PLA
4/4/2012	15:00:10	IND:	Trem UC789 no circuito	UTR:JUR	CDV:2E04
4/4/2012	15:00:11	IND:	Trem UC789 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:2E06
4/4/2012	15:00:11	IND:	Trem ET614 partiu do circuito	UTR:CEA	CDV:BE1

Tabela 3 – Relatório de Eventos SGDO

Por fim, para critério de refinamento, o relatório em conjunto com o PVS é comparado com uma foto do painel sinóptico, retirado do CCO, no instante de tempo

de análise, possibilitando a verificação final, através da visualização dos trens presentes e rotas (Figura 11).

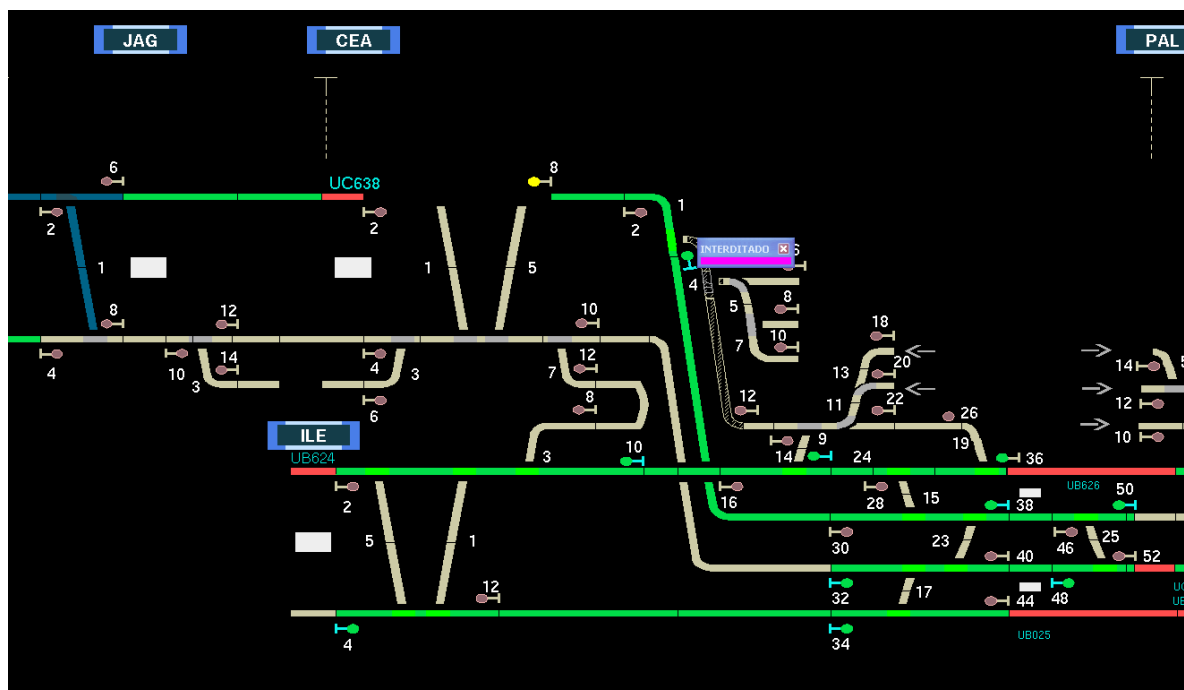


Figura 11 – Painel sinóptico CCO – Região de interligação da Linha 8 com a Linha 9

Adicionalmente à instrumentação do “trem-teste”, também foram instrumentadas 2 (duas) subestações de tração da Linha 9, as subestações Morumbi e Cidade Dutra, com intuito de se conhecer as correntes circulantes pelos disjuntores de 3 kVCC de saída das referidas subestações.

A partir deste ponto, o modelo entra na fase da simulação elétrica do circuito de tração, para isto é necessário inicialmente arbitrar-se um instante de tempo para “fotografia” do sistema.

Com a “foto” feita, é necessária a confecção do circuito de tração equivalente, conforme denotado no subitem 3.7., com os trens não instrumentados presentes no circuito assumindo o valor da corrente registrada pelo “trem-teste” naquela posição quilométrica (modelados por fontes de corrente ideais).

Objetivando-se ganhar tempo e com a possibilidade de se simular um circuito diversas vezes com variações dos componentes empregados no circuito de tração (para regulagem), a simulação elétrica do circuito de tração foi realizada usando um programa de computador denominado PSIM 6.0.

A verificação da aplicabilidade do modelo proposto está centrada na comparação dos resultados da simulação elétrica de tração efetuada pelo software PSIM 6.0,

especificamente as simulações das correntes circulantes pelos disjuntores de 3 kVCC de saída das subestações Morumbi e Cidade Dutra, com os resultados visualizados pela instrumentação (registrador) montada nestas mesmas subestações para coleta dos valores das correntes circulantes dos mesmos disjuntores de 3 kVCC de saída. Quanto menor for o erro identificado entre estes resultados, melhor será a verificação da aplicabilidade e consolidação do modelo proposto.

3.9 Instrumentações

3.9.1 “Trem-teste” - Série 2070

Devido às inúmeras dificuldades encontradas para se conseguir instrumentar os trens série 7000 e 7500 da fabricante CAF (grande maioria circulante na Linha 9), o “trem-teste” instrumentado foi da série 2070, batizado N4, cujas características principais são mostradas na Tabela 4.

Características	Valores
Formação TUE	MC + R + R1 + MC1
Fabricante	Alstom/Bombardier/CAF
Ano de fabricação	2008
Origem	Brasil
Ano de operação	2008
Caixa	Aço Inox
Bitola	1,60 m
Composição – Linha 9	8 carros
Dimensões	Valores
Altura carro	3,840 m
Altura com pantógrafo abaixado	4,635 m
Altura do boleto ao piso	1,335 m
Altura do boleto ao eixo de engate	0,927 m
Largura do carro	3,040 m
Largura das portas	1,60 m
Comprimento MC/MC1	21,565 m

Comprimento R/R1	20,610 m
Peso MC	48900 kg
Peso R	40000 kg
Desempenho e capacidades	Valores
Esforço trator	28000 kgf
Potência contínua	2685 kW
Velocidade máxima	120 km/h
Aceleração máxima	0,90 m/s ²
Desaceleração máxima – Freio de serviço	1,10 m/s ²
Desaceleração máxima – Freio de emergência	1,20 m/s ²
Lotação MC/MC1	50+183
Lotação R/R1	54+194
Lotação TUE	962

Tabela 4 – Características do Trem Série 2070

Para coleta das grandezas descritas anteriormente, o material utilizado para instrumentação do “trem-teste” foi:

- 1 (um) oscilógrafo Yokogawa modelo DL750P para visualização das grandezas;
- Sensor de corrente LEM tipo LT 2000 S/SP20 para corrente nominal de 2000 A, faixa 1:5000 (Figuras 12 e 13).

A corrente reproduzida pelo sensor de corrente seria convertida para tensão através de resistor R de $50\Omega \pm 1\%$, com faixa de 1V/100 A, para leitura do oscilógrafo Yokogawa.

A tensão da linha de contato captada pelo trem seria obtida do sinal que o inversor envia para o voltímetro de linha do carro motor, com faixa de 4 a 20 mA, sendo 0 V correspondente a 4 mA e 5000 V correspondente a 20 mA. O sinal de corrente seria convertido para tensão através de resistor R de $50\Omega \pm 1\%$, para leitura do oscilógrafo Yokogawa.

As grandezas velocidade e distância percorrida foram obtidas através do sensor de velocidade instalado no freio do trem. Este sinal em frequência foi enviado para o módulo do oscilógrafo Yokogawa, e após, convertidos para unidade km/h para medição da velocidade e para unidade m para medição da distância percorrida.

O oscilógrafo Yokogawa possui relógio interno para medição do tempo de percurso.



Figura 12 – “Trem-teste” Série 7000 e detalhe do sensor de corrente



Figura 13 – Detalhes da instalação do cabeamento junto ao trem

Para visualização e tratamento das grandezas medidas pelo Yokogawa modelo DL750P em computador, utilizou-se o software Xviewer, projetado especialmente para trabalhar com este oscilógrafo.

3.9.2 Subestações Morumbi e Cidade Dutra

As subestações Morumbi e Cidade Dutra são 2 (duas) subestações retificadoras fundamentais para operacionalidade dos trens metropolitanos da Linha 9. Localizadas estrategicamente, estas subestações contribuem, cada uma, conforme mencionado, com a potência de 8000 kW para o sistema. Estas subestações possuem 02 (dois) retificadores idênticos de 12 (doze) pulsos não controlados com potência de 4000 kW alimentados, cada um, por 1 (um) transformador principal de 2 (dois) enrolamentos secundários. Os retificadores de tração das subestações

Morumbi e Cidade Dutra estão enquadrados na classe de operação VI e tração pesada das normas IEC60146-1-1 de 1991 e NEMA RI9 de 1968, respectivamente, podendo suportar cargas contínuas com 100% de sua potência nominal (4000 kW); 150% de sua potência nominal (6000 kW) durante 2 h e 300% de sua potência nominal (12000 kW) durante 1 min.

As características principais dos transformadores e dos retificadores de tração das subestações Morumbi e Cidade Dutra são visualizadas nas Tabelas 5 e 6.

Características do Transformador	Subestação Morumbi	Subestação Cidade Dutra
Fabricante	Siemens	Siemens
Potência (kVA) (AT/BT1/BT2)	4370/2185/2185	4370/2185/2185
Tipo	Retificador	Retificador
Peso total (kg)	18420	23500
Primário	Estrela não aterrada	Estrela não aterrada
Tensões primárias (kV)	88	88/138
Secundários	Delta/Estrela aterrada	Delta/Estrela aterrada
Tensões secundárias (kV)	1,221/1,221	1,221/1,221
Tensão de curto-circuito a 75° C na frequência e tensão nominal (em %)	6,31% na base 2185 kVA	6,40% na base 2185 kVA

Tabela 5 – Características dos transformadores das Subestações Morumbi e Cidade Dutra

Retificador - Características	Subestação Morumbi	Subestação Cidade Dutra
Fabricante	Siemens	Siemens
Normas adotadas	IEC60146-1-1	IEC60146-1-1
Potência nominal no lado de corrente contínua (kW)	4000	4000
Corrente nominal do retificador	1265	1250
Frequência de operação (Hz)	60	60
Tensão nominal em regime permanente (V) - 100% plena carga no lado corrente contínua, com tensão de 88kV no lado primário do transformador e com o tap correspondente ao valor nominal	3160	3180
Ligação	Dupla ponte de Graëtz 3Ø (trifásica)	Dupla ponte de Graëtz 3Ø (trifásica)
Reação global	Dodecafásica	Dodecafásica
Corrente com 150% da carga nominal durante 2 h (A)	1900	1875
Corrente com 300% da carga nominal durante 1 min (A)	3795	3750

Tabela 6 – Características dos retificadores das Subestações Morumbi e Cidade Dutra

Os 2 (dois) retificadores de tração das subestações Morumbi e Cidade Dutra estão configurados (ligação) em uma associação paralela, onde ambos alimentam um barramento comum em corrente contínua. Deste modo, a resistência equivalente das subestações deverá ser calculada através da associação em paralelo das resistências RSE de cada grupo retificador.

Em cada subestação, este barramento comum em corrente contínua alimenta 4 (quatro) disjuntores de 3 kVCC, passando ainda por chaves seccionadoras de saída para a rede aérea de tração. Cada um destes disjuntores alimenta um sentido das vias V1S e V2S da Linha 9, sendo que os disjuntores respectivos de cada uma das vias são isolados por um seccionamento a ar (gap) (Figura 14). Existe a possibilidade de inibição deste gap com o fechamento de uma chave seccionadora

auxiliar (denominada tay – normalmente aberta), utilizada geralmente em situações contingenciais, serviços de manutenção e testes simples.

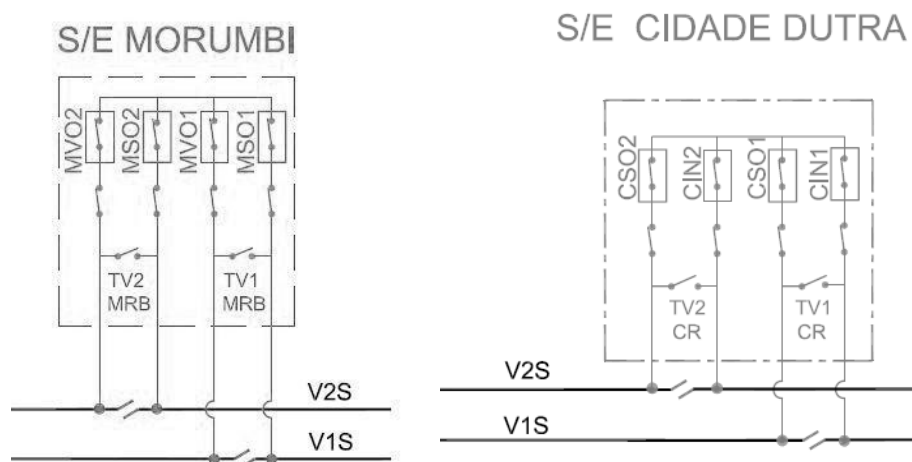


Figura 14 – Diagrama unifilar de 3 kVCC das Subestações Morumbi e Cidade Dutra

Conforme Figura14, cada um dos disjuntores de 3 kVCC possui uma designação:

- MVO2 – Disjuntor 3 kVCC Morumbi – Alimentação sentido Vila Olímpia – V2S;
- MSO2 – Disjuntor 3 kVCC Morumbi – Alimentação sentido Socorro – V2S;
- MVO1 – Disjuntor 3 kVCC Morumbi – Alimentação sentido Vila Olímpia – V1S;
- MSO1 – Disjuntor 3 kVCC Morumbi – Alimentação sentido Socorro – V1S;
- CSO2 – Disjuntor 3 kVCC Cidade Dutra – Alimentação sentido Socorro – V2S;
- CIN2 – Disjuntor 3 kVCC Cidade Dutra – Alimentação sentido Interlagos – V2S;
- CSO1 – Disjuntor 3 kVCC Cidade Dutra – Alimentação sentido Socorro – V1S;
- CIN1 – Disjuntor 3 kVCC Cidade Dutra – Alimentação sentido Interlagos – V1S.

No tocante às instrumentações destas subestações, cada um destes disjuntores de 3 kVCC é ligado à sua respectiva chave seccionadora de saída através de uma barramento condutor.

Neste barramento encontra-se instalado um “shunt” com relação de medição 2000 A/60 mV. O sinal deste shunt é enviado a um amplificador localizado na própria

cela de instalação dos disjuntores de 3 kVCC. Deste amplificador são enviados sinais aos instrumentos de medição analógicos da cela (voltímetros e amperímetros) e aos relés de supervisão e controle (denominados SITRAS – fabricante Siemens) de cada um dos disjuntores acima mencionados. Estes relés encontram-se instalados no painel de corrente contínua da subestação e possuem diversas finalidades, entre elas medições em tempo real, calibrações, alarmes diversos, etc. Aos terminais de saída de cada um dos relés foi ligado 1 (um) oscilógrafo Yokogawa (para cada subestação) modelo DL750P para visualização das correntes circulantes pelos disjuntores de 3 kVCC (Figura 15). Estas correntes podem ter o sentido de saída para a rede aérea de tração (positivas), ou seja, alimentando uma ou mais composições que estão acelerando no trecho de domínio daquele disjuntor ou com o sentido de entrada para o barramento comum de corrente contínua da subestação (negativas), ou seja, devido à frenagem regenerativa de uma ou mais composições no trecho de domínio daquele disjuntor. As correntes circulantes podem voltar pelo disjuntor sentido barramento com o intuito de sair por outro disjuntor para alimentar uma ou mais composições de outro trecho/via.

No caso da frenagem regenerativa das composições, parte da energia volta para as subestações, entretanto, como as subestações são do tipo retificadoras, os diodos simplesmente não conduzem uma corrente quando polarizados reversamente (Pires, 2006) e (Cai; Irving; Case, 1995b). Ressalta-se que o barramento comum de corrente contínua se encontra a jusante dos retificadores, possibilitando a transferência de corrente entre os disjuntores de 3 kVCC das subestações.



Figura 15 – Instalação dos Yokogawa modelo DL750P nas subestações

4 VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO

4.1 Trecho de análise

Para verificação da aplicabilidade do modelo, havia a necessidade de determinar um trecho da Linha 9 para medição da grandeza (corrente) das subestações retificadoras. Um fator limitante de instrumentação das subestações seria a quantidade de oscilógrafos para coleta e visualização das grandezas medidas. Neste ínterim, seria impossível instrumentar todas as subestações e cabines presentes na Linha 9.

As grandezas (tensão, corrente, distância percorrida, velocidade) do “trem-teste” foram medidas continuamente desde o horário de início do teste até o seu término.

Deste modo, escolheu-se um trecho crítico da Linha 9, com carregamento considerável de trens metropolitanos e que seria ideal para coleta das medidas, localizado entre as subestações Morumbi (posição quilométrica – km 24,982) e estação Grajaú (posição quilométrica – km 41,575). Neste trecho foram instrumentadas as subestações Morumbi e Cidade Dutra (posição quilométrica – km 36,940) com intenção de se medir as correntes circulantes pelos disjuntores de 3 kVCC já apresentados.

Além do “trem-teste” instrumentado, as instalações fixas presentes no teste seriam as subestações Morumbi e Cidade Dutra e a cabine de paralelismo de Santo Amaro (posição quilométrica – km 30,278). A cabine do Grajaú na data do teste estaria inoperante por motivo de avaria de equipamento interno.

Segue abaixo, na Figura 16, o trecho de análise durante o teste para verificação da aplicabilidade do modelo representado pelo diagrama da rede aérea da Linha 9.

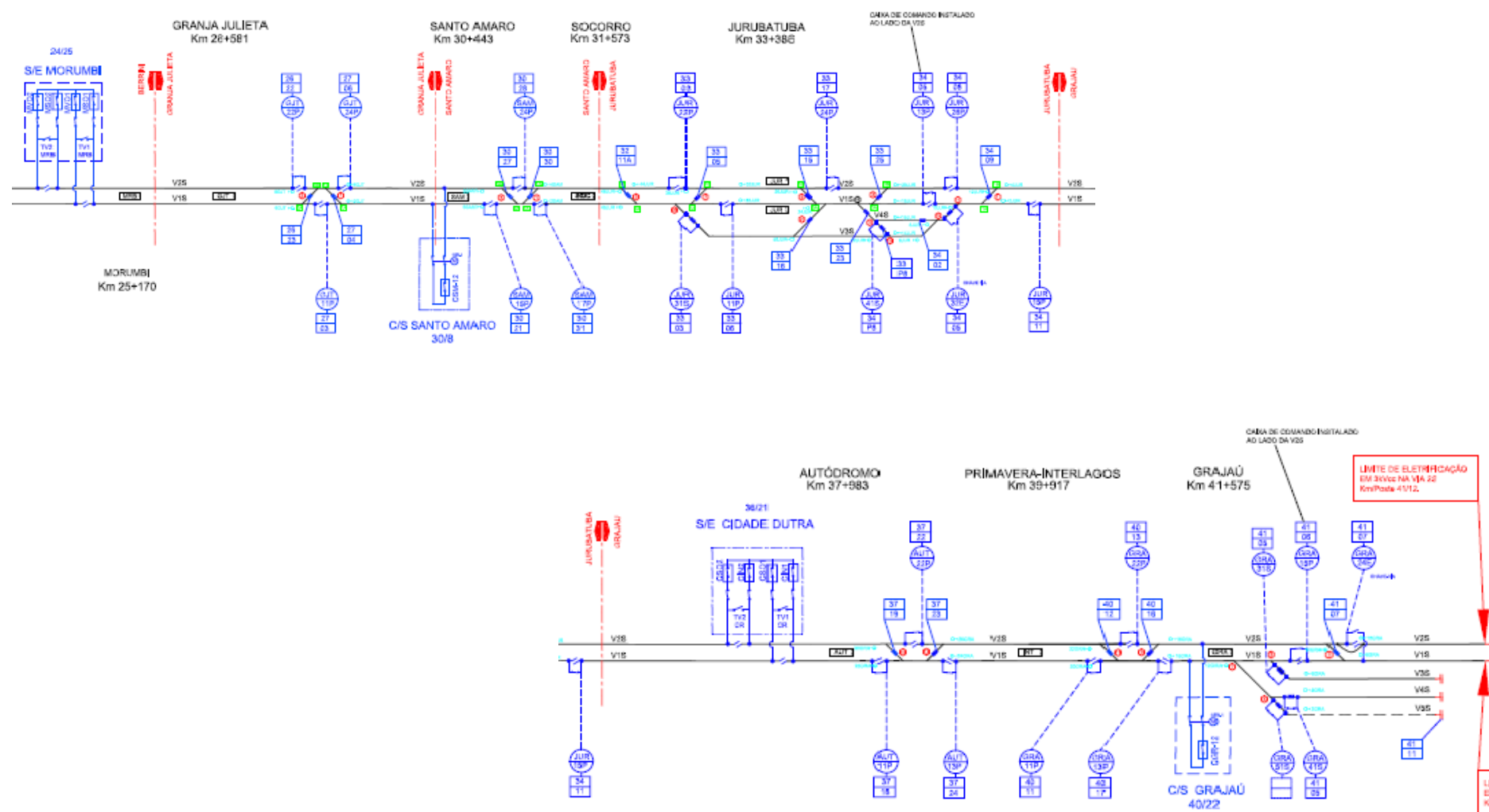


Figura 16 – Diagrama simplificado da Rede Aérea entre a Subestação Morumbi e o fim da eletrificação da Linha 9

4.2 Medições em vazio

Com objetivo de se conhecer a tensão em vazio das subestações Morumbi e Cidade Dutra em comparação com o valor teórico projetado pela eq.(5), as subestações em pauta foram instrumentadas em antecipação à viagem-padrão do “trem-teste”.

Foram abertas as chaves de saída de 3 kVCC das subestações em pauta, isolando-se assim as instalações da linha de contato. Pelo motivo de abertura das chaves de saída de 3 kVCC, este teste foi realizado no período da madrugada.

Posteriormente ligou-se 1 (um) oscilógrafo Yokogawa junto aos relés de supervisão e controle das subestações que coletam informações do shunt do barramento de saída. As portas de saída dos relés de supervisão e controle foram configuradas para medição de tensão. Esta tensão medida representava a tensão a vazio gerada pelos retificadores.

Pela eq. (5), como a tensão secundária dos transformadores é de 1,221 kV, a tensão a vazio seria da ordem de:

$$U_d = 2,70.U_{Lsec} \Rightarrow U_d = 2,70.1221 \Rightarrow U_d = 3296,7V \quad (9)$$

Com relação à subestação Cidade Dutra, a concessionária AES Eletropaulo alimenta a referida subestação preferencialmente pela Linha B em 88 kV, ficando a Linha A em stand-by. A tensão de linha alimenta o primário do transformador do retificador, sendo este transformador configurado no tap 3, com relação 88000/1221 (V).

Com intuito de realizar comparação com o valor teórico, foi instrumentado o transformador de potencial (TP) de entrada da subestação Cidade Dutra. Este TP possui relação 88000/115/ $\sqrt{3}$ (V). Utilizando um voltímetro, foram realizadas medidas entre as 3 (três) fases do TP com relação ao neutro (N), denotando os valores apresentados na Tabela 7.

TENSÃO A-N (V)	TENSÃO B-N (V)	TENSÃO C-N (V)
66,9	68,7	65,2
67,0	68,8	65,3
67,1	68,8	65,3
67,1	68,8	65,3
67,1	68,8	65,3
67,1	68,8	65,3
67,0	68,8	65,1

Tabela 7 – Tensões medidas no TP de entrada da subestação Cidade Dutra

Calculando-se a média dos valores da tabela, encontrou-se um valor de 67,0 V.

Utilizando a relação do TP, esta tensão representa na entrada:

$$67,0 \cdot \frac{88000}{\frac{115}{\sqrt{3}}} = 88839,36 \text{ V} \quad (10)$$

Com a referência de tensão denotada pelo TP, a tensão nos secundários do transformador do retificador vale:

$$88839,6 \cdot \frac{1221}{88000} = 1232,64 \text{ V} \quad (11)$$

A tensão acima referida ao lado de corrente contínua do retificador resulta:

$$U_d = 2,70 \cdot U_{Lsec} \Rightarrow U_d = 2,70 \cdot 1232,64 \Rightarrow U_d = 3328,1 \text{ V} \quad (12)$$

Esta variação de tensão na entrada da concessionária resulta numa diferença de 1% para cima no lado de corrente contínua do retificador.

Com relação à subestação Morumbi, a concessionária AES Eletropaulo alimenta a referida subestação preferencialmente pela Linha A em 88 kV, ficando a Linha B em stand-by. A tensão de linha alimenta o primário do transformador do retificador, sendo este transformador configurado no tap 2, com relação 88000/1221 (V).

Com intuito de realizar comparação com o valor teórico, foi instrumentado o transformador de potencial (TP) de entrada da subestação Morumbi. Este TP possui relação 88000/115/ $\sqrt{3}$ (V). Utilizando um voltímetro, foram realizadas medidas entre as 03 (três) fases do TP com relação ao neutro (N), denotando os valores apresentados na Tabela 8.

TENSÃO A-N (V)	TENSÃO B-N (V)	TENSÃO C-N (V)
63,2	63,4	63,4
63,3	63,4	63,4
63,3	63,4	63,4
63,3	63,4	63,4
63,3	63,4	63,5
63,3	63,4	63,5
63,3	63,4	63,5

Tabela 8 – Tensões medidas no TP de entrada da Subestação Morumbi

Calculando-se a média dos valores acima, encontrou-se um valor de 63,4 V.

Utilizando a relação do TP, esta tensão representa na entrada:

$$63,4 \cdot \frac{88000}{\frac{115}{\sqrt{3}}} = 84030,068V \quad (13)$$

Com a referência de tensão denotada pelo TP, a tensão nos secundários do transformador do retificador vale:

$$84030,068 \cdot \frac{1221}{88000} = 1165,91V \quad (14)$$

A tensão acima referida ao lado de corrente contínua do retificador resulta:

$$U_d = 2,70 \cdot U_{Lsec} \Rightarrow U_d = 2,70 \cdot 1165,91 \Rightarrow U_d = 3147,97V \quad (15)$$

Esta variação de tensão na entrada da concessionária resulta numa diferença de 4,5% para baixo no lado de corrente contínua do retificador.

Como a tensão a vazio medida na subestação Morumbi foi inferior ao valor teórico (3296,7 V) e o valor medido ou teórico necessita ser maior do que a tensão nominal do próprio retificador (3160 V) para o equipamento apresentar comportamento como gerador, durante a simulação com o software PSIM 6.0 o valor adotado para a tensão a vazio da subestação Morumbi será o valor da tensão a vazio obtido na subestação Cidade Dutra (3328,1 V) (Figura 17).

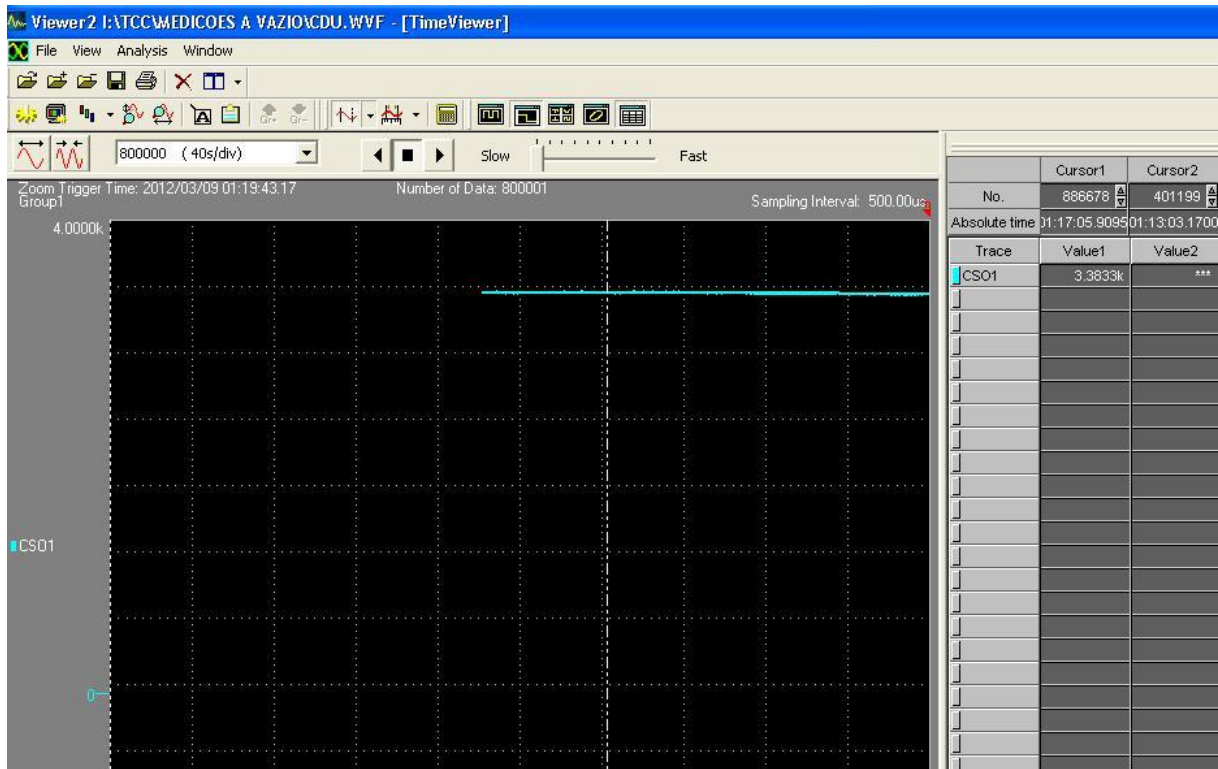


Figura 17 – Yokogawa – Medição a vazio - SE Cidade Dutra

4.3 Cálculo de RSE

O cálculo da resistência equivalente (RSE) de cada um dos retificadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra foi realizado tomando-se os dados de placa dos equipamentos em questão.

No caso da subestação Cidade Dutra, a tensão nominal em regime permanente (100% de plena carga no lado de corrente contínua) entre os terminais positivo e negativo de 01 (um) retificador é de 3180 V sendo que a corrente nominal gerada pelo mesmo nestas condições é de 1250 A. Como a tensão a vazio medida nesta subestação é de 3328,1 V, tem-se pela eq.(1):

$$U_d = U_{d0} - I_d \cdot R_{SE}$$

$$3180 = 3328,1 - 1250 \cdot R_{SE} \Rightarrow R_{SE} = \frac{(3328,1 - 3180)}{1250} \Rightarrow R_{SE} = 118,51 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Como existem 02 (dois) grupos retificadores em paralelo, a resistência equivalente da subestação Cidade Dutra vale $R_{SE}/2$, ou seja:

$$R_{SUB} = \frac{R_{SE}}{2} = \frac{118,51}{2} = 59,257 m\Omega \quad (17)$$

No caso da subestação Morumbi, a tensão nominal em regime permanente (100% de plena carga no lado de corrente contínua) entre os terminais positivo e negativo de 1 (um) retificador é de 3160V sendo que a corrente nominal gerada pelo mesmo nestas condições é de 1265A. Como a tensão a vazio adotada nesta subestação é idêntica a subestação Cidade Dutra, tem-se pela eq. (1):

$$U_d = U_{d0} - I_d \cdot R_{SE}$$

$$3160 = 3328,1 - 1265 \cdot R_{SE} \Rightarrow R_{SE} = \frac{(3328,1 - 3160)}{1265} \Rightarrow R_{SE} = 132,88 m\Omega \quad (18)$$

Como existem 2 (dois) grupos retificadores em paralelo, a resistência equivalente da subestação Cidade Dutra vale $R_{SE}/2$, ou seja:

$$R_{SUB} = \frac{R_{SE}}{2} = \frac{132,88}{2} = 66,443 m\Omega \quad (19)$$

4.4 Ensaios em campo

4.4.1 Execução do teste

O teste para verificação da aplicabilidade do modelo proposto foi realizado no dia 04.04.2012, sendo que o “trem-teste” foi recolhido para instrumentação no pátio de manutenção do material rodante de Presidente Altino entre os dias 02.04.2012 e 04.04.2012.

O “trem-teste” série 2070 saiu do pátio de Presidente Altino com prefixação ET615 às 16:15:10 e, após 2 (duas) voltas ou ciclos na Linha 9, ou seja, 2 (duas) vezes o percurso Osasco-Grajaú/Grajaú-Osasco, o teste se encerrou às 19:45:54 na estação Osasco.

A escolha do horário do teste para o “rush” da tarde foi proposital, objetivando-se simular o caso de maior carregamento possível dentro da circulação.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentadas as prefixações atribuídas ao “trem teste”, no primeiro e segundo ciclo respectivamente, com as respectivas chegadas nas estações e seu carregamento aproximado (em toneladas).

1°. Ciclo					
Ida – Prefixação: UC810			Volta – Prefixação: UC827		
Estação	Chegada	Carregamento	Estação	Chegada	Carregamento
Osasco	16:19:55	90,1	Osasco	18:04:28	104,4
Presidente Altino	16:24:02	90,6	Presidente Altino	17:59:44	107,7
Ceasa	16:27:08	92,3	Ceasa	17:56:17	119,2
Villa-Lobos-Jaguare	16:28:58	93,4	Villa-Lobos-Jaguare	17:53:58	119,2
Cidade Universitária	16:32:30	95,6	Cidade Universitária	17:51:08	120,3
Pinheiros	16:36:43	109,3	Pinheiros	17:47:52	119,8
Hebraica-Rebouças	16:38:48	111,0	Hebraica-Rebouças	17:45:33	133,5
Cidade Jardim	16:40:48	111,0	Cidade Jardim	17:42:45	132,4
Vila Olímpia	16:42:29	112,6	Vila Olímpia	17:40:20	130,8
Berrini	16:44:31	113,7	Berrini	17:37:57	125,3
Morumbi	16:47:05	114,8	Morumbi	17:35:17	117,6
Granja Julieta	16:49:52	116,5	Granja Julieta	17:33:11	113,2
Santo Amaro	16:54:06	112,6	Santo Amaro	17:28:55	107,1
Socorro	16:56:23	111,5	Socorro	17:26:15	101,6
Jurubatuba	16:58:50	117,1	Jurubatuba	17:21:52	100,1
Autódromo	17:03:19	118,7	Autódromo	17:17:50	93,9
Primavera-Interlagos	17:05:48	116,5	Primavera-Interlagos	17:13:45	92,8
Grajaú	17:09:44	93,4	Grajaú	17:09:44	93,4
Tempo de viagem ida		00:49:49	Tempo de viagem volta		00:54:44

Tabela 9 – Tempos de chegada e carregamento na primeira viagem

2º. Ciclo					
Ida – Prefixação: UC838			Volta – Prefixação: UC859		
Estação	Chegada	Carregamento	Estação	Chegada	Carregamento
Osasco	18:04:28	104,4	Osasco	19:45:54	92,0
Presidente Altino	18:08:45	103,8	Presidente Altino	19:43:23	93,4
Ceasa	18:12:16	107,1	Ceasa	19:41:47	93,9
Villa-Lobos-Jaguaré	18:14:50	102,1	Villa-Lobos-Jaguaré	19:39:58	96,1
Cidade Universitária	18:17:51	117,0	Cidade Universitária	19:37:17	97,2
Pinheiros	18:21:41	134,6	Pinheiros	19:34:37	99,4
Hebraica-Rebouças	18:24:44	134,6	Hebraica-Rebouças	19:32:35	106,6
Cidade Jardim	18:27:32	134,6	Cidade Jardim	19:30:31	104,9
Vila Olímpia	18:30:20	134,6	Vila Olímpia	19:28:46	103,3
Berrini	18:33:40	134,6	Berrini	19:26:43	98,9
Morumbi	18:37:33	134,6	Morumbi	19:24:12	95,0
Granja Julieta	18:40:35	134,6	Granja Julieta	19:22:10	94,5
Santo Amaro	18:45:06	121,4	Santo Amaro	19:17:52	96,1
Socorro	18:48:19	123,1	Socorro	19:15:45	96,1
Jurubatuba	18:50:36	132,4	Jurubatuba	19:12:56	93,9
Autódromo	18:56:12	133,0	Autódromo	19:08:47	92,3
Primavera-Interlagos	18:58:53	-	Primavera-Interlagos	19:06:00	91,0
Grajaú	19:02:18	92,8	Grajaú	19:02:18	92,8
Tempo de viagem ida		00:57:50	Tempo de viagem volta		00:43:36

Tabela 10 – Tempos de chegada e carregamento na segunda viagem

4.5 “Foto” do sistema de tração

Conforme estabelecido anteriormente, o trecho escolhido para verificação da aplicabilidade do modelo proposto estaria centralizado entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú. Neste trecho seria escolhido um instante de tempo para “fotografia” do sistema de tração, elencando as subestações e cabine presentes, além das cargas móveis (trens) e resistências equivalentes.

Esta escolha foi permeada por diversas dificuldades e considerações a serem realizadas para verificação da aplicabilidade do modelo proposto.

4.5.1 Considerações para verificação da aplicabilidade do modelo

As considerações para verificação da aplicabilidade do modelo proposto são mostradas abaixo:

- Localização exata dos trens não instrumentados: O relatório gerado pelos computadores considera as informações geradas em campo pela ocupação dos circuitos de via, sendo conhecido apenas o momento em que o trem entrar no circuito e o momento que o trem sai. Desta forma, para instantes intermediários, a posição quilométrica do trem torna-se aproximada, com a necessidade de inclusão de uma determinada tolerância para regulação.
- Amostragem dos oscilógrafos: Como a corrente circulante pelos disjuntores de 3 kVCC das subestações e a corrente absorvida pelo motor ou injetada na rede pelo “trem-teste” é extremamente variante no tempo, ajustou-se um intervalo para coleta de amostras comum para os 3 (três) oscilógrafos de 10 ms. Este nível de amostragem capta as variações necessárias para uma melhor verificação da aplicabilidade do modelo, entretanto como os instrumentos registram 100 amostras por segundo fica extremamente difícil arbitrar-se um valor de corrente exato para os trens na simulação da “foto” (pelo PSIM 6.0) do sistema de tração e posterior comparação do valor simulado pelo PSIM 6.0 com os valores registrados nas subestações Morumbi

e Cidade Dutra, no tocante à corrente circulante pelos disjuntores de 3 kVCC. Neste interim, os ajustes ou regulagens das correntes simuladas foram realizados a partir dos valores das 100 amostras, registrados naquele segundo de análise.

- Modo de operação do “trem-teste”: Os trens série 2070 podem ser configurados para trabalhar em 2 (dois) modos: Modo “potência reduzida” ou modo “potência plena”. Como o “trem-teste” foi configurado no modo “potência reduzida”, o instante de tempo a ser considerado para “fotografia” do sistema de tração deveria portar trens não instrumentados neste modo de operação com o agravante de se referir falsamente a corrente do “trem-teste” para um trem não instrumentado em outra condição de operação. Isto refletiria em uma simulação e uma posterior comparação errônea com as correntes registradas nas subestações.

Uma maneira de se mitigar este problema foi a investigação da corrente circulante pelos alimentadores (disjuntores de 3 kVCC) CIN1 e CIN2 da subestação Cidade Dutra. Diferentemente dos alimentadores MVO1, MVO2, MSO1, MSO2, CSO1 e CSO2 que estão diretamente interligados pela presença de várias composições em seus domínios, além da presença da cabine de paralelismo de Santo Amaro, os alimentadores CIN1 e CIN2 podem ser considerados exclusivos pela não participação da cabine de paralelismo do Grajaú no dia do teste.

Em condições operacionais normais, como o trecho entre os alimentadores CIN1 e CIN2 dista aproximadamente 4 km da estação Grajaú, é comum se encontrar somente 1 (um) trem, por via, neste trecho. Nestas condições, visualizando-se o comportamento da corrente circulante pelos alimentadores CIN1 e CIN2 da subestação Cidade Dutra através do oscilógrafo Yokogawa, consegue-se verificar se uma determinada composição está no modo “potência reduzida” ou “potência plena” pela comparação com a curva de corrente do “trem-teste”.

Adicionalmente, de maneira simples, é possível realizar a verificação da aplicabilidade do modelo proposto comparando-se a corrente de um trem em incógnita presente no domínio de CIN1 ou CIN2 (através da referência de corrente do registrador Yokogawa, instalado no “trem-teste”, para a posição quilométrica em que o trem em incógnita se encontra) com a corrente registrada pelo registrador Yokogawa, instalado na subestação Cidade Dutra, em CIN1 ou CIN2.

Esta prova real não necessita sequer da simulação via PSIM 6.0, uma vez que os alimentadores CIN1 ou CIN2 estarão “dedicados” a somente 1 (um) trem.

- Exclusão de atrasos e situações operacionais especiais: Na escolha do instante de tempo para “foto”, não deveria haver trens não instrumentados em posições quilométricas em que o “trem-teste” sofreu (ou sofreria) atrasos ou se comportou de maneira diferente da nominal, como por exemplo, paradas por situações contingenciais no meio do percurso entre estações. Esta situação não ideal incorreria em referir uma corrente falsa ao trem não instrumentado, o que posteriormente refletiria em erro na simulação e na comparação. A recíproca também é verdadeira, ou seja, o trem não instrumentado poderia ter sofrido atrasos em que o “trem-teste” não sofreu, incorrendo no mesmo erro. Entretanto, este último fato pode ser corrigido com as devidas regulagens, conforme descrito anteriormente.

Outra situação operacional indesejada na escolha do instante de tempo para “foto” do sistema de tração é a existência do “looping interno”. Como o “trem-teste” não executou nenhum “looping interno” durante o ensaio, na escolha do instante de tempo para verificação da aplicabilidade não deveria haver trens não instrumentados executando o chamado “looping interno”. Isto se faz necessário, uma vez que na transposição de uma via para outra na Linha 9, o trem não está em velocidade nominal, o que, da mesma maneira que no parágrafo em epígrafe, significaria referir uma corrente falsa ao trem não instrumentado.

- Frotas diferentes: Conforme mencionado anteriormente, apesar da imensa maioria de trens série 7000 e 7500 na operação da Linha 9, o trem instrumentado foi o trem N4 da série 2070. Os trens série 7000 e 7500 da fabricante CAF são trens idênticos no tocante às características e desempenhos, com peculiaridades em seu “layout”. O trem série 2070 da fabricante Alstom/Bombardier/CAF possui diferenças em relação às 02 (duas) frotas mencionadas acima. Na data e horário do teste, não circularam trens da frota série 3000, conforme se visualiza na Tabela 11.

Nº trens	15h00	16h00	17h00	18h00	19h00	20h00	21h00
01	N1- 2070	N1- 2070	N1- 2070	N1- 2070	N1- 2070	N1- 2070	N1- 2070
02	N2 - 2070	N2 - 2070	N2 - 2070	N2 - 2070	N2 - 2070	N2 - 2070	N2 - 2070
03	Q11 -	Q11 -	N4 - 2070	N4 - 2070	N4 - 2070	N3 - 2070	N5 - 2070
04	Q14 -	Q14 -	Q11 -	Q11 -	N5 - 2070	N4 - 2070	Q11 -
05	Q19 -	Q19 -	Q14 -	Q14 -	Q11 -	N5 -2070	Q15 -
06	Q20 -	Q20 -	Q15 -	Q15 -	Q14 -	Q11 -	Q16 -
07	Q23 -	Q23 -	Q16 -	Q16 -	Q15 -	Q14 -	Q17 -
08	Q32 -	Q32 -	Q19 -	Q19 -	Q16 -	Q15 -	Q20 -
09	Q39 -	Q39 -	Q20 -	Q20 -	Q19 -	Q16 -	Q23 -
10	R02 -	R02 -	Q23 -	Q23 -	Q20 -	Q17 -	Q32 -
11	R03 -	R03 -	Q32 -	Q32 -	Q23 -	Q20 -	Q39 -
12	R05 -	R05 -	Q39 -	Q39 -	Q32 -	Q23 -	Q40 -
13	R06 -	R06 -	Q40 -	Q40 -	Q39 -	Q32 -	R02 -
14	R08 -	R08 -	R02 -	R02 -	Q40 -	Q39 -	R04 -
15			R03 -	R03 -	R02 -	Q40 -	R05 -
16			R04 -	R04 -	R03 -	R02 -	R06 -
17			R05 -	R05 -	R04 -	R04 -	R08 -
18			R06 -	R06 -	R05 -	R05 -	
19			R08 -	R08 -	R06 -	R06 -	
20					R08 -	R08 -	

Tabela 11 – Frotas e quantidades de trens circulando no dia 04.04.2012

A maior quantidade de trens em operação foi entre as 19h00 e 20h00, com pico de 20 (vinte) composições.

Durante a verificação da aplicabilidade do modelo, como a maior parte dos trens não instrumentados seria das séries 7000 e 7500, utilizou-se para regulagem a curva de corrente de linha padrão das séries 2070 e 7000/7500, para comparação entre as mesmas.

Deste modo, as correntes registradas pelo “trem-teste” série 2070 seriam referidas aos trens série 7000/7500 e posteriormente corrigidas mediante as curvas de corrente de linha de cada uma das séries. Este valor de corrente corrigido seria atribuído na confecção do circuito equivalente no PSIM 6.0, uma vez que os trens seriam modelados por fontes de correntes.

Segue abaixo na Figura 18, a curva de corrente de linha correspondente às séries 2070 e 7000/7500 utilizada como base para refinamento das correntes dos trens não instrumentados. Popularmente, devido às características de contrato e fabricação, os trens série 2070 são conhecidos como TRENS COFESBRA II AW0 e os trens série 7000/7500 como TRENS CAF.

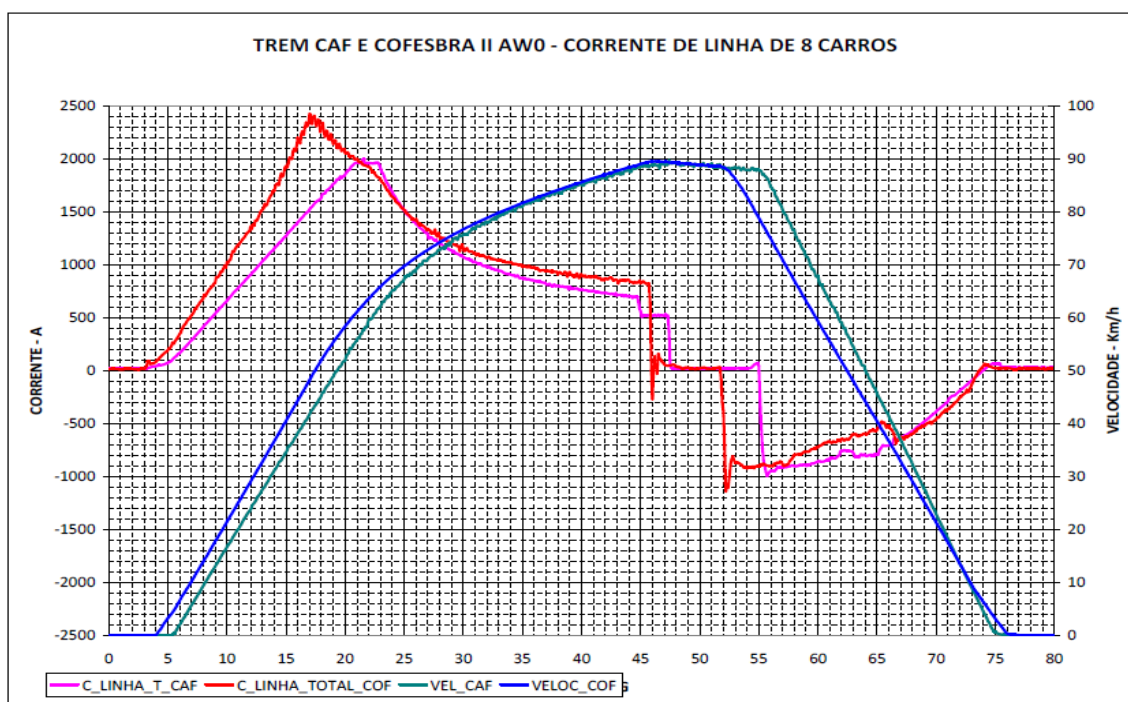


Figura 18 – Curvas dos trens CAF e COFESBRA II AW0

Durante o período do ensaio, o “trem-teste”, bem como toda a operação de trens da Linha 9 não foram afetadas por ocorrências danosas, tais como problemas envolvendo o material rodante ou problemas envolvendo as instalações fixas presentes (subestações e cabines, rede aérea, distribuição elétrica, sinalização e telecomunicações, via permanente, dentre outros subsistemas).

Ocorreram atrasos, como pode ser visto nas tabelas 8 e 9 no tocante ao tempo de viagem de ida e volta, causados, em geral, pela superlotação evidenciada na Linha 9, no horário de pico.

As subestações retificadoras instrumentadas (Morumbi e Cidade Dutra) tiveram desarmes de disjuntores de 3 kVCC, causadas por sobrecargas pontuais, entretanto estes alimentadores apresentaram rearme automático após breve período, não prejudicando a circulação dos trens metropolitanos na Linha 9. As aberturas evidenciadas ocorreram nos seguintes alimentadores:

- Subestação Cidade Dutra
 - CIN1: 18h14;
 - CSO1: 18h43;
 - CSO2: 19h20;
 - CIN1: 20h09;
 - CIN1: 20h44.S
- Subestação Morumbi:
 - MSO1: 18:41;
 - MSO2: 19h18.

4.6 Instante de tempo escolhido para verificação da aplicabilidade

Em virtude das considerações elencadas acima e após uma busca criteriosa para escolha do instante de tempo que seria a “fotografia” do sistema de tração para verificação da aplicabilidade do modelo proposto, escolheu-se o instante de tempo 17:27:34.

O painel sinóptico do CCO, no instante de tempo de análise (Figura 19), registrou a configuração da Linha 9 entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú apresentada na Tabela 12.

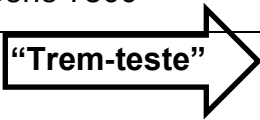
Via 1S	Via 2 S
UC454 – Trem Q15 – Série 7000	UC831 – Trem R05 – Série 7500
UC818 – Trem Q19 – Série 7000	UC829 – Trem Q14 – Série 7000
UC816 – Trem R02 – Série 7500	UC455 – Trem Q40 – Série 7000
	UC827 – Trem N04 – Série 2070
	UC453 – Trem Q20 – Série 7000

Tabela 12 – Trens presentes às 17:27:34 do dia 04.04.2012 entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú, com respectiva série

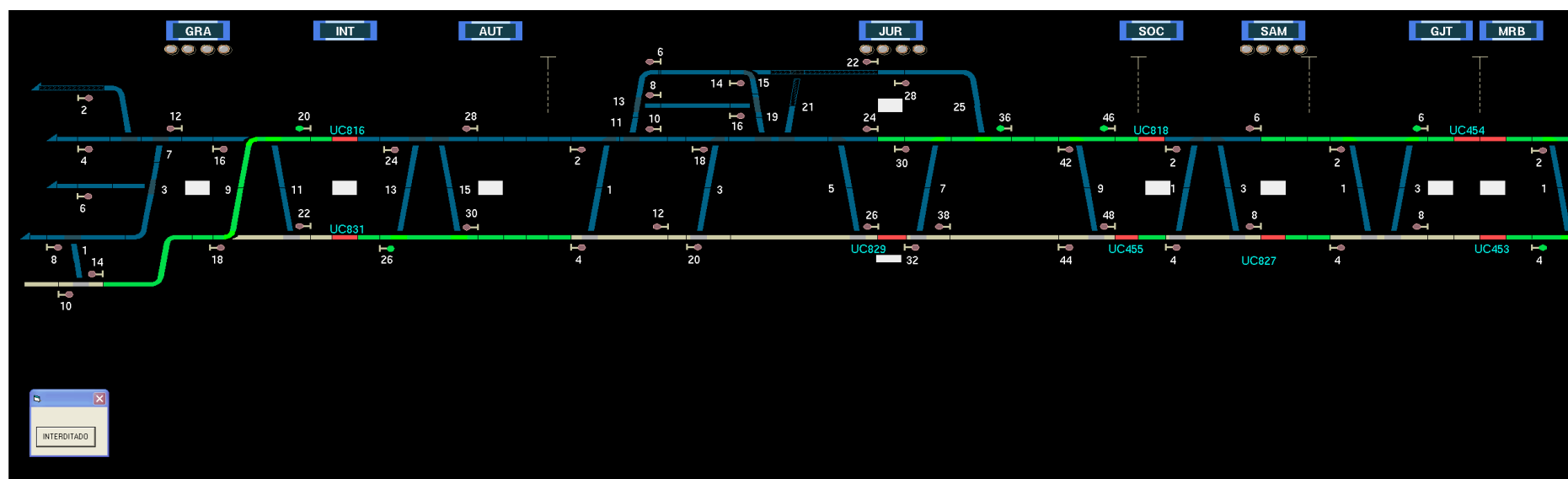


Figura 19 – Painel sinóptico do CCO às 17:27:34 do dia 04.04.2012 entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú

Foram totalizados 8 (oito) trens entre a subestação Morumbi e a estação Grajaú no dia do teste às 17:27:34, sendo 3 (três) trafegando pela V1S e os 5 (cinco) restantes se localizaram na V2S, inclusive o “trem-teste”, série 2070 e mais 4 (quatro) veículos residuais correspondentes às frotas 7000/7500.

A correlação da prefixação do trem com sua respectiva frota foi realizada tomando-se como base o relatório de acompanhamento de trens unidades do CCO, o qual pode ser visualizado no ANEXO A.

4.7 Ratificação do modelo

4.7.1 Localização de trens e instalações

O primeiro passo para ratificação e posterior verificação da aplicabilidade do modelo proposto é a localização quilométrica aproximada dos trens e instalações (cabines e subestações) ao longo do trecho, no instante de tempo escolhido.

A partir deste posicionamento, conforme já ressaltado, é possível confeccionar o circuito elétrico do sistema de tração no instante de tempo de análise, com as distribuições das fontes de tensão (representação de subestações), das resistências equivalentes (representação das quedas de tensão ao longo da rede aérea de 3 kVcc e do circuito de retorno) e das fontes de correntes (representação dos trens presentes) para posteriormente, este circuito elétrico, ser simulado pelo software PSIM 6.0.

A localização quilométrica das instalações fixas foi obtida através de um documento padrão da CPTM (diagrama unifilar simplificado das Linhas 8/9 - Rede aérea de 3 kVCC e sinalização), obtendo-se: os valores apresentados na Tabela 13.

Subestação Morumbi (SE MRB)	Cabine de paralelismo Santo Amaro (CP SAM)	Subestação Cidade Dutra (SE CDU)
km 25,082	km 30,332	km 36,347

Tabela 13 – Posição quilométrica das instalações fixas

O posicionamento quilométrico aproximado dos trens ao longo do trecho foi realizado com base no relatório SGDO, que retrata os resultados da sinalização de campo, conforme exposto anteriormente. Tomando-se o relatório SGDO para proximidades do instante de tempo de análise (17:27:34), obtém-se os resultados apresentados na Tabela 14.

REGISTROS SGDO						
DATA	HORÁRIO		EVENTO	LOCAL	SINAL	SINAL
04/04/2012	17:26:51	IND:	Trem UC454 partiu do circuito	UTR:BRR	CDV:BRR2A	
04/04/2012	17:26:51	IND:	Trem UC454 atrasado (00:13:51)	DOM:BRR		
04/04/2012	17:27:17	IND:	Trem UC454 no circuito	UTR:GJT	CDV:GJT6A	
04/04/2012	17:29:22	IND:	Trem UC454 partiu do circuito	UTR:BRR	CDV:MRBPL1	
04/04/2012	17:27:24	IND:	Trem UC818 no circuito	UTR:SAM	CDV:SOC-PLA	T1
04/04/2012	17:27:34	IND:	Trem UC818 partiu do circuito	UTR:SAM	CDV:1AT	
04/04/2012	17:27:34	IND:	Trem UC818 atrasado (00:10:34)	DOM:SAM		
04/04/2012	17:29:04	IND:	Trem UC818 no circuito	UTR:JUR	CDV:1W05	
04/04/2012	17:27:03	IND:	Trem UC816 partiu do circuito	UTR:GRA	CDV:1W05	
04/04/2012	17:27:35	IND:	Trem UC816 no circuito	UTR:GRA	CDV:1W03	
04/04/2012	17:27:44	IND:	Trem UC816 partiu do circuito	UTR:GRA	CDV:1W04	
04/04/2012	17:27:44	IND:	Trem UC816 atrasado (00:07:44)	DOM:GRA		
04/04/2012	17:26:14	IND:	Trem UC831 partiu do circuito	UTR:GRA	CDV:2W02	
04/04/2012	17:26:14	IND:	Trem UC831 atrasado (00:03:14)	DOM:GRA		
04/04/2012	17:28:34	IND:	Trem UC831 no circuito	UTR:GRA	CDV:2W04	
04/04/2012	17:28:44	IND:	Trem UC831 partiu do circuito	UTR:GRA	CDV:2W03	
04/04/2012	17:27:08	IND:	Trem UC829 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:2E03	
04/04/2012	17:27:16	IND:	Trem UC829 no circuito	UTR:JUR	CDV:2E01	
04/04/2012	17:27:45	IND:	Trem UC829 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:2E02	
04/04/2012	17:27:45	IND:	Trem UC829 atrasado (00:04:45)	DOM:JUR		
04/04/2012	17:26:49	IND:	Trem UC455 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:1W04	
04/04/2012	17:26:59	IND:	Trem UC455 no circuito	UTR:JUR	CDV:2W04	
04/04/2012	17:26:59	IND:	Trem UC455 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:2W03	
04/04/2012	17:28:46	IND:	Trem UC455 no circuito	UTR:SAM	CDV:SOC-PLA	T2
04/04/2012	17:26:59	IND:	Trem UC827 partiu do circuito	UTR:JUR	CDV:2W04	
04/04/2012	17:27:58	IND:	Trem UC827 no circuito	UTR:SAM	CDV:1T	
04/04/2012	17:28:09	IND:	Trem UC827 partiu do circuito	UTR:SAM	CDV:SOC-PLA	T2
04/04/2012	17:28:13	IND:	Trem UC827 no circuito	UTR:SAM	CDV:SAM-PLA	T2
04/04/2012	17:27:25	IND:	Trem UC453 no circuito	UTR:BRR	CDV:MRBPL2	
04/04/2012	17:27:44	IND:	Trem UC453 partiu do circuito	UTR:GJT	CDV:GJT8A	
04/04/2012	17:27:44	IND:	Trem UC453 atrasado (00:06:44)	DOM:BRR		
04/04/2012	17:28:36	IND:	Trem UC453 no circuito	UTR:BRR	CDV:BRR4A	

Tabela 14 – Relatório SGDO de posicionamento dos trens

De posse deste relatório, correlacionando-o com o PVS da Linha 9 e comparando-o com o painel sinóptico do CCO, obtém-se o posicionamento quilométrico aproximado dos trens (Tabela 15).

Trem	Posição quilométrica	Status
UC454	km 26,115	Entre as estações Morumbi e Granja Julieta – V1S
UC818	km 30,774	Entre as estações Santo Amaro e Socorro – V1S
UC816	km 38,890	Entre as estações Autódromo e Primavera-Interlagos – V1S
UC831	km 39,283	Imediatamente saindo da estação Primavera-Interlagos – V2S
UC829	km 33,424	Entre as estações Autódromo e Jurubatuba, chegando em Jurubatuba – V2S
UC455	km 32,333	Entre as estações Jurubatuba e Socorro, chegando a Socorro – V2S
UC827	km 30,732	Entre as estações Socorro e Santo Amaro – V2S
UC453	km 25,266	Imediatamente saindo da estação Morumbi – V2S

Tabela 15 – Posicionamento dos trens metropolitanos

4.7.2 Cálculo das resistências equivalentes da rede aérea de 3 kVCC e circuito de retorno

No instante de tempo escolhido, para a via V1S, a Tabela 16 abaixo denota as distâncias entre as instalações/trens e trens/trens.

V1S	SE MRB UC454	UC454 CP SAM	CP SAM UC818	UC818 SE CDU	SE CDU UC816	UC454 UC818
Distância [km]	1,033	4,217	0,442	5,573	2,543	4,659

Tabela 16 – Distância entre instalações fixas e trens na V1S

No instante de tempo escolhido, para a via V2S, a Tabela 17 abaixo denota as distâncias entre as instalações/trens e trens/trens:

V2S	SE MRB UC453	UC453 CP SAM	CP SAM UC827	UC827 UC455	UC455 UC829	UC829 SE CDU	SE CDU UC831	UC453 UC827
Distância [km]	0,184	5,066	0,400	1,601	1,091	2,923	2,936	5,466

Tabela 17 – Distância entre instalações fixas e trens na V2S

Conforme mencionado anteriormente, tomando-se a resistência da catenária (R_{cat}) de 38,115 m Ω /km e a resistência para 2 (dois) trilhos em paralelo de 9,55 m Ω /km, tem-se as resistências equivalentes (em m Ω) apresentadas nas Tabelas 18 e 19:

V1S	SE MRB UC454	UC454 CP SAM	CP SAM UC818	UC818 SE CDU	SE CDU UC816	UC454 UC818
R_{cat}	39,372	160,730	16,846	212,414	96,926	-
R_{rt}	9,865	-	-	53,222	24,285	44,493

Tabela 18 – Resistências entre instalações fixas e trens na V1S

V2S	SE MRB UC453	UC453 CP SAM	CP SAM UC827	UC827 UC455	UC455 UC829	UC829 SE CDU	SE CDU UC831	UC453 UC827
R_{cat}	7,013	193,090	15,246	61,022	41,583	111,410	111,905	-
R_{rt}	1,757	-	-	15,289	10,419	27,914	28,038	52,200

Tabela 19 – Resistências entre instalações fixas e trens na V2S

4.7.3 Correntes associadas aos trens não instrumentados

Em tempo, conforme denotado anteriormente, dos 8 (oito) trens presentes na “foto” do sistema de tração, apenas o “trem-teste” é da frota 2070, sendo os demais 7 (sete) trens da frota 7000/7500.

De acordo com a posição quilométrica aproximada dos trens não instrumentados no instante de tempo escolhido para análise, conseguiu-se verificar a partir do oscilógrafo Yokogawa instalado no “trem-teste” em que momento, passado ou futuro, o “trem-teste” esteve ou estaria naquele marco.

Este posicionamento, de preferência, deveria ser realizado no mesmo ciclo (primeiro ou segundo), uma vez que o carregamento de pessoas seria mais próximo e as correntes referidas aos trens não instrumentados seriam mais próximas do valor real, uma vez que, em um ciclo passado/futuro o carregamento de pessoas poderia ser muito maior ou menor, aumentando a possibilidade de divergência na associação de correntes e na simulação.

Por exemplo: O “trem-teste” passou pelo km 26,115 – V1S (onde o trem UC454 estava às 17:27:34) no primeiro ciclo (com prefixo UC810) e no segundo ciclo (com prefixo UC838). Como o instante de tempo escolhido e a “foto” do sistema de tração referem-se ao primeiro ciclo, o momento em que o “trem-teste” esteve ou estaria no km 26,115 deveria estar associado ao primeiro ciclo, a menos que uma situação operacional indesejada ou outro fato anômalo nesta posição induzisse a um comportamento da corrente medida em resultados muito diferentes do nominal.

Posto isso, para o respectivo ciclo, seria possível verificar a corrente medida no oscilógrafo do “trem-teste” naquela posição e instante, tratá-la e associá-la a cada um dos trens não instrumentados (de frota diferente).

A Tabela 20 abaixo denota de acordo com a posição quilométrica dos trens não instrumentados às 17:27:34, o momento, passado ou futuro, em que o “trem-teste” esteve ou estaria naquela posição durante o primeiro ciclo.

Trem	Posição quilométrica às 17:27:34	Status (no primeiro ciclo) do “trem-teste” – Prefixos UC 810 (ida – V1S) e UC827 (volta – V2S)
UC45	km 26,115	Esteve no km 26,115 – V1S às 16:49:07
UC81	km 30,774	Esteve no km 30,774 – V1S às 16:55:15
UC81	km 38,890	Esteve no km 38,890 – V1S às 17:05:07
UC83	km 39,283	Esteve no km 39,283 – V2S às 17:16:02
UC82	km 33,424	Esteve no km 33,424 – V2S às 17:21:50
UC45	km 32,333	Esteve no km 32,333 – V2S às 17:25:13
UC82	km 30,732	Estava no km 30,732 – V2S às 17:27:34 – “Trem-
UC45	km 25,266	Estaria no km 25,266 – V2S às 17:35:50

Tabela 20 – Status do “trem-teste”

No ANEXO B, a partir de informações geradas pelo oscilógrafo Yokogawa do “trem-teste”, são verificadas as correntes (no segundo de análise) que serão tratadas e referidas a cada um dos trens não instrumentados (a partir dos valores das 100 amostras de corrente).

Com auxílio do software Xviewer, as informações em epígrafe foram tratadas, gerando-se o cálculo da média das amostras e os valores iniciais e finais, conforme Tabela 21.

Trem não instrumentado associado	UC453	UC454	UC818	UC455	UC829	UC816	UC831
1ªAmostra	310,420	1279,200	-747,080	856,250	-168,330	859,170	498,330
100ªAmostra	125,420	-896,250	132,500	5,000	35,000	-42,083	643,330
Média 100 amostras iniciais	199,330	-114,970	-224,660	683,350	-58,620	772,340	570,050
Média 50 amostras iniciais	261,280	324,700	-487,720	858,070	-109,550	844,490	531,570
Média 50 amostras finais	137,290	-554,830	38,750	512,000	-7,608	701,650	608,560

Tabela 21 – Correntes registradas pelo “trem-teste” sem correção

Pela Tabela 21, percebe-se a grande variação das correntes registradas no “trem-teste” considerando o intervalo de tempo de 1 (um) segundo. O caso mais drástico se trata do trem UC454 que registrou na 1ª. amostra uma ampacidade de 1279,20 A e após 1 (um) segundo, registrou a 100ª. amostra de -896,25 A.

Estas correntes foram então refinadas (através de regressão linear), uma vez que o “trem-teste” instrumentado é da série 2070 (diferente dos trens não instrumentados, por serem da série 7000/7500), resultando nos valores apresentados na Tabela 22.

Trem não instrumentado associado	UC453	UC454	UC818	UC455	UC829	UC816	UC831
1ªAmostra	175,726	828,853	-885,851	543,711	-146,015	545,679	302,410
100ªAmostra	51,004	-1076,540	55,777	-30,180	-9,955	15,371	400,166
Média 100 amostras iniciais	100,832	-77,803	-218,024	427,146	-5,769	487,141	350,762
Média 50 amostras iniciais	142,597	185,354	-554,302	544,938	-70,875	535,782	324,820
Média 50 amostras finais	59,007	-640,091	-7,426	311,626	59,441	439,483	376,725

Tabela 22 – Correntes registradas pelo “trem-teste” corrigidas para os trens não instrumentados

4.7.4 Correntes registradas nas subestações Morumbi e Cidade Dutra

A Tabela 23 denota, no instante de tempo escolhido (17:27:34), as correntes circulantes por cada um dos alimentadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra, excetuando os alimentadores MVO1 e MVO2 da subestação Morumbi, por não estarem contemplados no trecho de análise.

Alimentador	CIN1	CIN2	CSO1	CSO2	MSO1	MSO2
1ªAmostra	105,000	360,000	-185,830	-256,670	-120,000	-189,170
100ªAmostra	107,500	490,000	-255,330	-235,000	-93,330	-100,830
Média 100 amostras iniciais	106,390	424,480	-232,640	-265,820	-106,570	-135,300

Tabela 23 – Correntes registradas pelos alimentadores das subestações

No ANEXO C, a partir de informações geradas pelos oscilógrafos Yokogawa instalados junto aos relés SITRAS dos alimentadores, são verificadas as correntes circulantes por cada um dos disjuntores de 3 kVCC das subestações Morumbi e Cidade Dutra. Ressalta-se que o intervalo de tempo para coleta das amostras de corrente dos alimentadores nas subestações é similar ao praticado pelo oscilógrafo do “trem-teste”, ou seja, 10 ms.

Com auxílio do software Xviewer, as correntes coletadas foram tratadas, gerando-se o cálculo da média das amostras e os valores iniciais e finais.

4.7.5 Simulação - Considerações sobre frenagem e restrições do modelo

A partir das informações preliminares, o próximo passo seria a realização da simulação do circuito elétrico de tração, via software PSIM 6.0. Cabe ressaltar que a elaboração do circuito de tração, concebido pelo modelo abordado para subestações (fonte de tensão em série com resistência), cabine de paralelismo (curto-circuito entre vias devido baixa resistência), trens (fonte de corrente ideal) e rede aérea de

3 kVCC e circuito de retorno (resistências equivalentes) representa uma rede elétrica complexa.

Este é o agravante causado pela frenagem, uma vez que o modelo proposto a ser simulado pelo PSIM 6.0 não contempla o caso de receptividade parcial da rede aérea de 3 kVCC, ou seja, na ocorrência de frenagem regenerativa e dinâmica dos trens e no caso da corrente fluir do sistema para dentro das subestações retificadoras. Ressalta-se que as subestações retificadoras Morumbi e Cidade Dutra são não controladas e os diodos não conduzem quando polarizados reversamente.

4.7.6 Simulação - PSIM 6.0

Após a modelagem de todas as instalações fixas, trens presentes, dentre outras variáveis, executou-se a simulação do circuito elétrico de tração no trecho de análise e no intervalo de tempo escolhido (17:27:34).

A simulação via software objetiva, principalmente, retornar os valores das correntes circulantes pelos alimentadores (disjuntores de 3 kVCC) de saída para posterior comparação com os valores verdadeiros (padrões) registrados pelos oscilógrafos Yokogawa instalados nas subestações.

Deste modo, no circuito elétrico de tração confeccionado junto ao PSIM 6.0 foram instrumentados os seguintes amperímetros:

- Amperímetros CIN1, CIN2, CSO1 e CSO2 (polo positivo: Barramento de 3 kVCC comum da subestação, polo negativo: Rede aérea de 3 kVCC) para retornar as correntes circulantes dos alimentadores CIN1, CIN2, CSO1 e CSO2 da subestação Cidade Dutra;
- Amperímetros MSO1 e MSO2 (polo positivo: Barramento de 3 kVCC comum da subestação, polo negativo: Rede aérea de 3 kVCC) para retornar as correntes circulantes dos alimentadores MSO1 e MSO2 da subestação Morumbi.

Em caráter adicional, no mesmo circuito simulado, foram instrumentados:

- Amperímetro CP SAM (polo positivo: Rede aérea de 3 kVCC da V1S, polo negativo: Rede aérea de 3 kVCC da V2S) para retornar a corrente circulante do alimentador CP SAM da cabine de paralelismo de Santo Amaro.
- Amperímetros IRCDU1 e IRCDU2 (polo positivo: Retificador de tração, polo negativo: Barramento de 3 kVCC comum da subestação) para retornar as correntes dos grupos retificadores 1 e 2, respectivamente, da subestação Cidade Dutra, a título de verificação de correntes reversas nestes equipamentos, devido às presenças de trens em regime de regeneração.
- Amperímetros IRMRB1 e IRMRB2 (polo positivo: Retificador de tração, polo negativo: Barramento de 3 kVCC comum da subestação) para retornar as correntes dos grupos retificadores 1 e 2, respectivamente, da subestação Morumbi, a título de verificação de correntes reversas nestes equipamentos, devido às presenças de trens em regime de regeneração.

Haja vista, conforme mencionado anteriormente, que a presença de altas correntes reversas em subestações fere o modelo proposto de subestações retificadoras não controladas deste trabalho, sendo o foco, neste caso, trabalhar o circuito elétrico com intuito de minimizá-las.

No circuito de tração confeccionado junto ao software: As resistências “R índice C” representam as resistências equivalentes da catenária (rede aérea) entre instalações e trens; as resistências “R índice T” representam as resistências equivalentes do circuito de retorno (trilho) entre instalações e trens; as resistências “R índice S” representam as resistências equivalentes de cada grupo retificador; as fontes de tensão representam cada um dos grupos retificadores associados a sua respectiva subestação e as fontes de corrente representam cada um dos trens presentes no trecho de análise no instante 17:27:34.

A metodologia para simulação do circuito de tração equivalente iniciou-se pela associação das correntes aos trens não instrumentados a partir das:

- Média de corrente das 100 amostras;
- Média de corrente das 50 amostras iniciais;
- Média de corrente das 50 amostras finais.

A partir dos resultados dos 3 (três) circuitos elétricos que envolviam as médias em epígrafe, o procedimento para refino e regulação das correntes dos trens não instrumentados foi “varrer” a curva de corrente do “trem-teste”, objetivando buscar a

melhor corrente a ser associada para os trens não instrumentados, dentro das 100 amostras no segundo de análise das 17:27:34. Logicamente, após o encontro desta corrente, a mesma deveria ser refinada, associando este resultado a um trem não instrumentado da série 7000/7500.

Conforme mencionado, a verificação da aplicabilidade do modelo proposto se centrava na comparação entre os resultados simulados (via PSIM 6.0) e os resultados padrões ou verdadeiros (via oscilógrafo Yokogawa das subestações) dos alimentadores de saída. Quanto menor o erro identificado entre estes resultados, melhor seria a verificação da aplicabilidade e consolidação do modelo proposto.

Devido às considerações realizadas a respeito do modelamento, estimou-se que o erro relativo (dependente da grandeza simulada) entre os valores simulados e verdadeiros deveria ser menor ou igual a 15% e maior ou igual a -15%, ou seja, $|\delta| \leq 15\%$ e $-15\% \leq \delta \leq 15\%$.

Conforme (Campos, 2005), o erro relativo é o resultado da divisão entre o erro absoluto e o valor verdadeiro e, por isso, é uma grandeza adimensional. Por sua vez, o erro absoluto é a diferença entre o valor simulado (x_0) e o valor verdadeiro (x). Assim:

$$\Delta = x_0 - x \quad (20)$$

Sendo o erro relativo:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} = \frac{x_0 - x}{x} \quad (21)$$

E percentualmente:

$$\delta(\%) = \delta \cdot 100\% \quad (22)$$

4.7.7 Resultados - Simulação

A partir da simulação do circuito de tração equivalente pelo software PSIM 6.0, com os valores médios de correntes das 100 amostras e 50 amostras iniciais e finais, valores estes associados aos trens não instrumentados, verificaram-se os seguintes resultados conforme Tabela 24.

Os circuitos de tração simulados para cada uma das médias relacionadas se encontram no ANEXO D. Os erros relativos foram calculados em relação aos valores da Tabela 23.

Amperímetros principais do simulador		CIN1 (A)	CIN2 (A)	CSO1 (A)	CSO2 (A)	MSO1 (A)	MSO2 (A)
Média 100 amostras	Resultados da simulação	487,00	350,00	-305,200	-216,915	-212,523	-53,360
	Erro relativo δ	353,02%	-2,78%	12,69%	-7,70%	77,10%	-47,08%
Média 50 amostras iniciais	Resultados da simulação	535,00	324,00	-356,839	-239,326	-80,635	-91,202
	Erro relativo δ	397,64%	-10,00%	31,76%	1,84%	-13,60%	-9,54%
Média 50 amostras finais	Resultados da simulação	439,00	376,00	-327,859	-260,200	-608,461	-36,483
	Erro relativo δ	308,37%	4,44%	21,06%	10,72%	407,05%	-63,82%

Tabela 24 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes - Disjuntores de 3 kVCC

A Tabela 25 traz os resultados simulados dos medidores de corrente da cabine de paralelismo de Santo Amaro e dos grupos retificadores das subestações, considerados amperímetros secundários.

Amperímetros secundários do simulador		CP SAM (A)	IRCDU1 (A)	IRCDU2 (A)	IRM RB1 (A)	IRM RB2 (A)
Média 100 amostras	Resultados da simulação	-222,720	157,441	157,441	-132,942	-132,942
Média 50 amostras iniciais	Resultados da simulação	-68,473	131,419	131,419	-85,419	-85,419
Média 50 amostras finais	Resultados da simulação	-289,318	113,472	113,472	-322,472	-322,472

Tabela 25 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes secundárias

Analisando-se as Tabelas 24 e 25, conclui-se que a melhor situação para início da regulação/refino das correntes a serem associadas aos trens não instrumentados, para se diminuir os erros relativos, é a partir dos resultados apresentados pela “média das 50 amostras iniciais”.

Nesta linha, verifica-se que os erros relativos dos alimentadores CIN1 e CSO1 não estão em conformidade com o padrão estabelecido ($|\delta| \leq 15\%$), conforme considerações discutidas anteriores, item Considerações para verificação da

aplicabilidade do modelo, estando os demais em conformidade. Outra situação indesejável foi a verificação de altas correntes reversas (negativas), ou seja, correntes fluindo para dentro da subestação Morumbi. A correção das correntes reversas será analisada posteriormente, uma vez que existe em primeira instância a necessidade de regulação das correntes associadas aos trens não instrumentados. A correção do valor de CIN1, conforme item 4.7.6 e metodologia detalhada à página 74, é uma tarefa simples, uma vez que este alimentador está dedicado somente ao trem UC816. Neste aspecto, visualizando-se a Tabela 20, basta “varrer” a curva do “trem-teste” às 17:05:07 (momento que ele passou pelo km 38,890, onde foi centrado o trem UC816):

- Verificando e escolhendo a melhor corrente associada ao UC816;
- Refiná-la;
- Alocá-la à fonte de corrente ideal do respectivo trem, no circuito elétrico a ser simulado pelo PSIM 6.0.

A correção do valor de CSO1 é uma tarefa mais complexa, uma vez que este alimentador não está dedicado a 1 (um) trem somente. Neste caso, a correção se apoia em uma combinação de valores de correntes dos trens não instrumentados, sendo pela comparação dos resultados da Tabela 22, a melhor linha a ser seguida como:

- UC453 – Alimentador dominante pela proximidade: MSO2 – Conduta: Manter o valor de corrente associado próximo de +140 A, verificando valores 50% acima (+210 A) e abaixo (+70 A) para refinamento;
- UC454 – Alimentador dominante pela proximidade: MSO1 – Conduta: Manter o valor de corrente associado próximo de +185A, verificando valores 50% acima (+277,5 A) e abaixo (+92,5 A) para refinamento;
- UC827 – Alimentadores dominantes pela proximidade: MSO2 e CSO2 – Conduta: “Trem-teste”, não alterar a corrente;
- UC818 – Alimentadores dominantes pela proximidade: MSO1 e CSO1 – Conduta: Simular range de correntes próximos de -220 A até -550 A, onde os alimentadores MSO1 e CSO1 apresentaram menores erros relativos;
- UC455 – Alimentadores dominantes pela proximidade: MSO2 e CSO2 – Conduta: Simular range de correntes próximos de +400 A até +550 A, onde os alimentadores MSO2 e CSO2 apresentaram menores erros relativos;

- UC829 – Alimentador dominante pela proximidade: CSO2 – Conduta: Manter o valor de corrente associado próximo de -70 A, verificando valores 50% acima (-105A) e abaixo (-35A) para refinamento;
- UC816 – Alimentador dominante pela proximidade: CIN1 – Conduta: Simular valor de corrente associado próximo de +100 A, uma vez que o alimentador CIN1 está dedicado somente a esta composição;
- UC831 – Alimentador dominante pela proximidade: CIN2 – Conduta: Manter o valor de corrente associado próximo de +400 A, uma vez que o alimentador CIN2 está dedicado somente a esta composição.

Após uma série de simulações, chegou-se a um circuito equivalente simulado PSIM 6.0 satisfatório para verificação da aplicabilidade do modelo proposto. Este circuito atendeu às expectativas cumprindo com as prerrogativas estabelecidas ($|\delta| \leq 15\%$), em relação aos alimentadores de saída CIN1, CIN2, CSO1, CSO2, MRB1 e MRB2. A Figura 20 esboça o circuito equivalente simulado, com os resultados expressos na Tabela 27. A Figura 21 sintetiza as curvas resultantes e os valores retornados pelo software PSIM 6.0. Os erros relativos foram calculados de acordo com o valor mais próximo dentre as 100 (cem) amostras (em ampères) dos oscilógrafos Yokogawa das subestações Morumbi e Cidade Dutra (Tabela 26)

Alimentador	CIN1	CIN2	CSO1	CSO2	MSO1	MSO2
Amostra	104,170	400,00	-270,830	-269,170	-110,000	-162,500

Tabela 26 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo

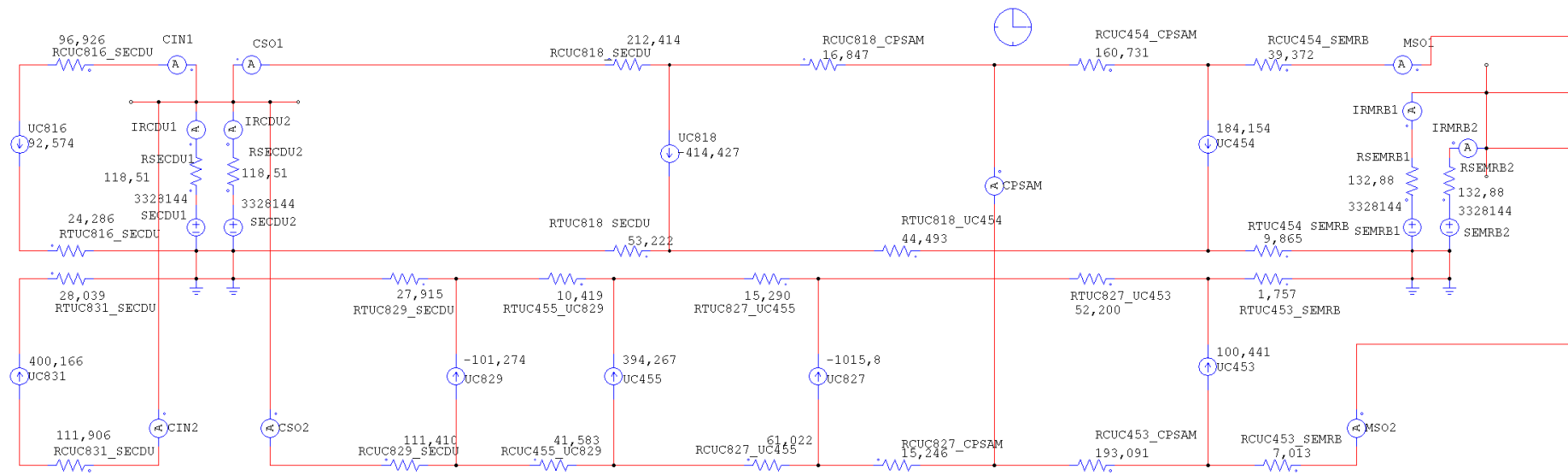


Figura 20 – Circuito elétrico equivalente – Correntes referidas aos trens não instrumentados para verificação da aplicabilidade do modelo

Amperímetros do simulador		CIN1 (A)	CIN2 (A)	CSO1 (A)	CSO2 (A)	MSO1 (A)	MSO2 (A)	CP SAM (A)	IRCDU1 (A)	IRCDU2 (A)	IRMRB1 (A)	IRMRB2 (A)
Circuito elétrico final	Resultado simulação	91,999	400,00	-310,915	-269,134	-110,904	-161,050	-194,818	-44,022	-44,022	-135,978	-135,978
	Erro relativo δ	-11,684%	0,000%	14,801%	-0,013%	0,818%	-0,892%	-	-	-	-	-

Tabela 27 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC

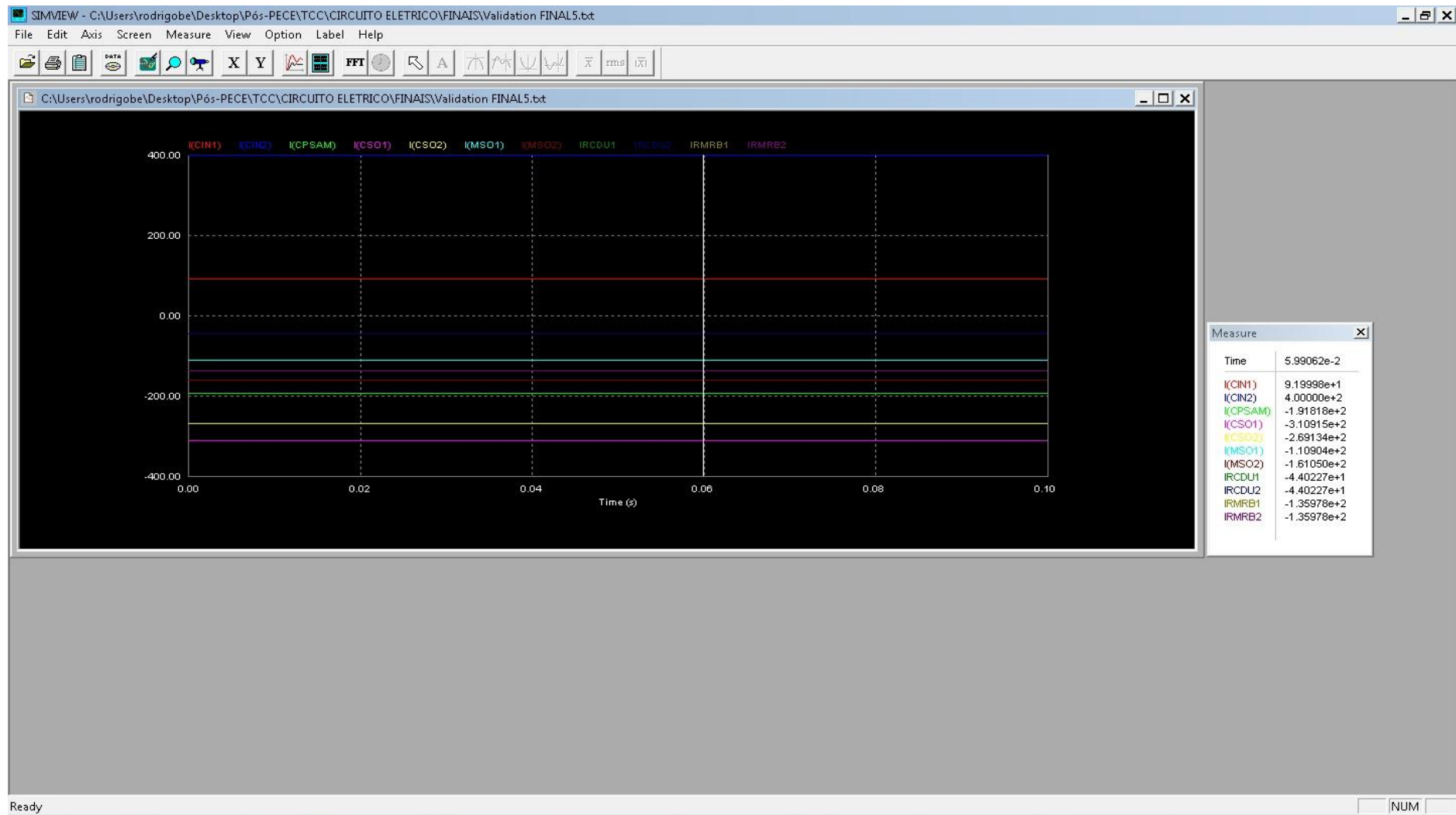


Figura 21 – Simulação circuito elétrico equivalente – Curvas e resultados PSIM 6.0 – Correntes referidas aos trens não instrumentados para verificação da aplicabilidade do modelo

Como se pode verificar, os erros relativos atenderam às expectativas ($|\delta| \leq 15\%$), o que determina a perfeita aplicabilidade do modelo proposto, para simulação de cenários futuros.

4.7.8 Resultado – Diminuição do erro relativo

O enfoque a seguir será diminuir as altas correntes reversas, principalmente na subestação Morumbi. Conforme exposto anteriormente, o primeiro passo seria aumentar a resistência de saída das subestações para minimizar o efeito das correntes reversas. Deste modo, aumentando-se as resistências de saída dos retificadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra para $R_{SE} = 2 \text{ G}\Omega$ (valor limite para a convergência do modelo simulado; definido empiricamente; ver ANEXO E), tem-se os resultados apresentados nas Tabelas 28 e 29.

Amperímetros principais do simulador		CIN1 (A)	CIN2 (A)	CSO1 (A)	CSO2 (A)	MSO1 (A)	MSO2 (A)
Simulação $R_{SE} = 2 \text{ G}\Omega$	Resultados da simulação	122,070	427,246	-244,141	-366,211	-122,070	-183,105
	Erro relativo δ	12,683%	0,333%	0,333%	34,800%	-1,691%	1,258%

Tabela 28 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC

Amperímetros secundários do simulador		CP SAM (A)	IR CDU1 (A)	IR CDU2 (A)	IRMRB1 (A)	IRMRB2 (A)
Simulação $R_{SE} = 2 \text{ G}\Omega$	Resultados da simulação	-183,105	-122,07	-122,07	-122,07	-122,07

Tabela 29 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes secundárias

Os erros relativos foram calculados de acordo com o valor mais próximo dentre as 100 (cem) amostras (em ampères) dos oscilógrafos Yokogawa das subestações Morumbi e Cidade Dutra e o circuito equivalente/resultados podem de ser verificados no ANEXO E (Tabela 30).

Alimentadores	CIN1	CIN2	CSO1	CSO2	MSO1	MSO2
Amostra	108,33	425,830	-243,330	-271,670	-124,17	-180,83

Tabela 30 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo

De posse dos resultados acima evidenciados, verifica-se que ao se elevar a resistência de saída dos grupos retificadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra, os resultados não atendem às expectativas para validade do modelo ($\delta\text{CSO2} > 15\%$), além do que as correntes reversas aumentaram substancialmente na subestação Cidade Dutra e pouco diminuíram na subestação Morumbi, ou seja, conclui-se que a correção proposta não atende ao modelo proposto em conjunto com a simulação do circuito equivalente por software dedicado. Isto pode ser atribuído a um possível problema de convergência do modelo simulado no software PSIM 6.0.

Uma segunda análise para diminuição das correntes reversas pode ser atribuída à consideração dos alimentadores da subestação Morumbi - MVO1 e MVO2 - até então desprezados neste modelo, uma vez que o trecho de análise os eximia de maior detalhamento. Conforme figura postada no ANEXO F, ao se visualizar a soma das correntes dos quatro alimentadores da subestação Morumbi no instante 17:27:34, verifica-se que a mesma está situada entre 35,833 A e 40,000 A, com valor médio de 38,233 A e valor máximo encontrado de 52,500 A através do Xviewer.

Este valor de corrente retrata exatamente o que a subestação Morumbi está fornecendo (neste momento) para a rede área de 3 kVCC, uma vez que o barramento comum de 3 kVCC está ligado aos disjuntores de saída e aos grupos retificadores 1 e 2 da subestação. Pela 1ª. Lei de Kirchhoff, ou lei dos nós, em um nó, a soma das correntes elétricas que entram é igual à soma das correntes que saem, e no caso em destaque o barramento comum de 3 kVCC se comporta como um nó. Como a subestação Morumbi é retificadora e não controlada, a soma das correntes dos alimentadores deveria ser sempre maior ou igual à zero.

Neste caso, a título de análise, conforme ANEXO F, a maior parte da corrente é drenada pelo alimentador MVO1 (média de 262,67 A, calculado pelo Xviewer) em relação ao alimentador MVO2 (média de 18,11 A, calculado pelo Xviewer). Este maior nível de corrente do alimentador MVO1 é evidenciado pelos trens prefixo UC820 e UC456, conforme ANEXO F, nas imediações das estações Berrini e Vila

Olímpia, respectivamente, onde, pela proximidade, o domínio (em termos de potência fornecida) da subestação Morumbi é superior ao domínio da subestação Jaguaré. Através de análise do relatório SGDO, que retrata os resultados da sinalização de campo, ambas as composições estão em condições de aceleração (já saíram ou estão imediatamente saindo das respectivas plataformas das estações Berrini e Vila Olímpia).

Como o objetivo é, no mínimo, reduzir (ou até zerar) as correntes reversas existentes na subestação retificadora Morumbi, que evidenciou um valor elevado em relação à subestação Cidade Dutra, a título de simulação será injetada uma fonte de corrente positiva (UX) no circuito elétrico equivalente (figura 27) na V1S, respectiva ao alimentador MVO1, com as somatórias das correntes dos alimentadores MSO1, MSO2 e a média de fornecimento da subestação Morumbi, assim:

$$UX = I(\text{MSO1}) + I(\text{MSO2}) + I(\text{SE MRB}) \quad (23)$$

$$UX = 110,904 + 161,050 + 38,233 = 310,187 \text{ A}$$

Deste modo, a Figura 22 esboça o circuito equivalente simulado, com os resultados expressos na Tabela 32. A Figura 23 sintetiza as curvas resultantes e os valores retornados pelo software PSIM 6.0. Os erros relativos foram calculados de acordo com o valor mais próximo dentre as 100 (cem) amostras (em ampères) dos oscilógrafos Yokogawa das subestações Morumbi e Cidade Dutra (Tabela 31).

Alimentadores	CIN1	CIN2	CSO1	CSO2	MSO1	MSO2
Amostra	104,170	400,00	-270,83	-235,00	-141,67	-190,83

Tabela 31 – Correntes registradas nas subestações para cálculo do erro relativo

Tabela 32 – Resultados do PSIM 6.0 para as correntes circulantes – Disjuntores de 3 kVCC

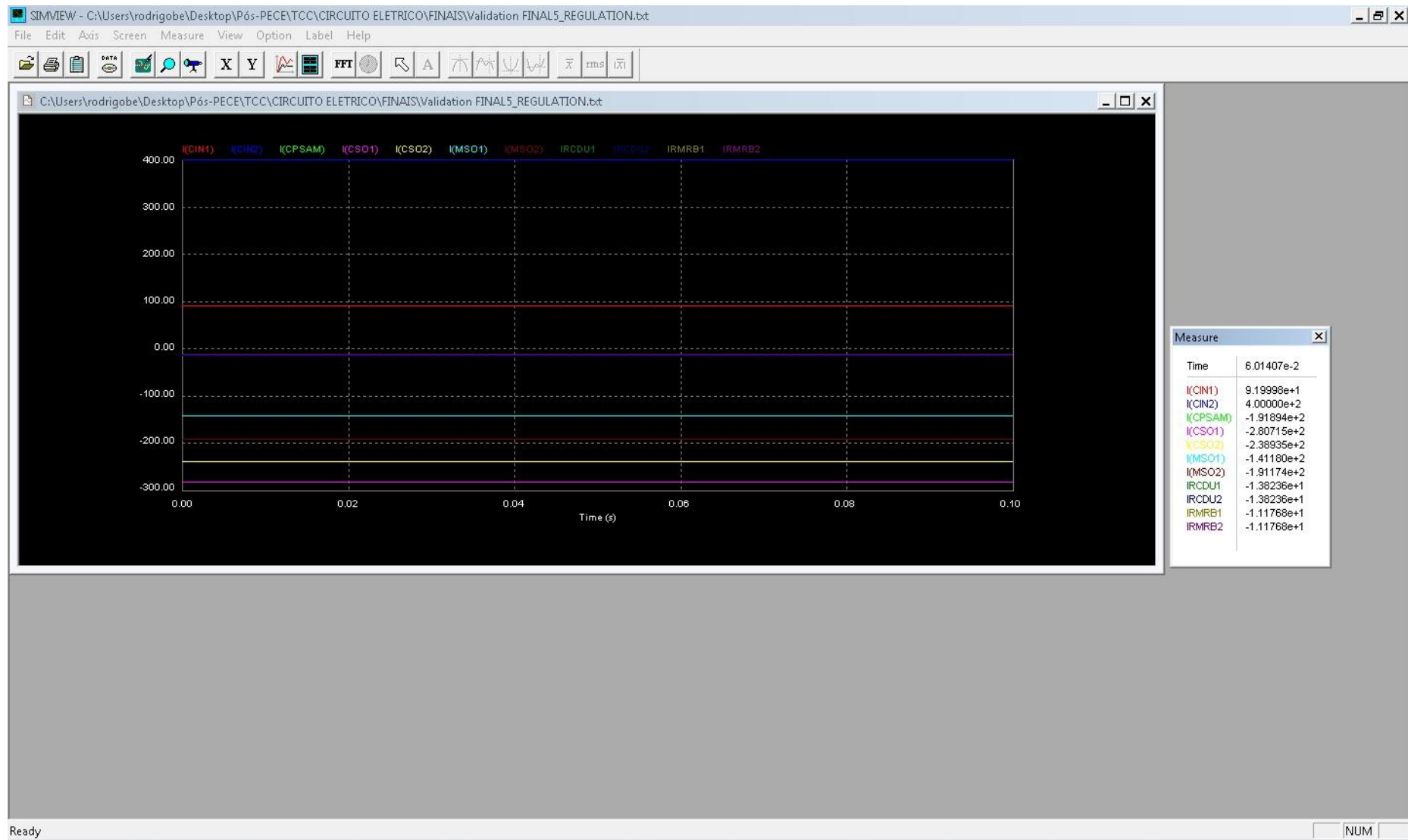


Figura 23 – Simulação circuito elétrico equivalente corrigido – Curvas e resultados PSIM 6.0 – Fonte de corrente em V1S respectiva a MVO1

Como se pode verificar, os erros relativos dos alimentadores principais atenderam às expectativas ($|\delta| \leq 15\%$) e houve uma substancial diminuição das correntes reversas nas subestações Morumbi e Cidade Dutra.

O circuito da Figura 20 pode ser finamente ajustado para melhoria dos erros relativos (já baixos) encontrados, entretanto, para objetivo deste trabalho, o modelamento adotado é considerado válido para representação de circuitos elétricos de tração equivalentes, podendo-se, a partir de agora, utilizá-lo para representação de cenários estratégicos de circuitos elétricos de tração, dentro do universo da CPTM.

Ressalta-se que o aparecimento de eventuais correntes reversas (mesmo baixas) nas subestações retificadoras de Morumbi e Cidade Dutra se devem a possíveis problemas de convergência matemática no circuito do modelado no software PSIM 6.0.

5 CENÁRIOS

5.1 Descrições dos cenários

Após a verificação da aplicabilidade e aferição do modelo proposto, o próximo passo neste trabalho seria a confecção de cenários que retratassem, principalmente, situações operacionais futuras e de contingências junto à Linha 9 da CPTM.

Os cenários propostos englobariam o trecho entre Jaguaré e Grajaú, contemplando as subestações retificadoras de Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra e as cabines de paralelismo de Cidade Jardim, Santo Amaro e Grajaú, no tocante às instalações elétricas fixas principais.

Em um cenário, foram consideradas as futuras subestações retificadoras de Socorro e Cidade Jardim nos cenários propostos (mitigando, neste caso, a cabine de paralelismo de Cidade Jardim), as quais deverão entrar em operação nos próximos 2 (dois) anos, de acordo com o cronograma do novo contrato de readequação e ampliação do sistema de suprimento de energia da Linha 9. Tais subestações possuirão a mesma configuração das demais existentes na Linha 9 (8000 kW, com 02 grupos retificadores de 4000 kW cada), sendo a alimentação oriunda de uma linha de subtransmissão (a ser implantada) em 34,50 kVCA, nos moldes das Linhas 7/10/11 da CPTM.

O motivo pelo qual não foi considerado o trecho da Linha 9 completo (Osasco-Grajaú) nos cenários é devido à maior influência elétrica das subestações retificadoras Osasco e Imperatriz Leopoldina sobre a Linha 9, entre as estações Osasco e Ceasa. Neste trecho, a Linha 9 é alimentada, principalmente, pelas subestações retificadoras de Osasco, Imperatriz Leopoldina e Jaguaré, com passagem das correntes pelas cabines seccionadoras de Osasco e Presidente Altino.

No trecho completo da Linha 9 (Osasco-Grajaú), para uma melhor análise da simulação elétrica, bem como das potências (tensão e corrente) ofertadas pelas subestações retificadoras envolvidas, haveria a necessidade de considerar as cargas existentes (trens) na Linha 8, o que foge do escopo deste trabalho. Caso

contrário, uma substancial parcela de erro estaria sendo atribuída na simulação elétrica do trecho e, do mesmo modo, ao modelo proposto neste trabalho. Por este motivo, optou-se pela escolha do desenvolvimento dos cenários entre Jaguaré e Grajaú, onde o domínio “elétrico” das subestações retificadoras Osasco e Imperatriz Leopoldina é ínfimo, em comparação ao trecho Osasco-Ceasa.

Adicionalmente, sabe-se que o trecho operacional com maior foco na Linha 9 é após a passagem pela subestação Jaguaré (sentido Grajaú), onde ocorre a integração com a Linha 4 – Amarela (em Pinheiros) e Linha 5 – Lilás (em Santo Amaro), locais onde o carregamento de usuários é extremamente considerável e relevante.

Em todos os cenários, entre Jaguaré e Grajaú, considerou-se a situação operacional futura, ou seja, headway de 3 (três) minutos. Neste sentido, considerando-se as vias V1S e V2S, a quantidade aproximada é de 22 (vinte e dois) trens neste trecho.

No mesmo enfoque, conforme denotado anteriormente, após a verificação da aplicabilidade do modelo, a motivação maior para criação de cenários seriam as situações futuras e contingenciais (ou seja, na ocorrência de situações operacionais atípicas, falhas e/ou anomalias). Neste sentido considerou-se que os trens presentes, em nenhum caso, estariam em situação de frenagem regenerativa. Conforme exposto, o trem em frenagem regenerativa tende a fornecer potência para a linha (caso a rede aérea esteja receptiva para tal), alimentando outras composições em aceleração e levemente suprimindo as subestações retificadoras do fornecimento de potência. Assim, durante a formulação dos cenários, os trens presentes estariam consumindo (no instante da simulação) uma alta corrente das subestações.

Este nível de corrente foi arbitrado após análise da corrente RMS suprida pelo “trem-teste” durante todo o período do teste. O valor de corrente RMS suprido pelo “trem-teste”, considerando o intervalo (16:15:10 à 19:45:54) foi de aproximadamente 760 A. Para efeito de cenários, adicionamos 30% a este valor de corrente, perfazendo um total de 1000 A aproximados de corrente para cada trem presente, uma situação bastante indesejável, do ponto de vista elétrico, para as subestações retificadoras, visto que, para este caso, não há frenagem regenerativa.

Os cenários foram simulados associando-se este nível de corrente a cada um dos 22 (vinte e dois) trens considerados no headway aproximado de 3 (três) minutos entre Jaguaré e Grajaú.

Foi considerado também, em um determinado cenário, o pior caso, ou seja, os trens consumindo a corrente máxima (aproximadamente 2500 A) na saída das plataformas com velocidade próxima dos 50 km/h e ainda em aceleração.

Nos cenários propostos para posterior simulação elétrica, objetivou-se posicionar a maioria das composições entre 100 m e 300 m após a saída das plataformas das estações, uma vez que neste espaço os trens estão, teoricamente, em plena aceleração e consumindo alta corrente das subestações retificadoras.

Um adendo é colocado no modelo das subestações retificadoras de Jaguaré, Socorro e Cidade Jardim. No caso da subestação Jaguaré (com equipamentos similares à subestação retificadora Cidade Dutra), como atualmente a mesma encontra-se com o transformador do retificador com um tap acima (tap 4, com relação 85500/1221 (V), em comparação ao mesmo transformador localizado na subestação Cidade Dutra, calculou-se uma tensão a vazio superior para esta subestação, da ordem de 3550 V.

Para as subestações Socorro e Cidade Jardim, arbitrou-se que a RSE de saída seria a média das resistências das subestações Cidade Dutra, Morumbi e Jaguaré, enquanto a tensão a vazio seria a mesma encontrada na subestação Cidade Dutra, ou seja, da ordem de 3330 V.

Por fim, para confecção do circuito elétrico dos cenários, manteve-se o valor das resistências por quilômetro de catenária e de trilho e utilizou-se o software PSIM 6.0 para simulação elétrica dos cenários.

No ANEXO G, encontram-se todos os circuitos de tração simulados, para cada um dos cenários elencados, e suas respectivas formas de ondas de corrente resultantes.

Cenário 1 - Atual: Circulação em condições elétricas normais, com headway de 3 minutos e composições consumindo $I = 1000$ A.

Cenário 2 - Futuro: Circulação em condições elétricas normais, com headway de 3 minutos e composições consumindo $I = 1000$ A. Presença das subestações Socorro e Cidade Jardim.

A saber, na subestação Socorro, foram designados:

- SCD2 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Cidade Dutra – V2S;
- SMV2 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Morumbi – V2S;
- SCD1 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Cidade Dutra – V1S;
- SMV1 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Morumbi – V1S;

- IRSOC1 – Amperímetro – Medição de corrente de saída do grupo retificador 01;
- IRSOC2 – Amperímetro – Medição de corrente de saída do grupo retificador 02.

A saber, na subestação Cidade Jardim, foram designados:

- CJA2 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Jaguaré – V2S;
- CVO2 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Vila Olímpia – V2S;
- CJA1 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Jaguaré – V1S;
- CVO1 – Disjuntor 3 kVCC - Alimentação sentido Vila Olímpia – V1S;
- IRCJD1 – Amperímetro – Medição de corrente de saída do grupo retificador 01;
- IRCJD2 – Amperímetro – Medição de corrente de saída do grupo retificador 02

Na Tabela 33 encontram-se os resultados das simulações dos cenários 1 e 2.

Cenário 1		Cenário 2	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1448,16	CIN1	1448,16
CIN2	1551,84	CIN2	1551,84
CSO1	2808,21	CSO1	1308,01
CSO2	2686,24	CSO2	1168,94
IRCDU1	4247,23	IRCDU1	2738,48
IRCDU2	4247,23	IRCDU2	2738,48
MSO1	2167,35	MSO1	1244,85
MSO2	2338,20	MSO2	1415,70
MVO1	1636,13	MVO1	970,28
MVO2	969,46	MVO2	255,13
IRMRB1	3555,57	IRMRB1	1942,98
IRMRB2	3555,57	IRMRB2	1942,98
JVO1	3403,67	JVO1	2442,84
JVO2	2990,74	JVO2	1989,14
IRJAG1	3197,21	IRJAG1	2215,99
IRJAG2	3197,21	IRJAG2	2215,99
CPCJD	39,80	CPCJD	-
CP SAM	-24,44	CP SAM	-85,43
CPGRA	448,16	CPGRA	448,16
		SCD1	1691,98
		SCD2	1831,06
		SMV1	669,72
		SMV2	669,72
		IRSOC1	2431,24
		IRSOC2	2431,24
		CJA1	557,16
		CJA2	1086,11
		CVO1	1029,72
		CVO2	1744,87
		IRCJD1	1671,30
		IRCJD2	1671,30

Tabela 33 – Resultados - Cenários 1 e 2

Comentários:

- No cenário 1, todos os retificadores de Jaguaré e Morumbi estão em sobrecarga (entre 150% e 300%), bem como o de Cidade Dutra (acima 300%). Nesta condição, os disjuntores de grupo da subestação Cidade Dutra teriam desarmado. O disjuntor de 3 kVCC – JVO1 – está no limiar da abertura. Devido à elevada tensão de saída, é evidente a maior contribuição dos disjuntores JVO1 e JVO2 em relação aos “duais” de Morumbi – MVO1 e MVO2.
- No cenário 2, todos os retificadores de Jaguaré, Cidade Dutra, Socorro e Morumbi estão em sobrecarga (entre 150% e 300%), excetuando o de Cidade Jardim. É notória a melhor distribuição das correntes entre os alimentadores envolvidos e as demandas das subestações.

Cenário 3 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência da cabine de paralelismo Cidade Jardim e composições consumindo $I = 1000$ A.

Cenário 4 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência da cabine de paralelismo Santo Amaro e composições consumindo $I = 1000$ A.

Cenário 5 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência da cabine de paralelismo Grajaú e composições consumindo $I = 1000$ A.

Na Tabela 34, encontram-se os resultados das simulações dos cenários 3, 4 e 5.

Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1448,16	CIN1	1448,16	CIN1	1000,00
CIN2	1551,84	CIN2	1551,84	CIN2	2000,00
CSO1	2808,21	CSO1	2819,62	CSO1	2808,21
CSO2	2686,24	CSO2	2674,85	CSO2	2686,24
IRCDU1	4247,23	IRCDU1	4247,23	IRCDU1	4247,23
IRCDU2	4247,23	IRCDU2	4247,23	IRCDU2	4247,23
MSO1	2167,35	MSO1	2180,38	MSO1	2167,35
MSO2	2338,20	MSO2	2325,15	MSO2	2338,20
MVO1	1615,13	MVO1	1636,13	MVO1	1636,13
MVO2	990,46	MVO2	969,46	MVO2	969,46
IRMRB1	3555,57	IRMRB1	3555,57	IRMRB1	3555,57
IRMRB2	3555,57	IRMRB2	3555,57	IRMRB2	3555,57
JVO1	3384,87	JVO1	3403,67	JVO1	3403,67
JVO2	3009,54	JVO2	2990,74	JVO2	2990,74
IRJAG1	3197,21	IRJAG1	3197,21	IRJAG1	3197,21
IRJAG2	3197,21	IRJAG2	3197,21	IRJAG2	3197,21
CPCJD	-	CPCJD	39,80	CPCJD	39,80
CP SAM	-24,44	CP SAM	-	CP SAM	-24,44
CPGRA	448,16	CPGRA	448,16	CPGRA	-

Tabela 34 – Resultados - Cenários 3, 4 e 5

Comentários:

- No cenário 3, a ausência da cabine de paralelismo de Cidade Jardim pouco impactou na distribuição de correntes entre os alimentadores das subestações Jaguaré e Morumbi, sendo este cenário quase idêntico ao cenário 1.
- No cenário 4, a ausência da cabine de paralelismo de Santo Amaro pouco impactou na distribuição de correntes entre os alimentadores das subestações Cidade Dutra e Morumbi, sendo este cenário quase idêntico ao cenário 1.
- No cenário 5, a ausência da cabine de paralelismo de Grajaú impactou significativamente na distribuição de corrente entre os alimentadores CIN1 e CIN2, sendo os demais locais não afetados com esta perda e quase idênticos ao cenário 1. Esta cabine é de extrema importância para a subestação

Cidade Dutra, especificamente para os alimentadores CIN1 e CIN2, que obtiveram decréscimo e acréscimo, respectivamente, de aproximadamente 450 A em seus circuitos.

Cenário 6 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência do grupo retificador 02 na subestação Jaguaré e composições consumindo I = 1000 A.

Cenário 7 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência do grupo retificador 02 na subestação Morumbi e composições consumindo I = 1000 A.

Cenário 8 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência do grupo retificador 02 na subestação Cidade Dutra e composições consumindo I = 1000 A.

Na Tabela 35, encontram-se os resultados das simulações dos cenários 6, 7 e 8.

Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1448,16	CIN1	1448,16	CIN1	1448,16
CIN2	1551,84	CIN2	1551,84	CIN2	1551,84
CSO1	2910,22	CSO1	3237,15	CSO1	2153,26
CSO2	2787,80	CSO2	3113,31	CSO2	2034,16
IRCDU1	4349,01	IRCDU1	4675,23	IRCDU1	7187,72
IRCDU2	4349,01	IRCDU2	4675,23	IRCDU2	-
MSO1	2065,56	MSO1	1739,34	MSO1	2820,86
MSO2	2236,42	MSO2	1910,20	MSO2	2991,72
MVO1	2157,76	MVO1	1169,10	MVO1	1499,42
MVO2	1491,10	MVO2	502,43	MVO2	832,75
IRMRB1	3975,42	IRMRB1	5321,07	IRMRB1	4072,37
IRMRB2	3975,42	IRMRB2	-	IRMRB2	4072,37
JVO1	2882,04	JVO1	3870,70	JVO1	3540,38
JVO2	2469,10	JVO2	3457,77	JVO2	3127,45
IRJAG1	5351,14	IRJAG1	3664,23	IRJAG1	3333,92
IRJAG2	-	IRJAG2	3664,23	IRJAG2	3333,92
CPCJD	39,80	CPCJD	39,80	CPCJD	39,80
CP SAM	-24,22	CP SAM	-23,50	CP SAM	-25,88
CPGRA	448,16	CPGRA	448,16	CPGRA	448,16

Tabela 35 – Resultados - Cenários 6, 7 e 8

Comentários:

- No cenário 6, todos os retificadores de Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Nesta condição, os disjuntores de grupo das subestações presentes teriam desarmado. Devido o grupo retificador 02 estar ausente na subestação Jaguaré, o retificador 01 desta subestação aumenta sua contribuição em 67,36% em relação ao valor nominal (cenário 1) e os retificadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra aumentam suas contribuições em 11,80% e 2,39%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.
- No cenário 7, todos os retificadores de Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga máxima (acima 300%) e os retificadores de Jaguaré em sobrecarga entre 150% e 300%. Nesta condição, os disjuntores de grupo das subestações Morumbi e Cidade Dutra teriam desarmado. O disjuntor de 3 kVCC - JVO1 - teria desarmado adicionalmente. Devido o grupo retificador 02 estar ausente na subestação Cidade Dutra, o retificador 01 desta subestação aumenta sua contribuição em 49,65% em relação ao valor nominal (cenário 1) e os retificadores das subestações Jaguaré e Cidade Dutra aumentam suas contribuições em 14,60% e 10,07%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.
- No cenário 8, todos os retificadores de Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga máxima (acima 300%) e os retificadores de Jaguaré em sobrecarga entre 150% e 300%. Nesta condição, os disjuntores de grupo das subestações Morumbi e Cidade Dutra teriam desarmado. O disjuntor de 3 kVCC - JVO1 - teria desarmado adicionalmente. Devido o grupo retificador 02 estar ausente na subestação Cidade Dutra, o retificador 01 desta subestação aumenta sua contribuição em 69,23% em relação ao valor nominal (cenário 1) e os retificadores das subestações Morumbi e Jaguaré aumentam suas contribuições em 14,53% e 4,27%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.
- As cabines de paralelismo não possuem papel relevante nos cenários 6, 7 e 8, sendo fundamentais em situações de frenagem regenerativa, o que não é escopo destes cenários. O pior caso se verifica no cenário 6, situação onde todas as subestações deixam de fornecer energia para alimentação dos trens.

Cenário 9 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência dos grupos retificadores 01 e 02 na subestação Jaguaré e composições consumindo I = 1000 A.

Cenário 10 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência dos grupos retificadores 01 e 02 na subestação Morumbi e composições consumindo I = 1000 A.

Cenário 11 - Atual: Condição elétrica degradada - Ausência dos grupos retificadores 01 e 02 na subestação Cidade Dutra e composições consumindo I = 1000 A.

Na Tabela 36, encontram-se os resultados das simulações dos cenários 9, 10 e 11.

Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1448,16	CIN1	1448,16	CIN1	1448,16
CIN2	1551,84	CIN2	1551,84	CIN2	1551,84
CSO1	3433,43	CSO1	4512,21	CSO1	-1448,35
CSO2	3308,72	CSO2	4382,78	CSO2	-1551,65
IRCDU1	4871,07	IRCDU1	5947,50	IRCDU1	-
IRCDU2	4871,07	IRCDU2	5947,50	IRCDU2	-
MSO1	1543,50	MSO1	467,07	MSO1	6414,57
MSO2	1714,35	MSO2	637,93	MSO2	6585,43
MVO1	4833,33	MVO1	-219,17	MVO1	747,64
MVO2	4166,67	MVO2	-885,83	MVO2	80,97
IRMRB1	6128,93	IRMRB1	-	IRMRB1	6914,31
IRMRB2	6128,93	IRMRB2	-	IRMRB2	6914,31
JVO1	2064,67	JVO1	5258,97	JVO1	4292,16
JVO2	-2064,67	JVO2	4846,04	JVO2	3879,22
IRJAG1	-	IRJAG1	5052,51	IRJAG1	4085,69
IRJAG2	-	IRJAG2	5052,51	IRJAG2	4085,69
CPCJD	39,80	CPCJD	39,80	CPCJD	39,80
CP SAM	-23,07	CP SAM	-20,77	CP SAM	-33,77
CPGRA	448,16	CPGRA	448,16	CPGRA	448,16

Tabela 36 – Resultados - Cenários 9, 10 e 11

Comentários:

- No cenário 9, todos os retificadores de Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC - MVO1 e MVO2 - teriam desarmado, com iminência de desarme do disjuntor de 3 kVCC - CSO1. Nesta condição, os disjuntores de grupo da subestação Morumbi podem desarmar, caso a coordenação de seletividade com os disjuntores MVO1 e MVO2 não estejam bem acordadas. Se os disjuntores MVO1 e MVO2 desarmarem antes (seletividade), os disjuntores de grupo da subestação Morumbi não irão abrir, entretanto para suprir a corrente da rede aérea de 3 kVCC, a abertura de MVO1 e MVO2 irá provocar uma reação em cadeia, podendo causar um desarme em “cascata” de demais alimentadores no circuito e falta de energia para alimentação dos trens. Devido os grupos retificadores estarem ausentes na subestação Jaguaré (a mesma estaria funcionando como cabine de paralelismo), os retificadores das subestações Morumbi e Cidade Dutra aumentam suas contribuições em 72,38% e 14,69%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.
- No cenário 10, todos os retificadores de Jaguaré e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC - CSO1, CSO2, JVO1 e JVO2 - teriam desarmado. Nesta condição, os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré e Cidade Dutra podem desarmar, caso a coordenação de seletividade com os disjuntores CSO1, CSO2, JVO1 e JVO2 não estejam bem acordadas. Se os disjuntores CSO1, CSO2, JVO1 e JVO2 desarmarem antes (seletividade), os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré e Cidade Dutra não irão abrir, entretanto para suprir a corrente da rede aérea de 3 kVCC, a abertura dos alimentadores de 3 kVCC irá provocar uma reação em cadeia, podendo causar um desarme em “cascata” de demais alimentadores no circuito e falta de energia para alimentação dos trens. Devido os grupos retificadores estarem ausentes na subestação Morumbi (a mesma estaria funcionando como cabine de paralelismo), os retificadores das subestações Jaguaré e Cidade Dutra aumentam suas contribuições em 58,03% e 40,03%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.
- No cenário 11, todos os retificadores de Jaguaré e Morumbi estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC – MSO1, MSO2, JVO1 e

JVO2 - teriam desarmado adicionalmente. Nesta condição, os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré e Morumbi podem desarmar, caso a coordenação de seletividade com os disjuntores MSO1, MSO2, JVO1 e JVO2 não estejam bem acordadas. Se os disjuntores MSO1, MSO2, JVO1 e JVO2 desarmarem antes (seletividade), os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré e Morumbi não irão abrir, entretanto para suprir a corrente da rede aérea de 3 kVCC, a abertura dos alimentadores de 3 kVCC irá provocar uma reação em cadeia, podendo causar um desarme em “cascata” de demais alimentadores no circuito e falta de energia para alimentação dos trens. Devido aos grupos retificadores estarem ausentes na subestação Cidade Dutra (a mesma estaria funcionando como cabine de paralelismo), os retificadores das subestações Jaguaré e Morumbi aumentam suas contribuições em 27,79% e 94,46%, respectivamente, em relação ao valor nominal. Cenário crítico.

Cenário 12 - Atual: Condição elétrica degradada – Curto-circuito nas imediações da subestação Jaguaré – V1S, lado Vila Olímpia e composições consumindo $I = 1000 \text{ A}$.

Cenário 13 - Atual: Condição elétrica degradada - Curto-circuito nas imediações da subestação Morumbi – V1S, lado Socorro e composições consumindo $I = 1000 \text{ A}$.

Cenário 14 - Atual: Condição elétrica degradada - Curto-circuito nas imediações da subestação Cidade Dutra – V1S, lado Interlagos e composições consumindo $I = 1000 \text{ A}$.

Nestes cenários, conforme a norma europeia EN 50327, a norma RailCorp EP 03 00 00 01 TI e referências em (Pozzobon, 1998), a resistência de saída dos grupos retificadores em curto-circuito será alterada para $288,5 \text{ m}\Omega$ e a tensão em vazio dos grupos retificadores será alterada para $6656,25 \text{ V}$, em virtude da curva característica (V/I) dos retificadores ser diferente na região de curto-circuito, em comparação com a região nominal de carga.

Na tabela 37, encontram-se os resultados das simulações dos cenários 12, 13 e 14.

Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1448,16	CIN1	1448,16	CIN1	49827,7
CIN2	1551,84	CIN2	1551,84	CIN2	1551,84
CSO1	4081,04	CSO1	8070,10	CSO1	-2528,50
CSO2	3953,49	CSO2	7925,05	CSO2	-2627,06
IRCDU1	5517,27	IRCDU1	9497,58	IRCDU1	23112,0
IRCDU2	5517,27	IRCDU2	9497,58	IRCDU2	23112,0
MSO1	897,30	MSO1	57988,7	MSO1	7492,36
MSO2	1068,16	MSO2	-2912,15	MSO2	7663,21
MVO1	8145,07	MVO1	-4092,95	MVO1	522,18
MVO2	7478,41	MVO2	-4759,62	MVO2	-144,48
IRMRB1	8794,47	IRMRB1	23112,0	IRMRB1	7766,63
IRMRB2	8794,47	IRMRB2	23112,0	IRMRB2	7766,63
JVO1	49742,2	JVO1	9132,75	JVO1	4517,62
JVO2	-3518,21	JVO2	8719,82	JVO2	4104,69
IRJAG1	23112,0	IRJAG1	8926,28	IRJAG1	4311,15
IRJAG2	23112,0	IRJAG2	8926,28	IRJAG2	4311,15
CPCJD	39,80	CPCJD	39,80	CPCJD	39,80
CP SAM	-21,65	CP SAM	-12,90	CP SAM	-36,14
CPGRA	448,16	CPGRA	448,16	CPGRA	448,16

Tabela 37 – Resultados - Cenários 12, 13 e 14

Comentários:

- No cenário 12, todos os retificadores de Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC - CSO1, CSO2, MVO1, MVO2 e JVO1 - teriam desarmado. Dada à perfeita seletividade, os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra não irão desarmar, entretanto pode haver sérios problemas no fornecimento de potência para alimentação dos trens metropolitanos no trecho afetado. Dependendo da exposição ao curto-circuito calculado de 49,7 kA, o disjuntor JVO1 (fabricante EMC Traction – tipo IR6130) pode sofrer sérias avarias, inclusive sua completa inutilização (caso sua abertura seja superior a 33 ms), uma vez que a corrente de curto-circuito nominal deste equipamento é da ordem de 30 kA ($\tau = 20$ ms), sendo a capacidade máxima de interrupção (corrente de pico) da ordem de 100 kA. Cenário crítico.

- No cenário 13, todos os retificadores de Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC - CSO1, CSO2, JVO1, JVO2 e MSO1 - teriam desarmado. Dada à perfeita seletividade, os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra não irão desarmar, entretanto pode haver sérios problemas no fornecimento de potência para alimentação dos trens metropolitanos no trecho afetado. Dependendo da exposição ao curto-circuito calculado de 57,9 kA, o disjuntor MSO1 (fabricante Alsthom – tipo JRM) pode sofrer sérias avarias, inclusive sua completa inutilização (caso sua abertura seja superior a 30 ms), uma vez que a corrente de curto-circuito nominal deste equipamento é da ordem de 40 kA. Cenário crítico.
- No cenário 14, todos os retificadores de Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC - MSO1, MSO2, JVO1, JVO2 e CIN1 - teriam desarmado. Dada à perfeita seletividade, os disjuntores de grupo das subestações Jaguaré, Morumbi e Cidade Dutra não irão desarmar, entretanto pode haver sérios problemas no fornecimento de potência para alimentação dos trens metropolitanos no trecho afetado. Dependendo da exposição ao curto-circuito calculado de 49,8 kA, o disjuntor CIN1 (fabricante EMC Traction – tipo IR6130) pode sofrer sérias avarias, inclusive sua completa inutilização (caso sua abertura seja superior a 33 ms), uma vez que a corrente de curto-circuito nominal deste equipamento é da ordem de 30 kA ($\tau = 20$ ms), sendo a capacidade máxima de interrupção (corrente de pico) da ordem de 100 kA. Cenário crítico.

Cenário 15 - Atual: Circulação em condições elétricas normais, com headway de 03 minutos e composições consumindo corrente RMS, $I = 760$ A.

Cenário 16 - Atual: Condição operacional crítica, com headway de 03 minutos e composições partindo simultaneamente $I = 2500$ A.

Na tabela 38, encontram-se os resultados das simulações dos cenários 15 e 16.

Cenário 12		Cenário 13	
Alimentador	Corrente (A)	Alimentador	Corrente (A)
CIN1	1100,60	CIN1	3620,40
CIN2	1179,40	CIN2	3879,60
CSO1	2117,14	CSO1	7127,42
CSO2	2024,52	CSO2	6822,04
IRCDU1	3210,83	IRCDU1	10724,70
IRCDU2	3210,83	IRCDU2	10724,70
MSO1	1664,25	MSO1	5311,70
MSO2	1794,10	MSO2	5738,84
MVO1	1155,99	MVO1	4636,97
MVO2	649,32	MVO2	2970,30
IRMRB1	2631,83	IRMRB1	9328,90
IRMRB2	2631,83	IRMRB2	9328,90
JVO1	2674,26	JVO1	7962,53
JVO2	2360,43	JVO2	6930,20
IRJAG1	2517,34	IRJAG1	7446,37
IRJAG2	2517,34	IRJAG2	7446,37
CPCJD	30,24	CPCJD	99,50
CP SAM	-18,61	CP SAM	-60,87
CPGRA	340,60	CPGRA	1120,40

Tabela 38 – Resultados - Cenários 15 e 16

Comentários:

- No cenário 15, todos os retificadores de Jaguaré, Cidade Dutra e Morumbi estão em sobrecarga (entre 150% e 300%). Os disjuntores de 3 kVCC não irão desarmar, a menos que uma condição operacional futura ou um estopim (falha) o propicie. Dada a condição operacional normal da CPTM, principalmente em “rush” (o que não se compara a uma condição de marcha-padrão), onde atrasos são frequentes devido superlotação, usuários impedindo o fechamento normal de portas, dentre outras situações, ressalta-se que na condição simultânea dos trens presentes suprirem a corrente RMS medida no “trem-teste”, para um headway de 03 minutos, comprova-se que a atual conjuntura do sistema elétrico da Linha 9 (em termos de fontes de energia) é insuficiente e pouco confiável.
- No cenário 16, todos os retificadores de Jaguaré, Cidade Dutra e Morumbi estão em sobrecarga (acima 300%). Os disjuntores de 3 kVCC presentes irão

desarmar provocando falta de alimentação geral na Linha 9 (momentânea).

Cenário crítico.

A Tabela 39 é uma tabela-resumo, denotando os estados de cada um dos cenários simulados e disjuntores afetados.

CENÁRIO	STATUS	DISJUNTORES AFETADOS
01 – Trens consumindo 1000 A	ATENÇÃO	IRCDU1 e IRCDU2
02 - Trens consumindo 1000 A – Inclusão das SE's Socorro e C. Jardim	REGULAR	-
03 - Trens consumindo 1000 A – Ausência CP Cidade Jardim	ATENÇÃO	Idem cenário 1
04 - Trens consumindo 1000A – Ausência CP Santo Amaro	ATENÇÃO	Idem cenário 1
05 - Trens consumindo 1000 A – Ausência CP Grajaú	ATENÇÃO	Idem cenário 1
06 - Trens consumindo 1000 A – Ausência do GR2 da SE Jaguaré	CRÍTICO	IRCDU1, IRCDU2, IRMRB1, IRMRB2, IRJAG1, IRJAG2
07 - Trens consumindo 1000 A – Ausência do GR2 da SE Morumbi	CRÍTICO	Idem cenário 6 e JVO1
08 - Trens consumindo 1000 A – Ausência do GR2 da SE C. Dutra	CRÍTICO	Idem cenário 6 e JVO1
09 - Trens consumindo 1000 A – Ausência da SE Jaguaré	CRÍTICO	IRCDU1, IRCDU2, IRMRB1, IRMRB2, MVO1, MVO2
10 - Trens consumindo 1000 A – Ausência da SE Morumbi	CRÍTICO	IRCDU1, IRCDU2, IRJAG1, IRJAG2, CSO1, CSO2, JVO1, JVO2
11 - Trens consumindo 1000 A – Ausência da SE Cidade Dutra	CRÍTICO	IRMRB1, IRMRB2, IRJAG1, IRJAG2, MSO1, MSO2, JVO1, JVO2
12 - Trens consumindo 1000 A – Curto-Circuito – SE Jaguaré	CRÍTICO	Disjuntores de grupo, CSO1, CSO2, MVO1, MVO2, JVO1
13 - Trens consumindo 1000 A – Curto-Circuito – SE Morumbi	CRÍTICO	Disjuntores de grupo, CSO1, CSO2, JVO1, JVO2, MSO1
14 - Trens consumindo 1000 A – Curto-Circuito – SE C. Dutra	CRÍTICO	Disjuntores de grupo, MSO1, MSO2, JVO1, JVO2, CIN1
15 - Trens consumindo I RMS = 760 A	REGULAR	-
16 – Trens partindo simultaneamente – I = 2500 A	CRÍTICO	Todos os disjuntores presentes

Tabela 39 – Resumo dos resultados - Cenários 1 à 16

6 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso procurou reunir, na prática e com a fundamentação teórica apropriada, uma situação real vivenciada atualmente pela a CPTM. Conforme relatado, o problema atual de suprimento de energia para alimentação dos trens metropolitanos da Linha 9 é uma situação que inspira cuidados e devidas atenções.

A proposta da realização de um estudo do carregamento de energia para a Linha 9, com a criação de um modelo para as instalações fixas e móveis presentes, e sua posterior verificação da aplicabilidade através de simulação elétrica (via software dedicado) e comparação com os valores padrões (medidos em campo) é uma contribuição satisfatória para a área de simulação de sistemas de tração elétrica ferroviária. Este estudo aproximou-se ao máximo das condições reais operacionais e elétricas da CPTM, considerando uma condição crítica, que foi a realização dos ensaios de campo em horário de “rush”.

O modelamento proposto neste trabalho se baseou em experiências e desenvolvimentos anteriores, como pode ser verificado em (Pires, 2006) e (Tse et al, 1998), aliados a literaturas consolidadas, como (Cardoso, 2002) e (Toledo et. al, 1988).

O ponto forte neste trabalho, no tocante ao estudo de simulação de tração elétrica ferroviária, foi a abdicação da simulação de marcha e da simulação de tráfego, até então necessárias, que demandam de grande quantidade de dados a respeito do sistema civil e mecânico das linhas metroferroviárias, que em casos de ferrovias muito antigas nem sempre são de fácil obtenção e tratamento, demandando muito tempo de trabalho apenas para a obtenção de uma informação de entrada que pode ser obtida através de um levantamento de campo, permitindo concentrar todas as atenções na simulação elétrica.

Isto foi possível devido à instrumentação de um “trem-teste”, como base e referência de velocidade, espaço percorrido, tempo e, principalmente ampacidade, para demais trens não instrumentados. Adicionalmente, e não menos importante, foi a instrumentação de subestações retificadoras para coleta de grandezas elétricas, as quais seriam caracterizadas como valores padrões.

Estas informações reunidas com a posterior escolha da “foto” do sistema de tração em determinado trecho e instante de tempo, seriam fundamentais para confecção do circuito elétrico equivalente. Este circuito seria base para verificação da aplicabilidade do modelo proposto, com a utilização de um software elétrico dedicado (PSIM 6.0) para análise, geração de resultados e gráficos pertinentes.

Os resultados apresentados pelo software PSIM 6.0 em comparação com os valores padrões obtidos a partir de registradores/oscilógrafos instalados em subestações, não somente validaram o modelo proposto, como também, após a verificação da aplicabilidade, propiciaram a criação de cenários em condições futuras, com sistemas elétricos em situações normais e de degradação, retornando resultados extremamente relevantes para análise da atual e futura conjuntura do sistema de suprimento de energia da Linha 9.

Como ponto a ser ressaltado, cabe frisar o envolvimento de diversas áreas da CPTM para sucesso deste trabalho. Para desenvolvimento do mesmo, contou-se com a ajuda de grandes áreas da empresa, tais como subestações, sinalização ferroviária, material rodante, engenharia, projetos de sistemas e operação, sendo este trabalho, portanto, o resultado de uma colaboração interdepartamental diferenciada.

Finalmente, coloca-se que a partir dos resultados obtidos, conseguiu-se com sucesso atingir os objetivos propostos nesta monografia no curso de especialização em tecnologia metroferroviária ministrado pelo PECE/POLI-USP.

ANEXO A

RELATÓRIO DE ACOMPANHAMENTO DE TRENS NO CCO

R-6 163

4 de abril de 2012

ACOMPANHAMENTO DE TRENS UNIDADES SEG A SEX

Q 32	R 03	Q 11	R 05	Q 20	R 02	Q 19	Q 39	Q 15	Q 23	Q 16	R 06	2073	2071	2078	2076	Q 14	R 08
PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS	PREFIXOS
UC722	UC724	UC728	UC730	GRA	UC732	UC734	UC736	UC729	UC731	UC733	UC735	UC737	UC739	OS4	ES611		
741	743	745	747	749	751	753	755	757	759	761	763	765	767	769	771	773	775
777	779	781	783	785	787	789	791	793	795	797	799	801	803	805	807	809	811
813	815	817	819	821	823	825	827	829	831	833	835	837	839	841	843	845	847
849	851	853	855	857	859	861	863	865	867	869	871	873	875	877	879	881	883
885	887	889	891	893	895	897	899	901	903	905	907	909	911	913	915	917	919
921	923	925	927	929	931	933	935	937	939	941	943	945	947	949	951	953	955
957	959	961	963	965	967	969	971	973	975	977	979	981	983	985	987	989	991
993	995	997	999	1001	1003	1005	1007	1009	1011	1013	1015	1017	1019	1021	1023	1025	1027
1029	1031	1033	1035	1037	1039	1041	1043	1045	1047	1049	1051	1053	1055	1057	1059	1061	1063
1065	1067	1069	1071	1073	1075	1077	1079	1081	1083	1085	1087	1089	1091	1093	1095	1097	1099
1101	1103	1105	1107	1109	1111	1113	1115	1117	1119	1121	1123	1125	1127	1129	1131	1133	1135
1137	1139	1141	1143	1145	1147	1149	1151	1153	1155	1157	1159	1161	1163	1165	1167	1169	1171
1173	1175	1177	1179	1181	1183	1185	1187	1189	1191	1193	1195	1197	1199	1201	1203	1205	1207
1209	1211	1213	1215	1217	1219	1221	1223	1225	1227	1229	1231	1233	1235	1237	1239	1241	1243
1245	1247	1249	1251	1253	1255	1257	1259	1261	1263	1265	1267	1269	1271	1273	1275	1277	1279
1281	1283	1285	1287	1289	1291	1293	1295	1297	1299	1301	1303	1305	1307	1309	1311	1313	1315
1317	1319	1321	1323	1325	1327	1329	1331	1333	1335	1337	1339	1341	1343	1345	1347	1349	1351
1353	1355	1357	1359	1361	1363	1365	1367	1369	1371	1373	1375	1377	1379	1381	1383	1385	1387
1389	1391	1393	1395	1397	1399	1401	1403	1405	1407	1409	1411	1413	1415	1417	1419	1421	1423
1425	1427	1429	1431	1433	1435	1437	1439	1441	1443	1445	1447	1449	1451	1453	1455	1457	1459
1461	1463	1465	1467	1469	1471	1473	1475	1477	1479	1481	1483	1485	1487	1489	1491	1493	1495
1497	1499	1501	1503	1505	1507	1509	1511	1513	1515	1517	1519	1521	1523	1525	1527	1529	1531
1533	1535	1537	1539	1541	1543	1545	1547	1549	1551	1553	1555	1557	1559	1561	1563	1565	1567
1569	1571	1573	1575	1577	1579	1581	1583	1585	1587	1589	1591	1593	1595	1597	1599	1601	1603
1605	1607	1609	1611	1613	1615	1617	1619	1621	1623	1625	1627	1629	1631	1633	1635	1637	1639
1641	1643	1645	1647	1649	1651	1653	1655	1657	1659	1661	1663	1665	1667	1669	1671	1673	1675
1677	1679	1681	1683	1685	1687	1689	1691	1693	1695	1697	1699	1701	1703	1705	1707	1709	1711
1713	1715	1717	1719	1721	1723	1725	1727	1729	1731	1733	1735	1737	1739	1741	1743	1745	1747
1749	1751	1753	1755	1757	1759	1761	1763	1765	1767	1769	1771	1773	1775	1777	1779	1781	1783
1785	1787	1789	1791	1793	1795	1797	1799	1801	1803	1805	1807	1809	1811	1813	1815	1817	1819
1821	1823	1825	1827	1829	1831	1833	1835	1837	1839	1841	1843	1845	1847	1849	1851	1853	1855
1857	1859	1861	1863	1865	1867	1869	1871	1873	1875	1877	1879	1881	1883	1885	1887	1889	1891
1893	1895	1897	1899	1901	1903	1905	1907	1909	1911	1913	1915	1917	1919	1921	1923	1925	1927
1929	1931	1933	1935	1937	1939	1941	1943	1945	1947	1949	1951	1953	1955	1957	1959	1961	1963
1965	1967	1969	1971	1973	1975	1977	1979	1981	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999
2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035
2037	2039	2041	2043	2045	2047	2049	2051	2053	2055	2057	2059	2061	2063	2065	2067	2069	2071
2073	2075	2077	2079	2081	2083	2085	2087	2089	2091	2093	2095	2097	2099	2101	2103	2105	2107
2109	2111	2113	2115	2117	2119	2121	2123	2125	2127	2129	2131	2133	2135	2137	2139	2141	2143
2145	2147	2149	2151	2153	2155	2157	2159	2161	2163	2165	2167	2169	2171	2173	2175	2177	2179
2181	2183	2185	2187	2189	2191	2193	2195	2197	2199	2201	2203	2205	2207	2209	2211	2213	2215
2217	2219	2221	2223	2225	2227	2229	2231	2233	2235	2237	2239	2241	2243	2245	2247	2249	2251
2253	2255	2257	2259	2261	2263	2265	2267	2269	2271	2273	2275	2277	2279	2281	2283	2285	2287
2289	2291	2293	2295	2297	2299	2301	2303	2305	2307	2309	2311	2313	2315	2317	2319	2321	2323
2325	2327	2329	2331	2333	2335	2337	2339	2341	2343	2345	2347	2349	2351	2353	2355	2357	2359
2361	2363	2365	2367	2369	2371	2373	2375	2377	2379	2381	2383	2385	2387	2389	2391	2393	2395
2397	2399	2401	2403	2405	2407	2409	2411	2413	2415	2417	2419	2421	2423	2425	2427	2429	2431
2433	2435	2437	2439	2441	2443	2445	2447	2449	2451	2453	2455	2457	2459	2461	2463	2465	2467
2469	2471	2473	2475	2477	2479	2481	2483	2485	2487	2489	2491	2493	2495	2497	2499	2501	2503
2505	2507	2509	2511	2513	2515	2517	2519	2521	2523	2525	2527	2529	2531	2533	2535	2537	2539
2541	2543	2545	2547	2549	2551	2553	2555	2557	2559	2561	2563	2565	2567	2569	2571	2573	2575
2577	2579	2581	2583	2585	2587	2589	2591	2593	2595	2597	2599	2601	2603	2605	2607	2609	2611
2613	2615	2617	2619	2621	2623	2625	2627	2629	2631	2633	2635	2637	2639	2641	2643	2645	2647
2649	2651	2653	2655	2657	2659	2661	2663	2665	2667	2669	2671	2673	2675	2677	2679	2681	2683
2685	2687	2689	2691	2693	2695	2697	2699	2701	2703	2705	2707	2709	2711	2713	2715	2717	2719
2721	2723	2725	2727	2729	2731	2733	2735	2737	2739	2741	2743	2745	2747	2749	2751	2753	2755
2757	2759	2761	2763	2765	2767	2769	2771	2773	2775	2777	2779	2781	2783	2785	2787	2789	2791
2793	2795	2797	2799	2801	2803	2805	2807	2809	2811	2813	2815	2817	2819	2821	2823	2825	2827
2829	2831	2833	2835	2837	2839	2841	2843	2845	2847	2849	2851	2853	2855	2857	2859	2861	2863
2865	2867	2869	2871	2873	2875	2877	2879	2881	2883	2885	2887	2889	2891	2893	2895	2897	2899
2901	2903	2905	2907	2909	2911	2913	2915	2917	2919	2921	2923	2925	2927	2929	2931	2933	2935
2937	2939	2941	2943	2945	2947	2949	2951	2953	2955	2957	2959	2961	2963	2965	2967	2969	2971
2973	2975	2977	2979	2981	2983	2985	2987	2989	2991	2993	2995	2997	2999	3001	3003	3005	3007
3009	3011	3															

[illegible]

Figura 25 – Relatório de acompanhamento de trens no CCO – Parte II

ANEXO B

CORRENTES MEDIDAS NO “TREM-TESTE” PARA ASSOCIAÇÃO AOS TRENS NÃO INSTRUMENTADOS

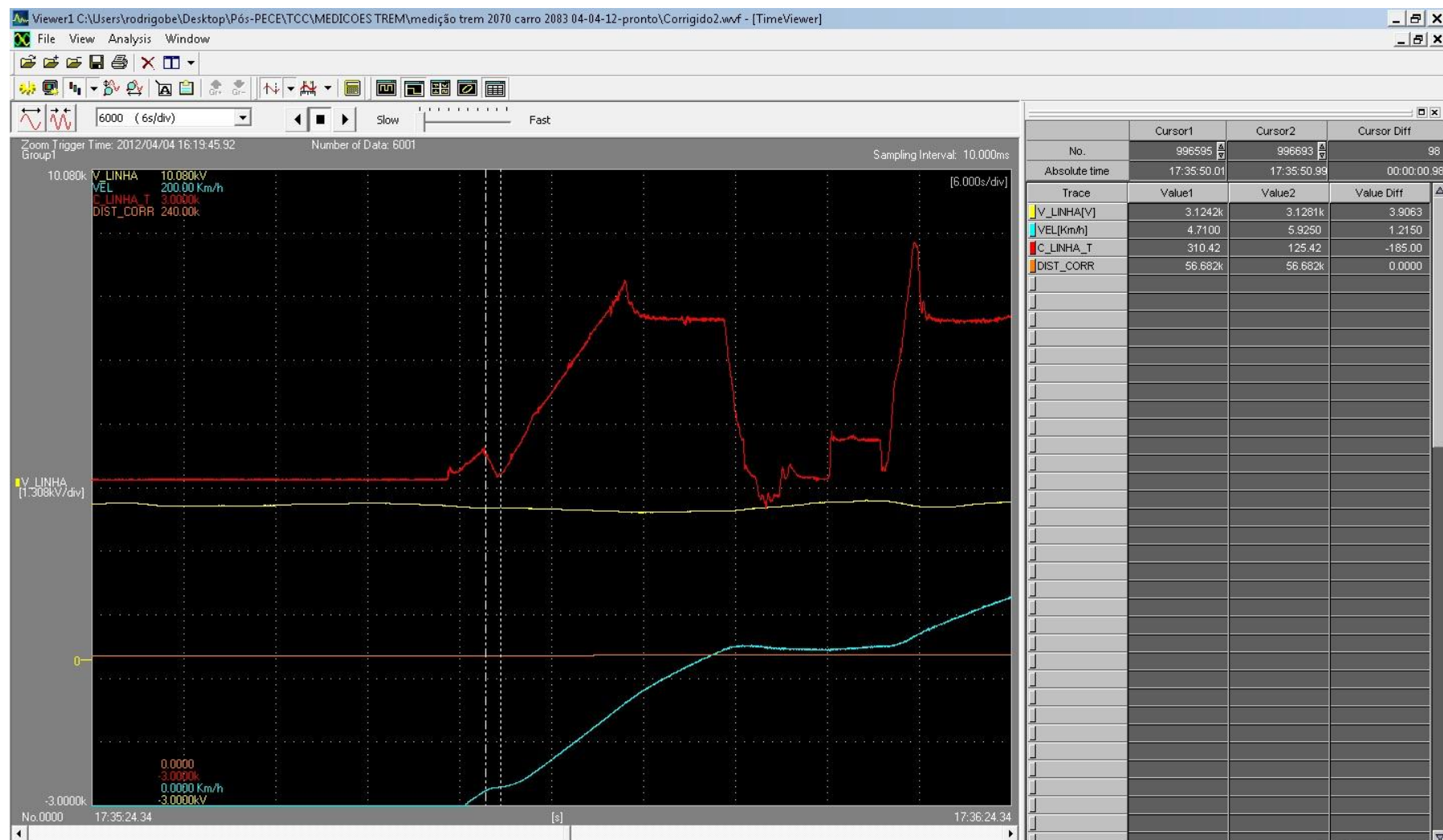


Figura 26 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC453 às 17:35:50

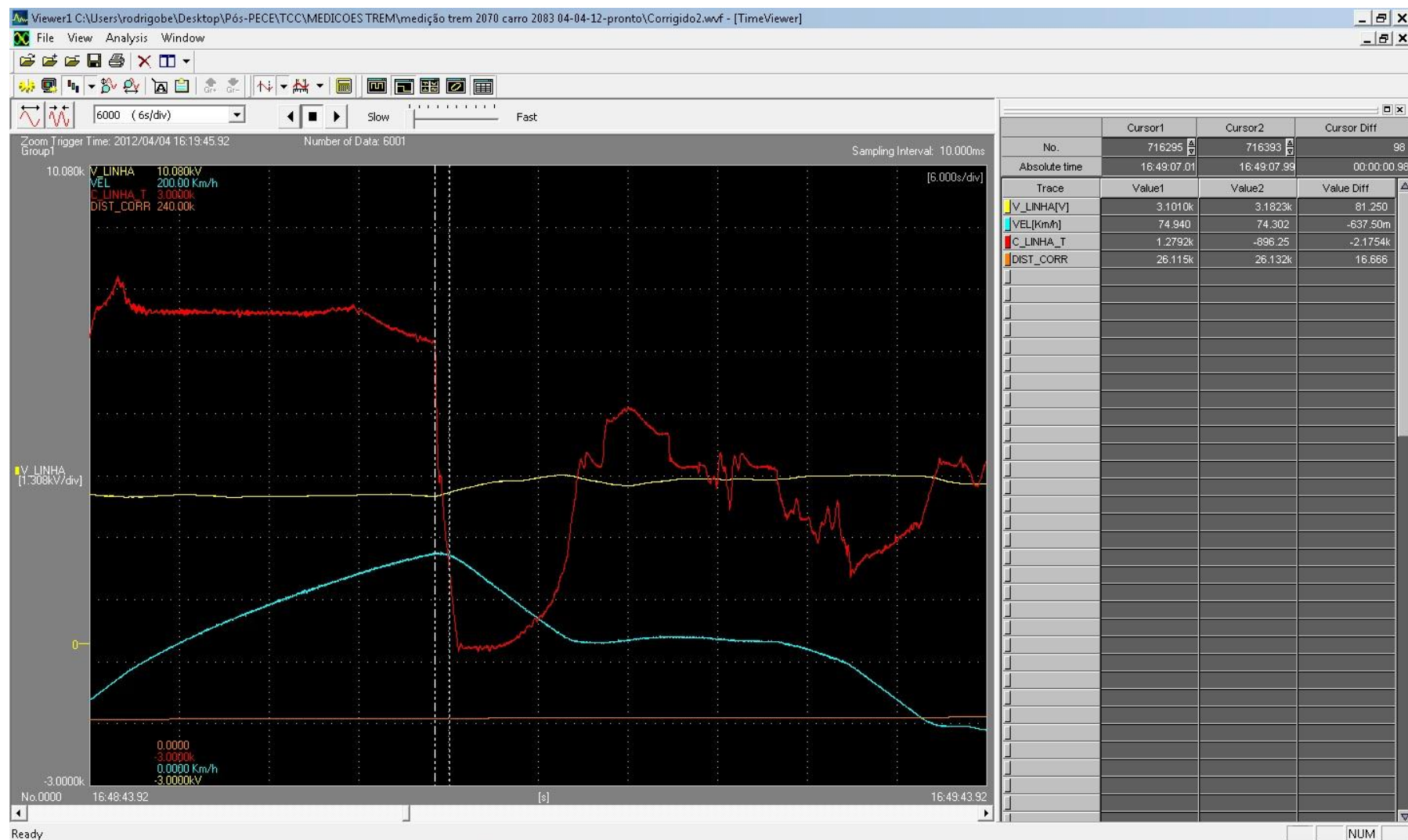


Figura 27 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC454 às 16:49:07

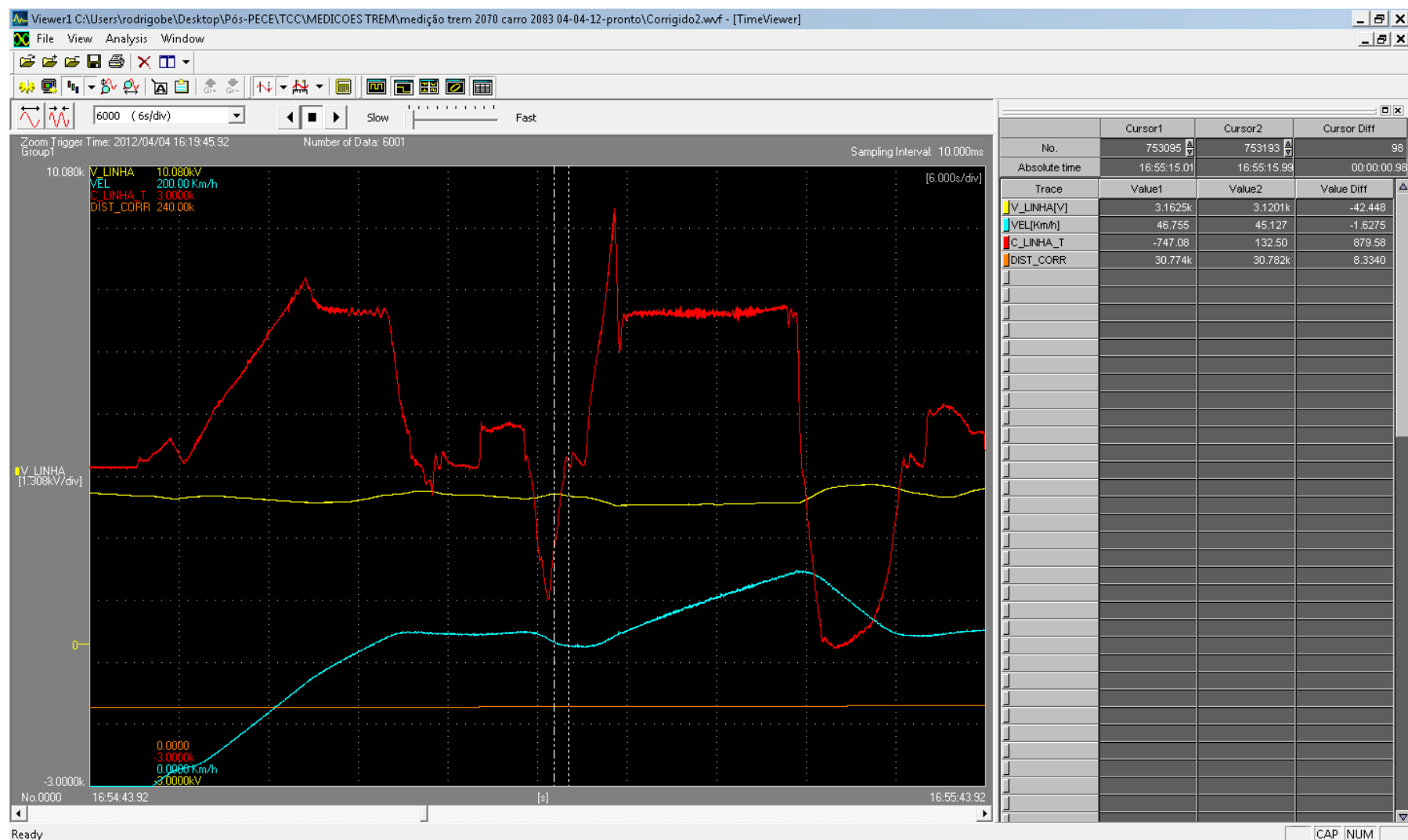


Figura 28 – (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC818 às 16:55:15

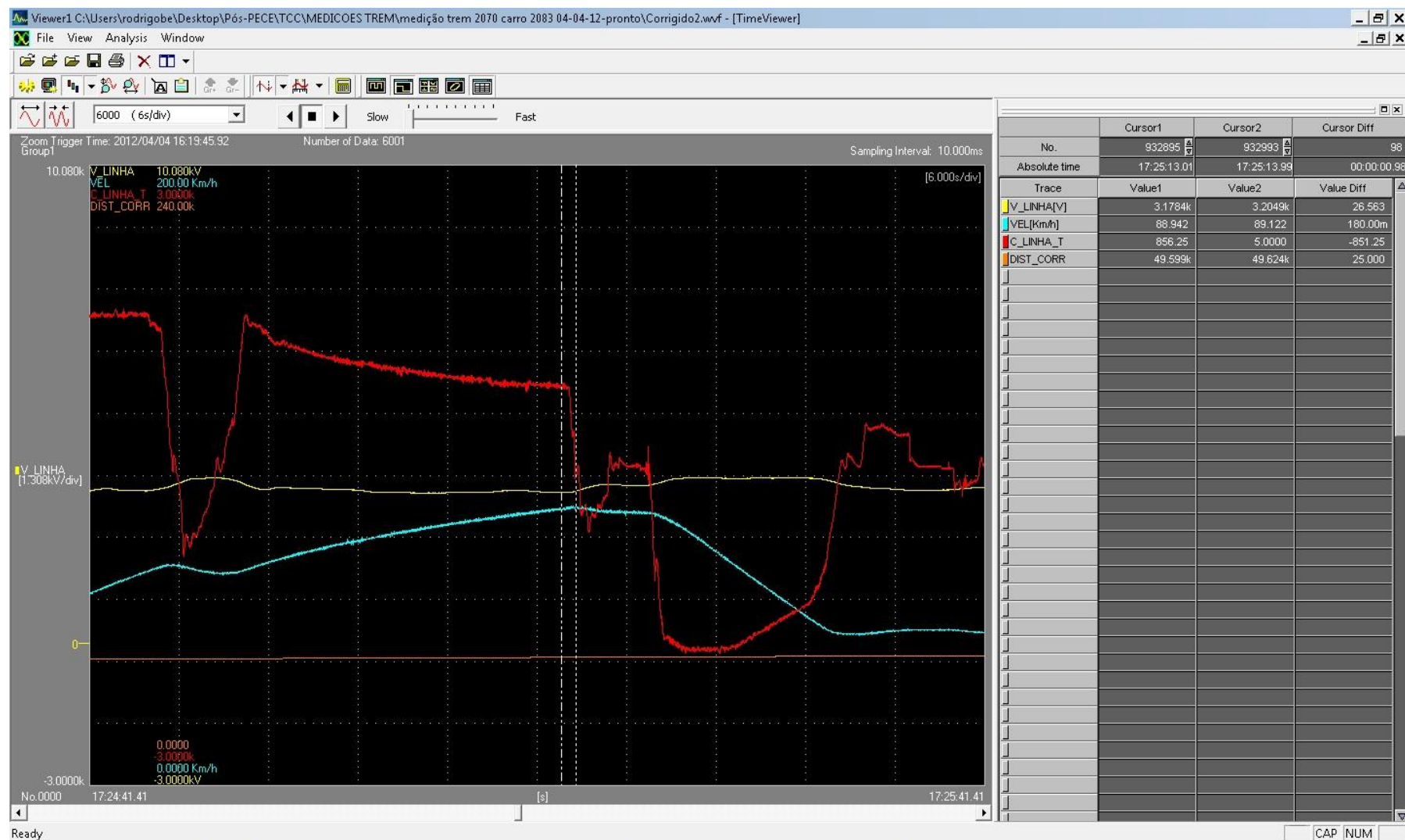


Figura 29 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC455 às 17:25:13

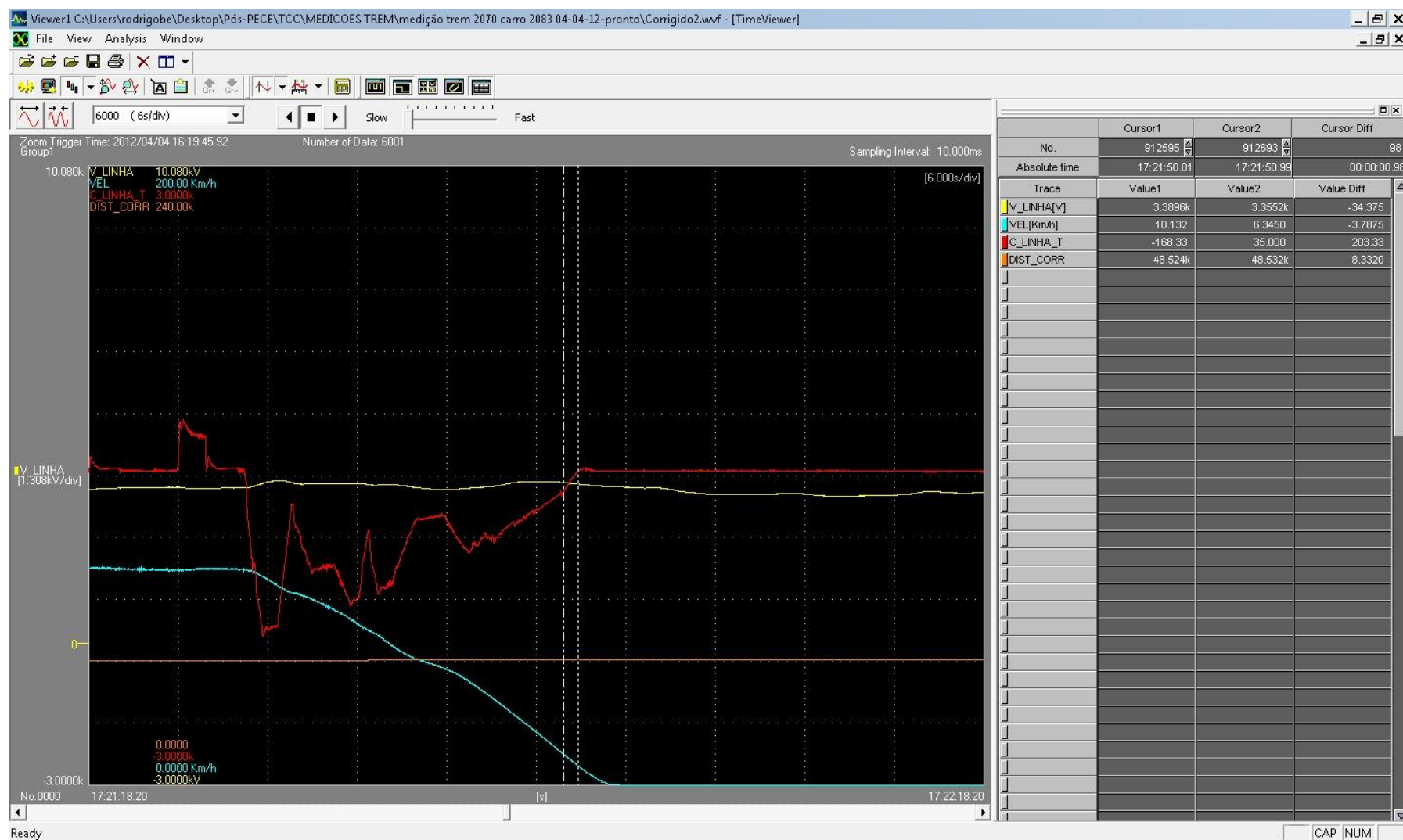


Figura 30 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC829 às 17:21:50

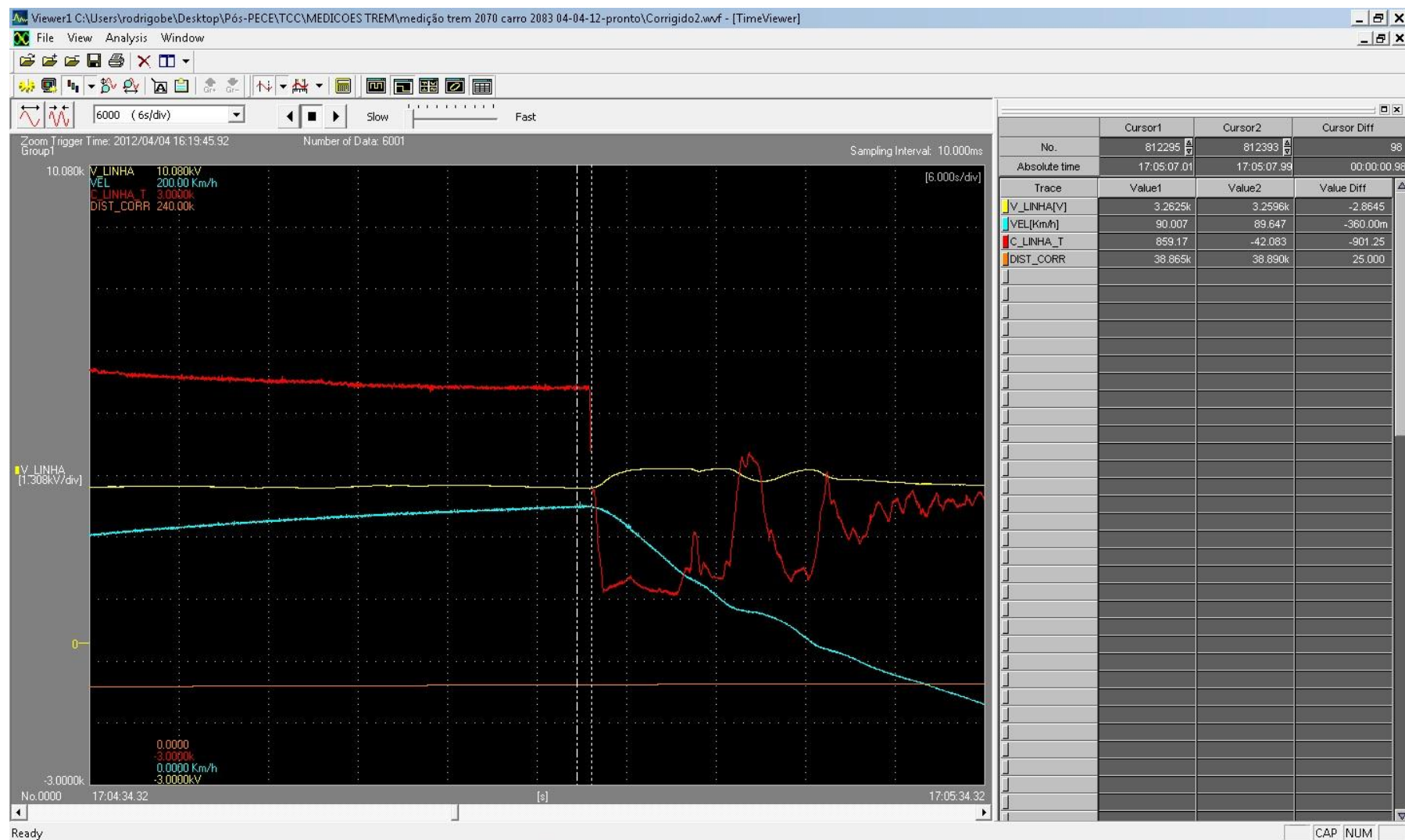


Figura 31 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC816 às 17:05:07

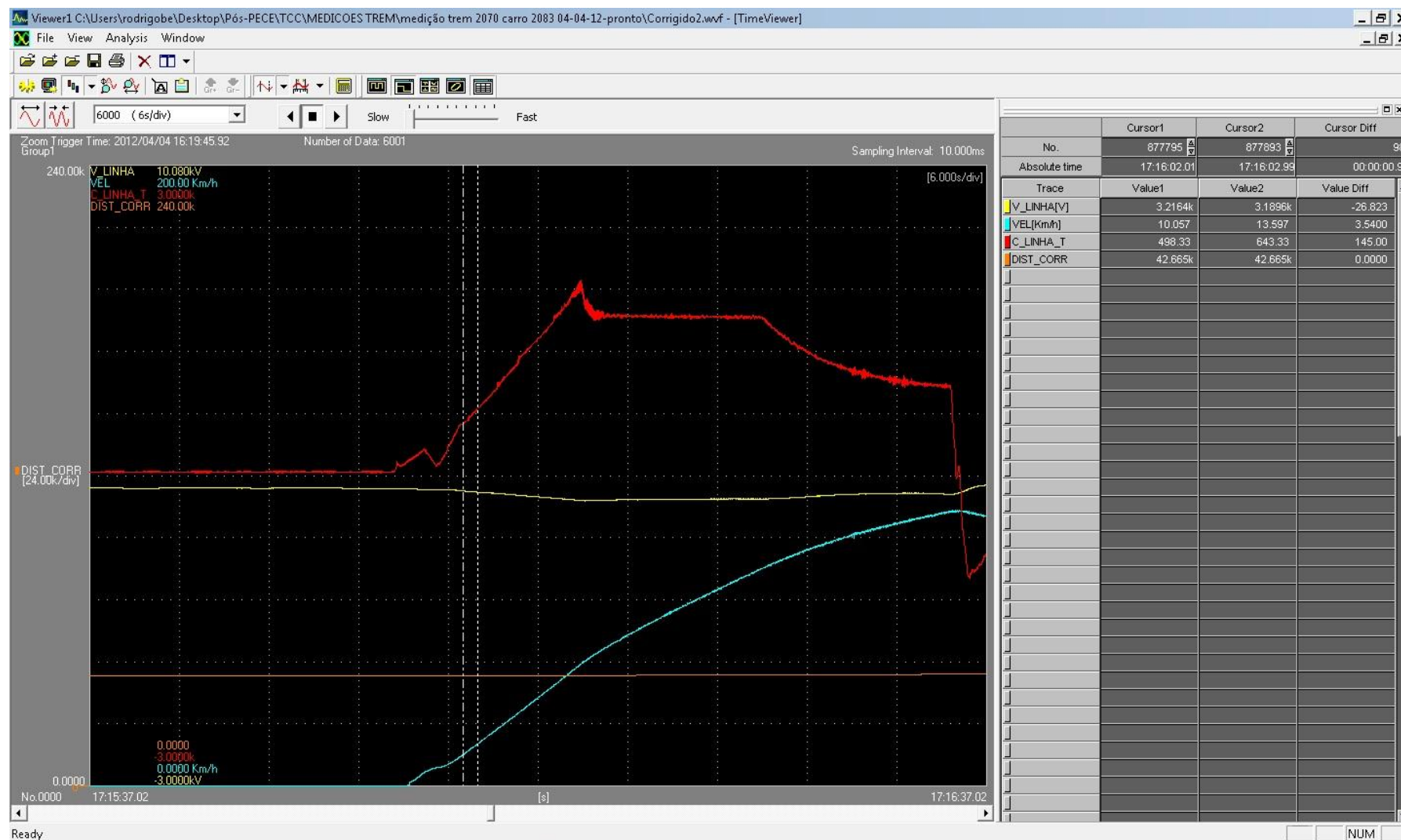


Figura 32 – Corrente (em vermelho) do oscilógrafo do “trem-teste” – Associação ao trem não instrumentado UC831 às 17:16:02

ANEXO C

CORRENTES MEDIDAS NAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

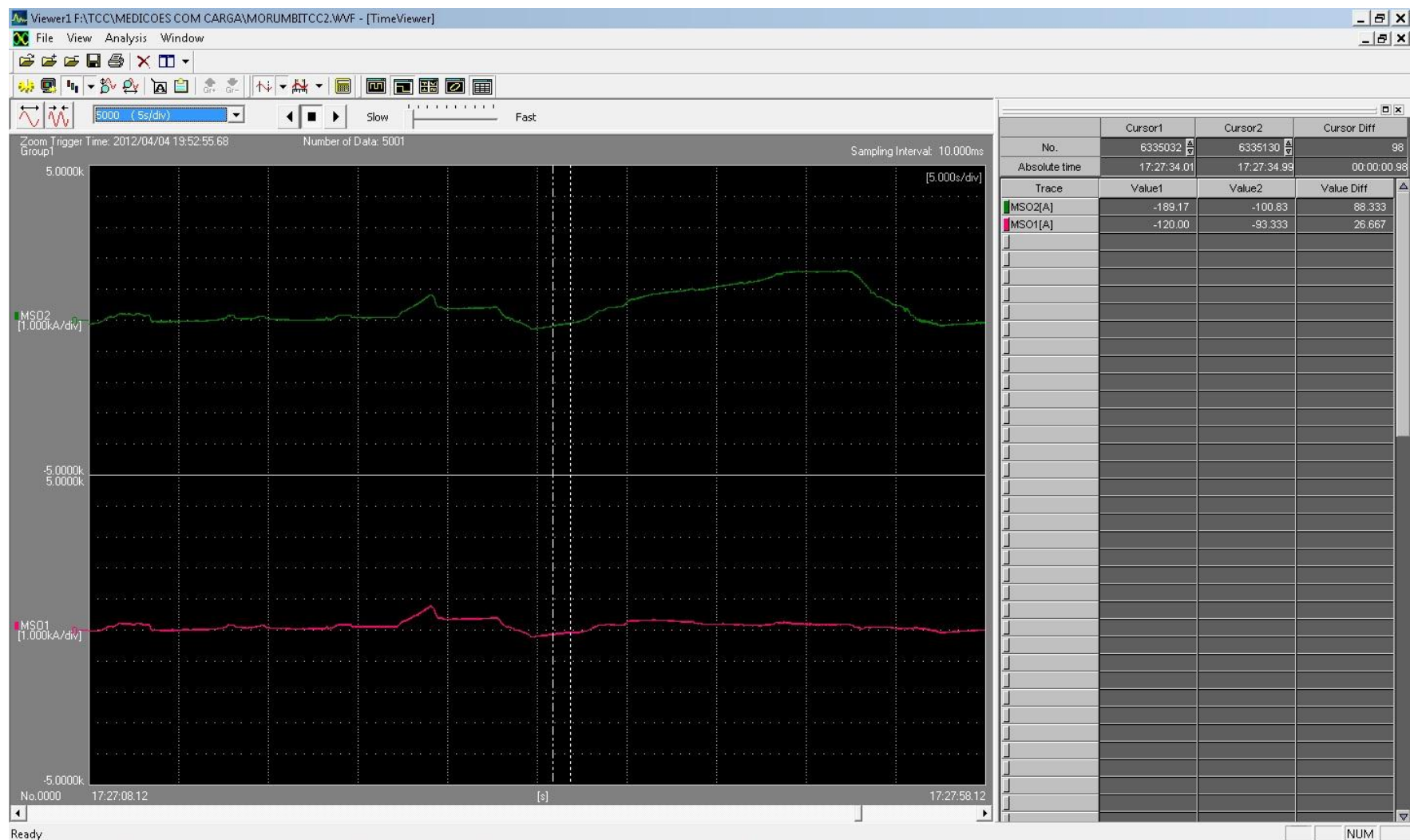


Figura 33 – Corrente circulante pelos alimentadores MSO1 e MSO2 da subestação Morumbi às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa

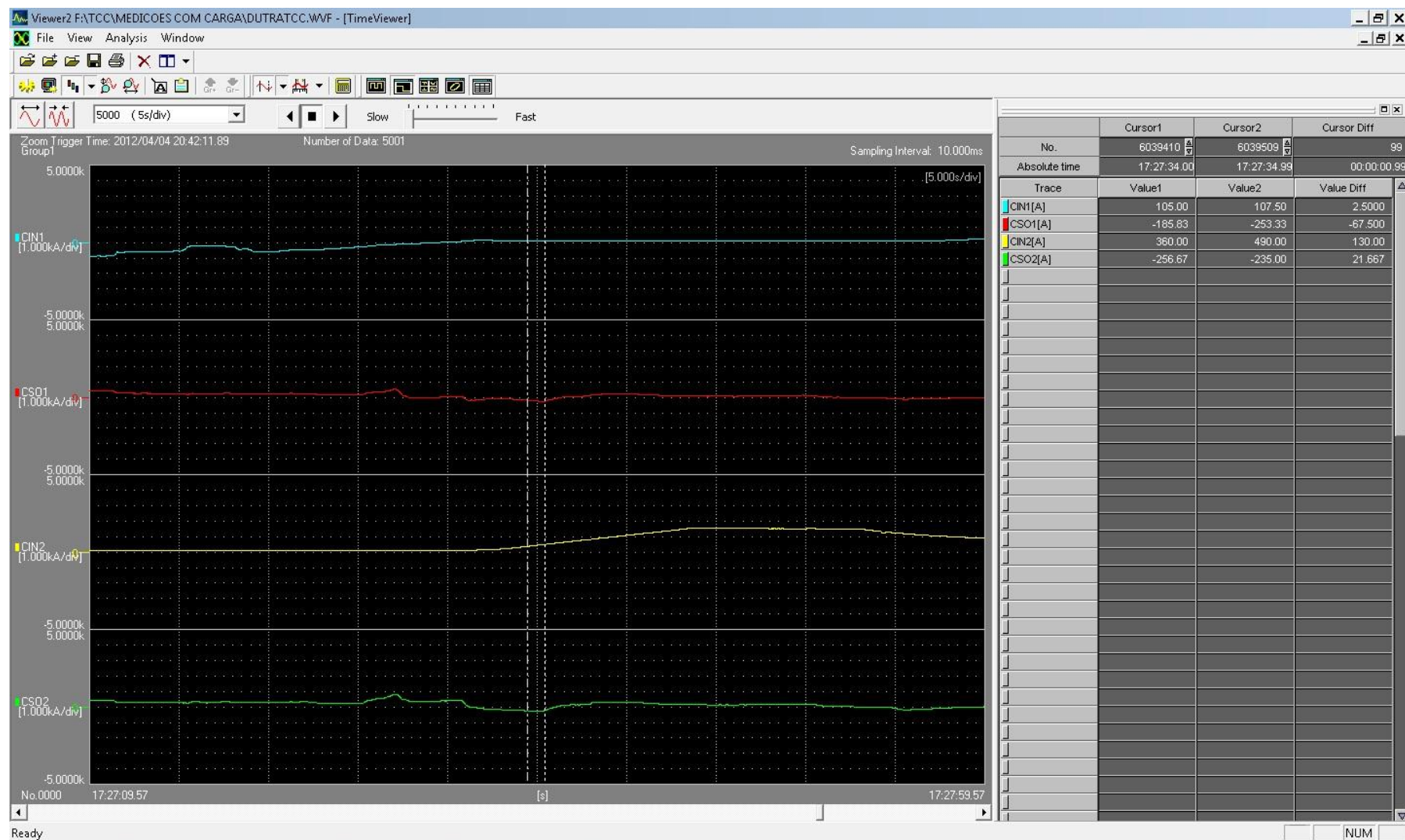


Figura 34 – Corrente circulante pelos alimentadores CSO1, CSO2, CIN1 e CIN2 da subestação Cidade Dutra às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa

ANEXO D

CIRCUITOS EQUIVALENTES E SIMULAÇÕES PRELIMINARES

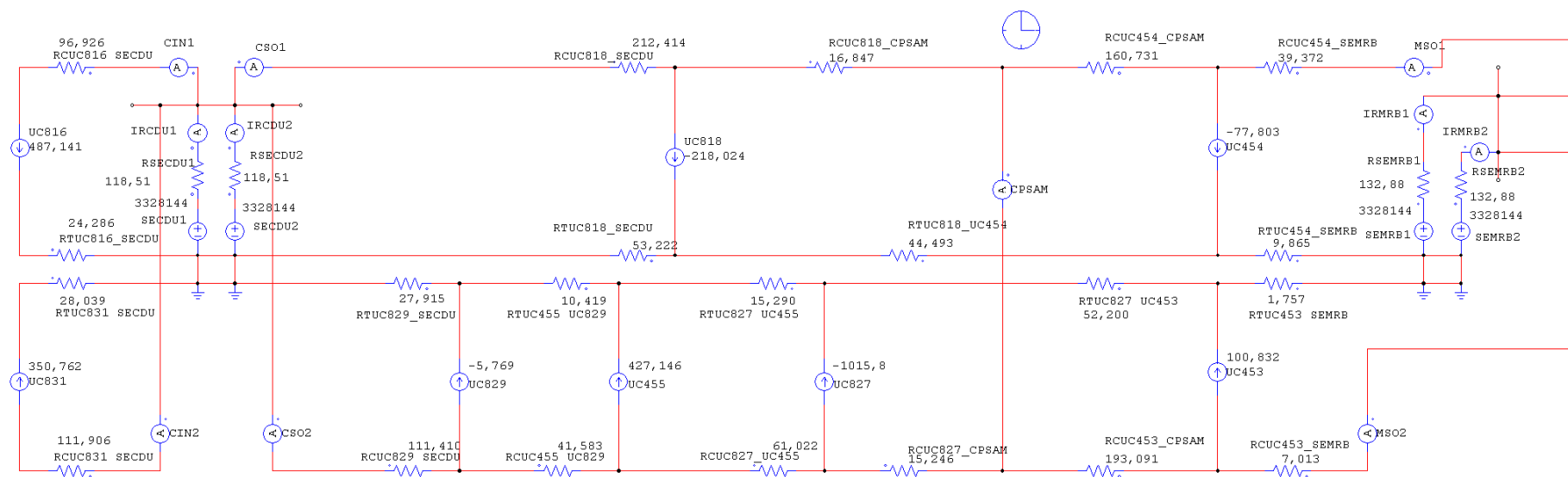


Figura 35 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 100 amostras referidas aos trens não instrumentados

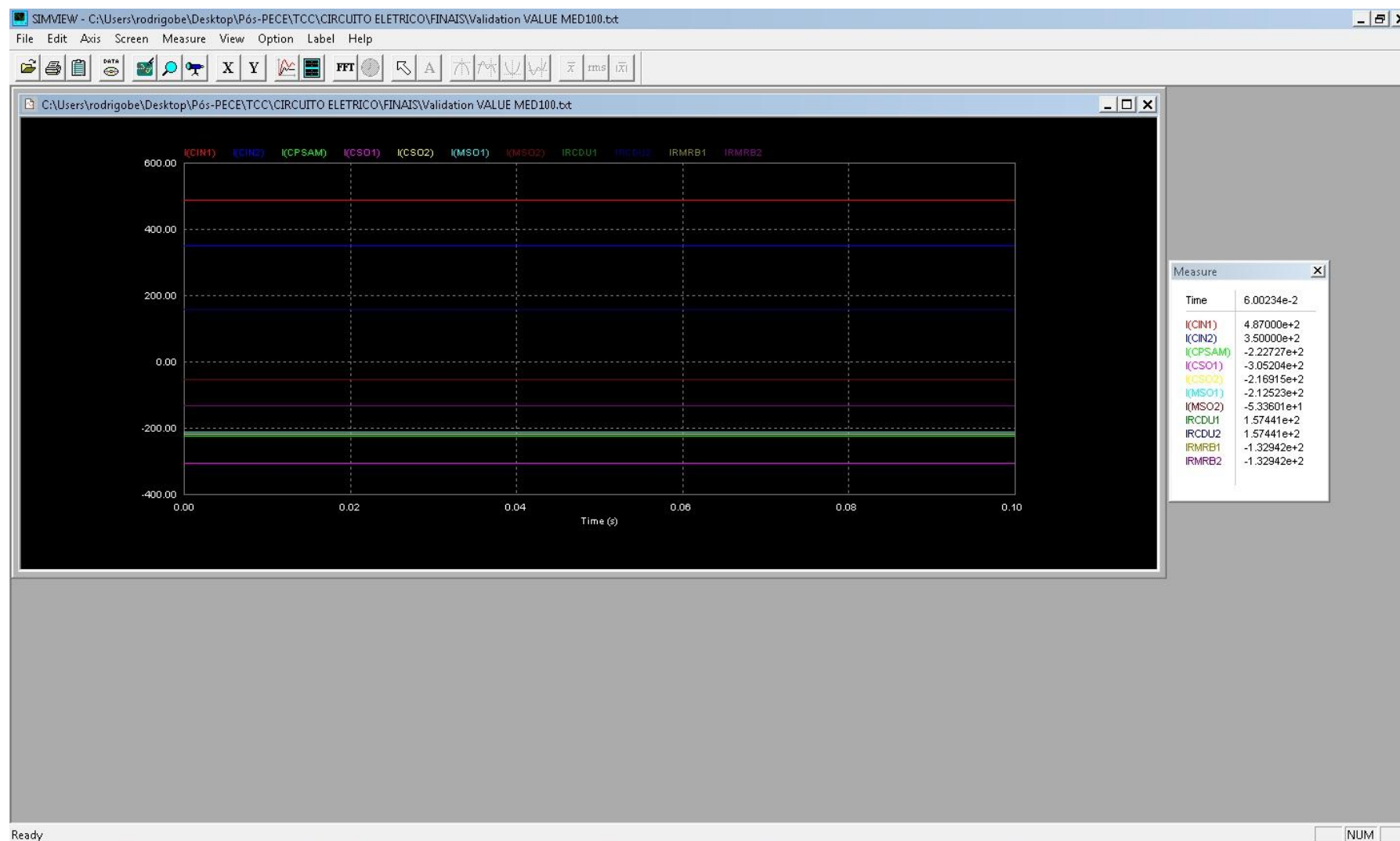


Figura 36 — Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 100 amostras referidas aos trens não instrumentados

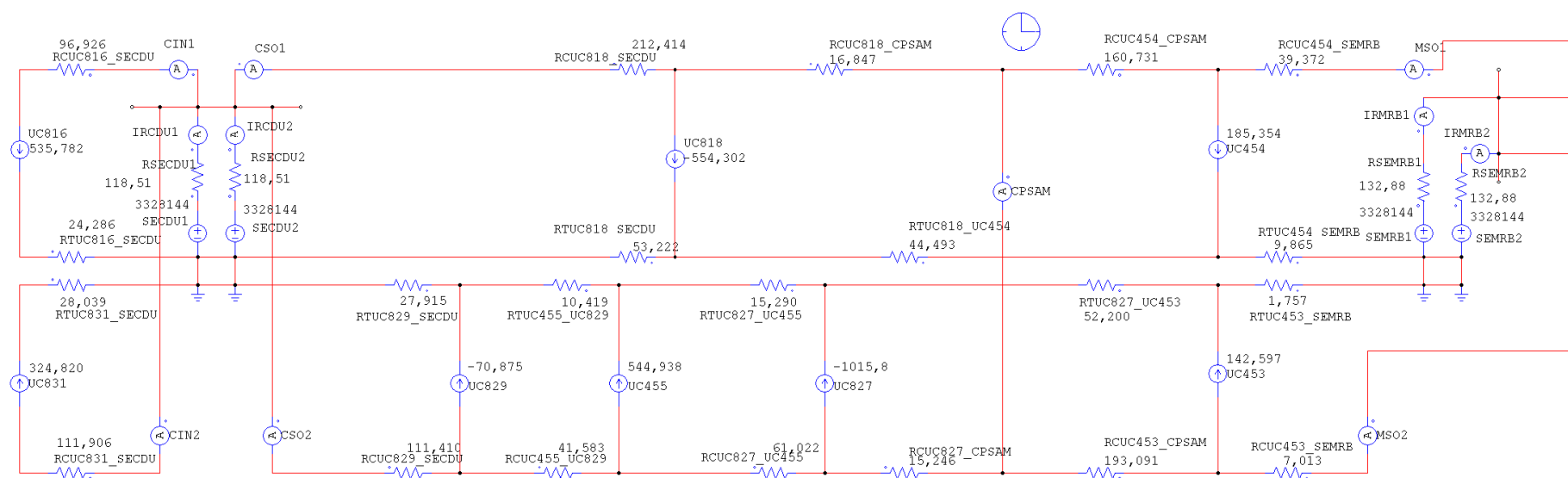


Figura 37 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras iniciais referidas aos trens não instrumentados

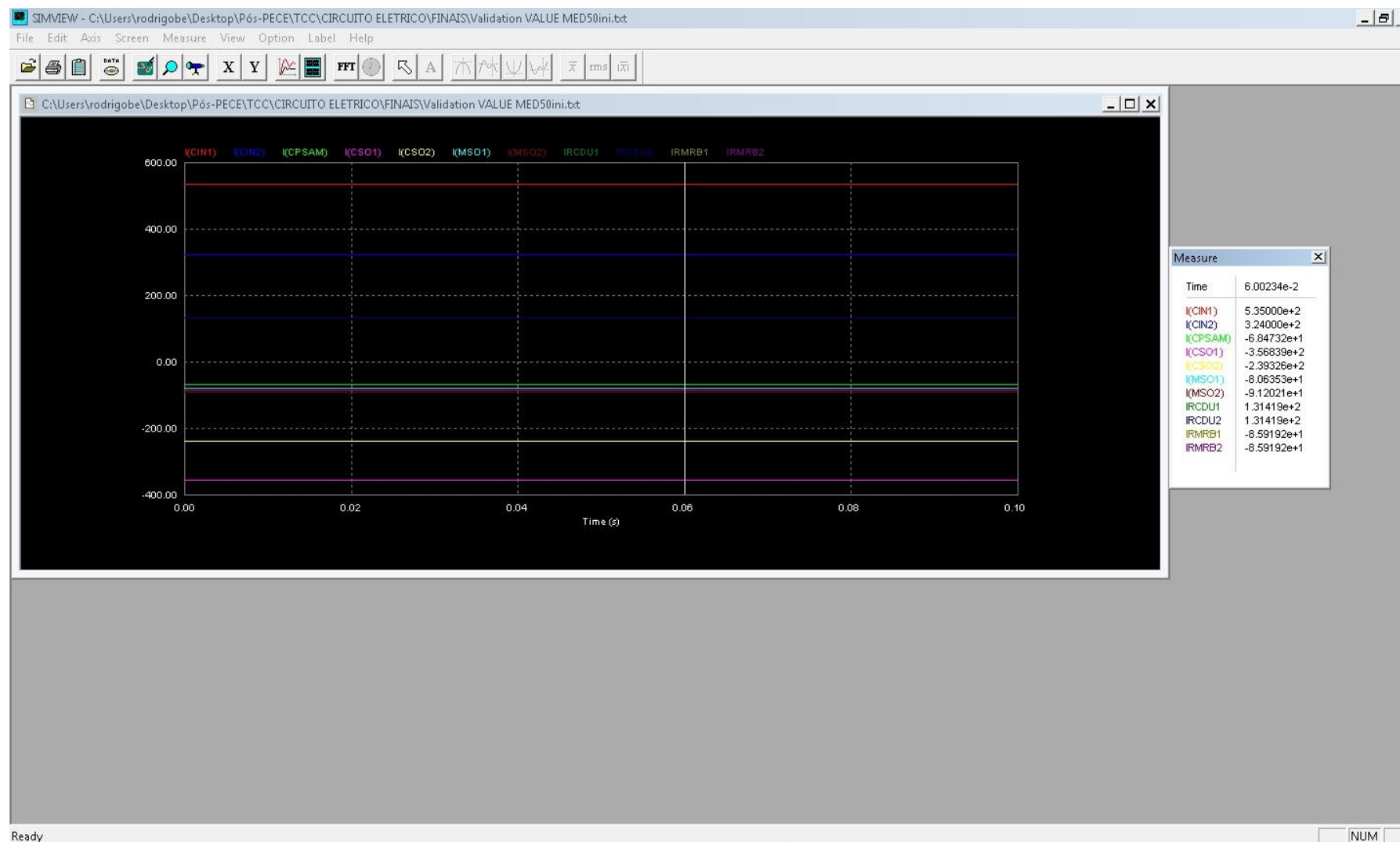


Figura 38 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras iniciais referidas aos trens não instrumentados

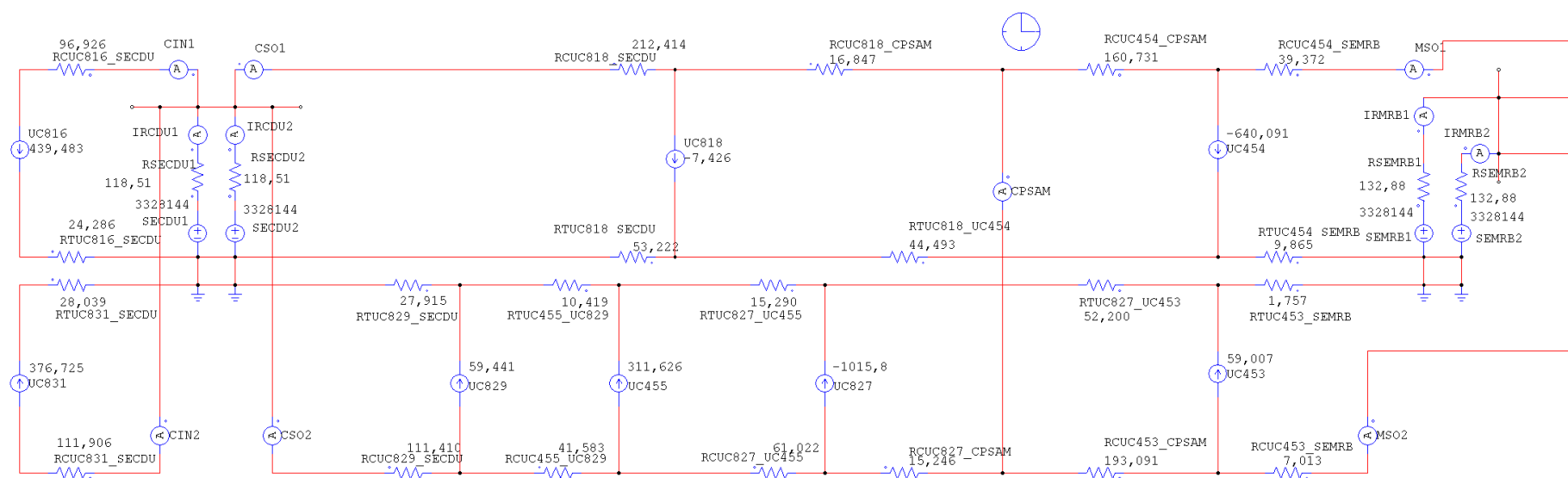


Figura 39 – Circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras finais referidas aos trens não instrumentados

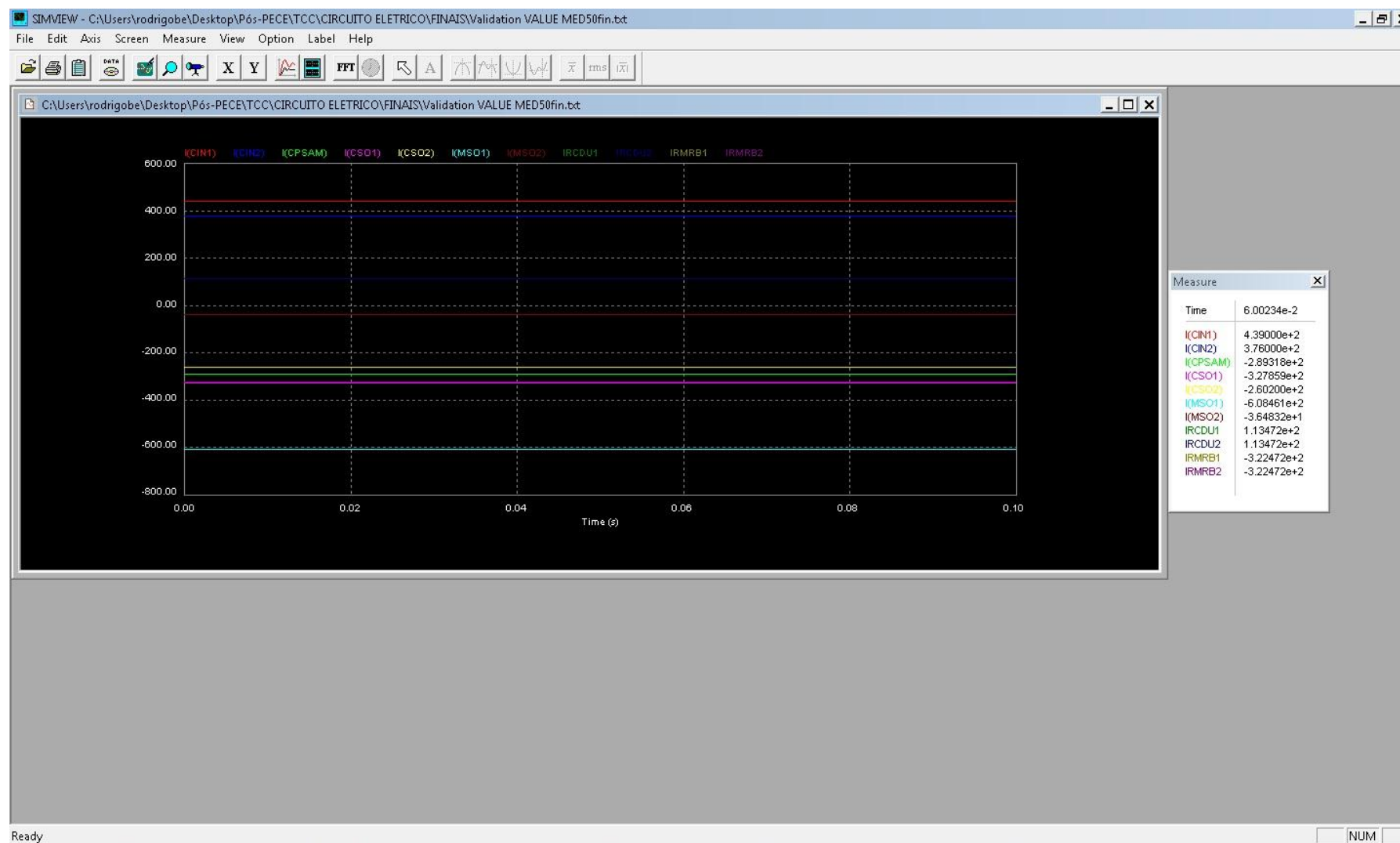


Figura 40 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Média de corrente das 50 amostras finais referidas aos trens não instrumentados

Figura 41 – Circuito elétrico equivalente – Resistência das subestações elevada para $RSE = 2G\Omega$

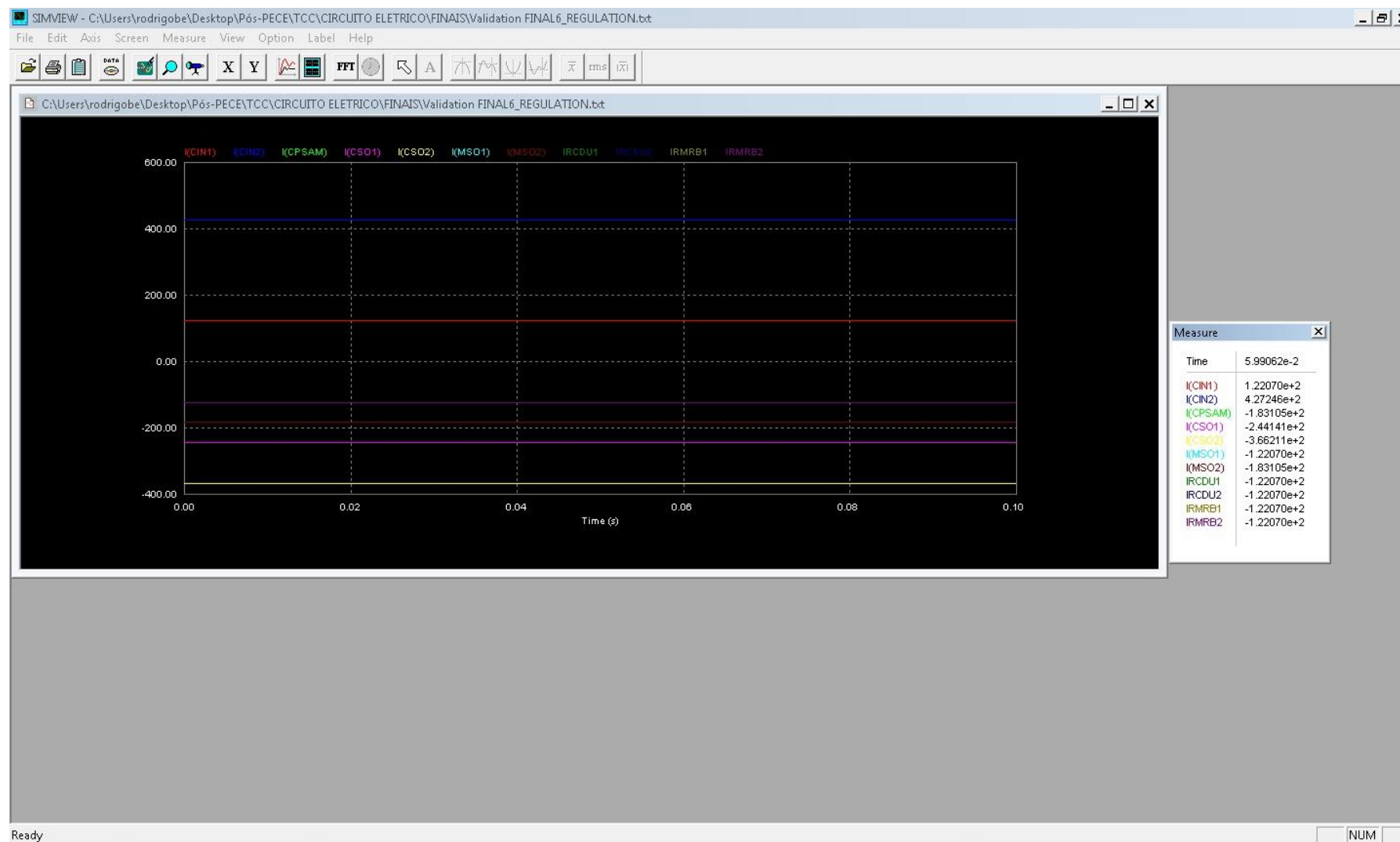


Figura 42 – Simulação, curvas e resultados do circuito elétrico equivalente – Resistência das subestações elevada para $RSE = 2G\Omega$

ANEXO F

INSERÇÃO DE FONTE DE CORRENTE EM MVO1

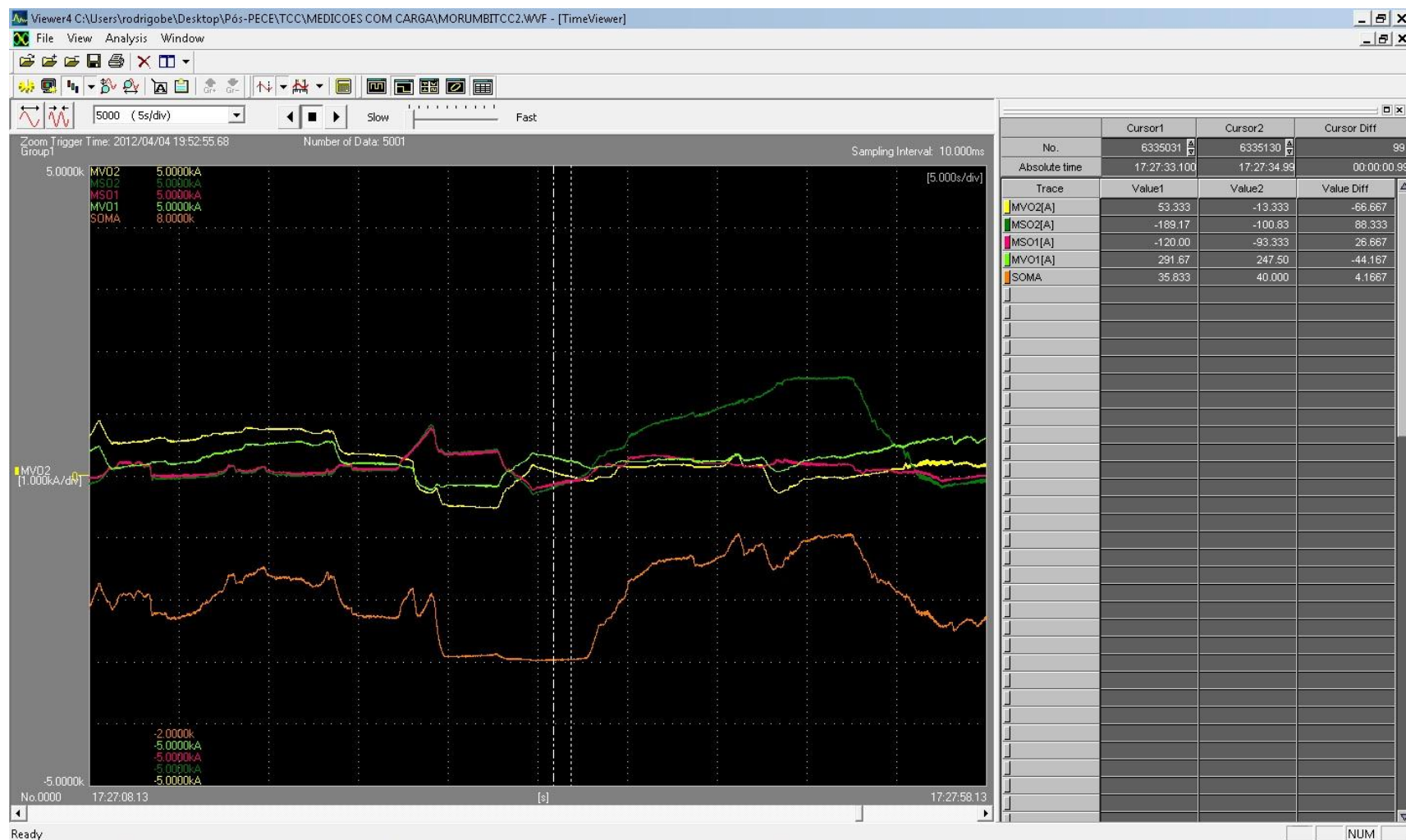


Figura 43 – Soma e corrente circulante pelos alimentadores MSO1, MSO2, MVO1 e MVO2 da subestação Morumbi às 17:27:34 – Oscilógrafo Yokogawa

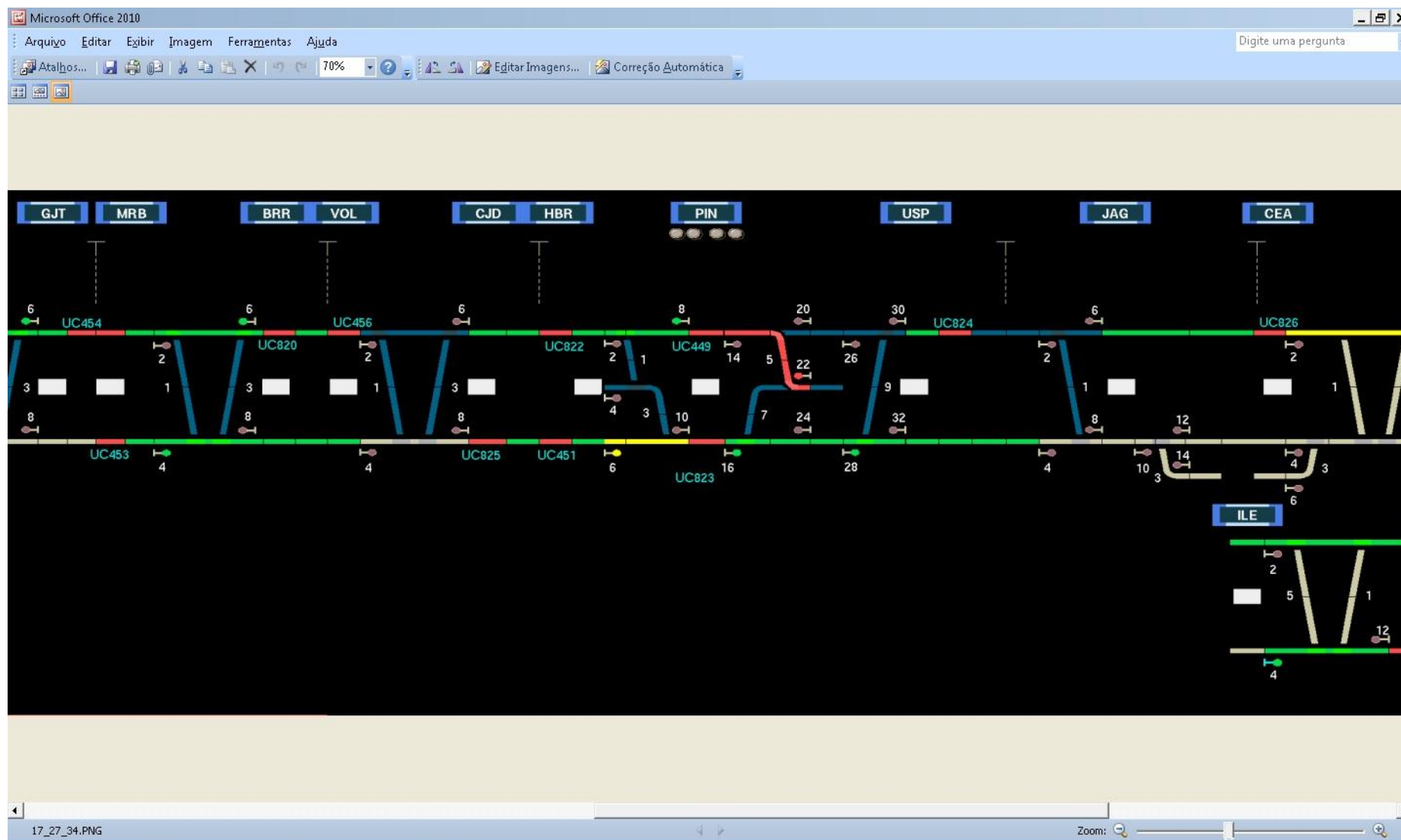


Figura 44 – Painel sinóptico do CCO às 17:27:34 – Trecho Ceasa – Granja Julieta

ANEXO G

CENÁRIOS

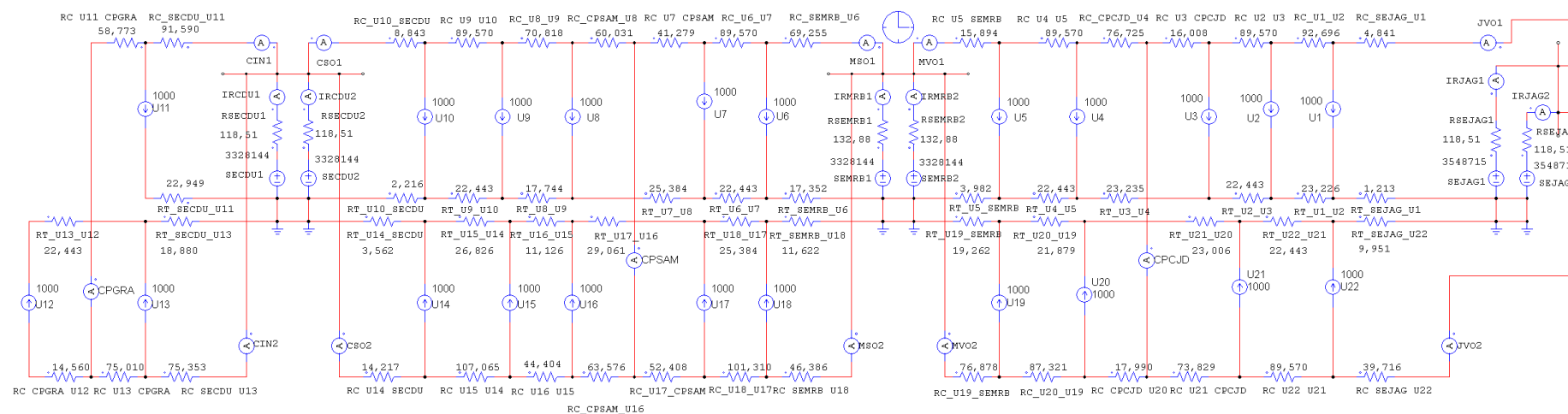


Figura 45 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 1

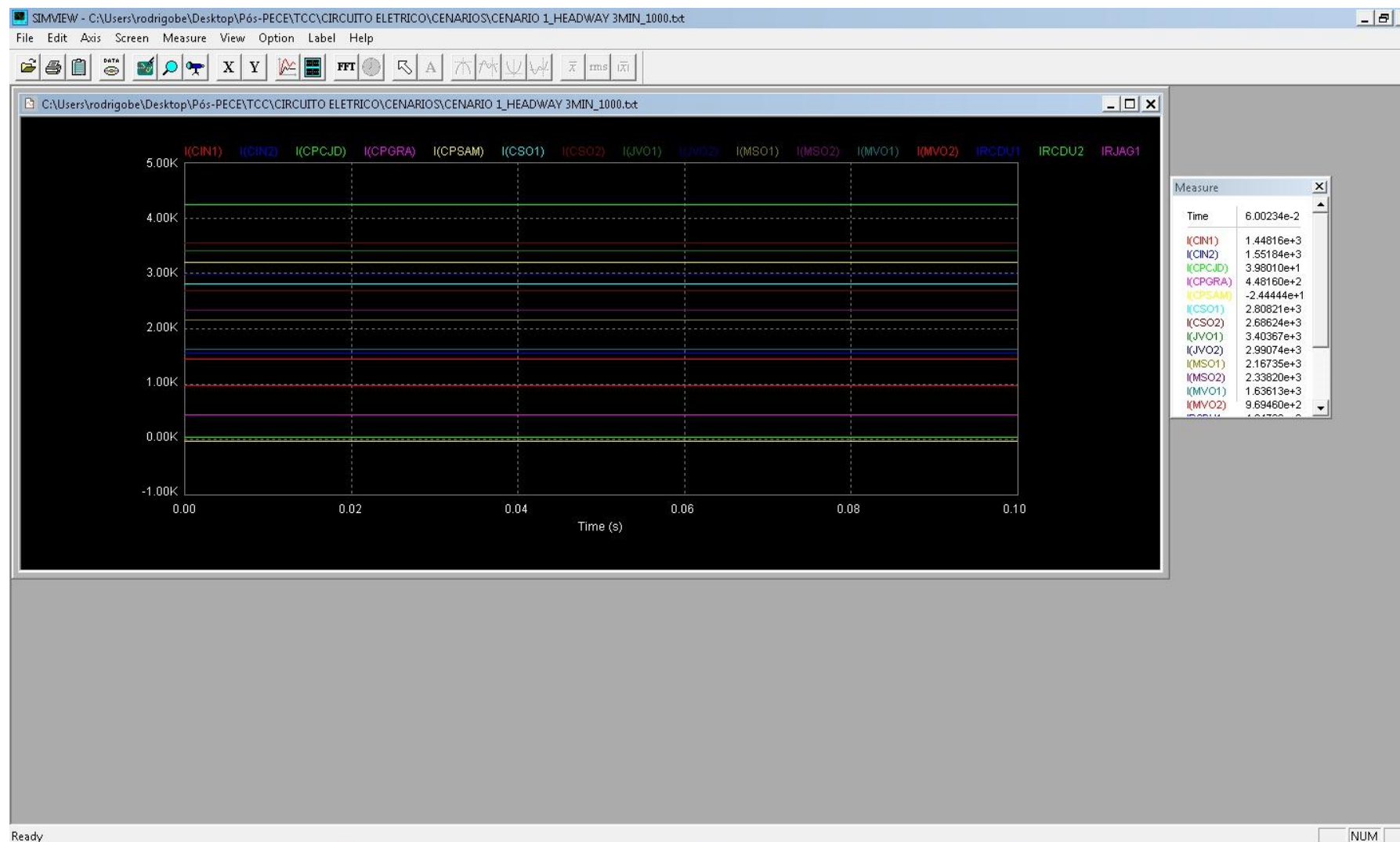


Figura 46 – Simulação, curvas e resultados do cenário 1

Figura 47 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 2

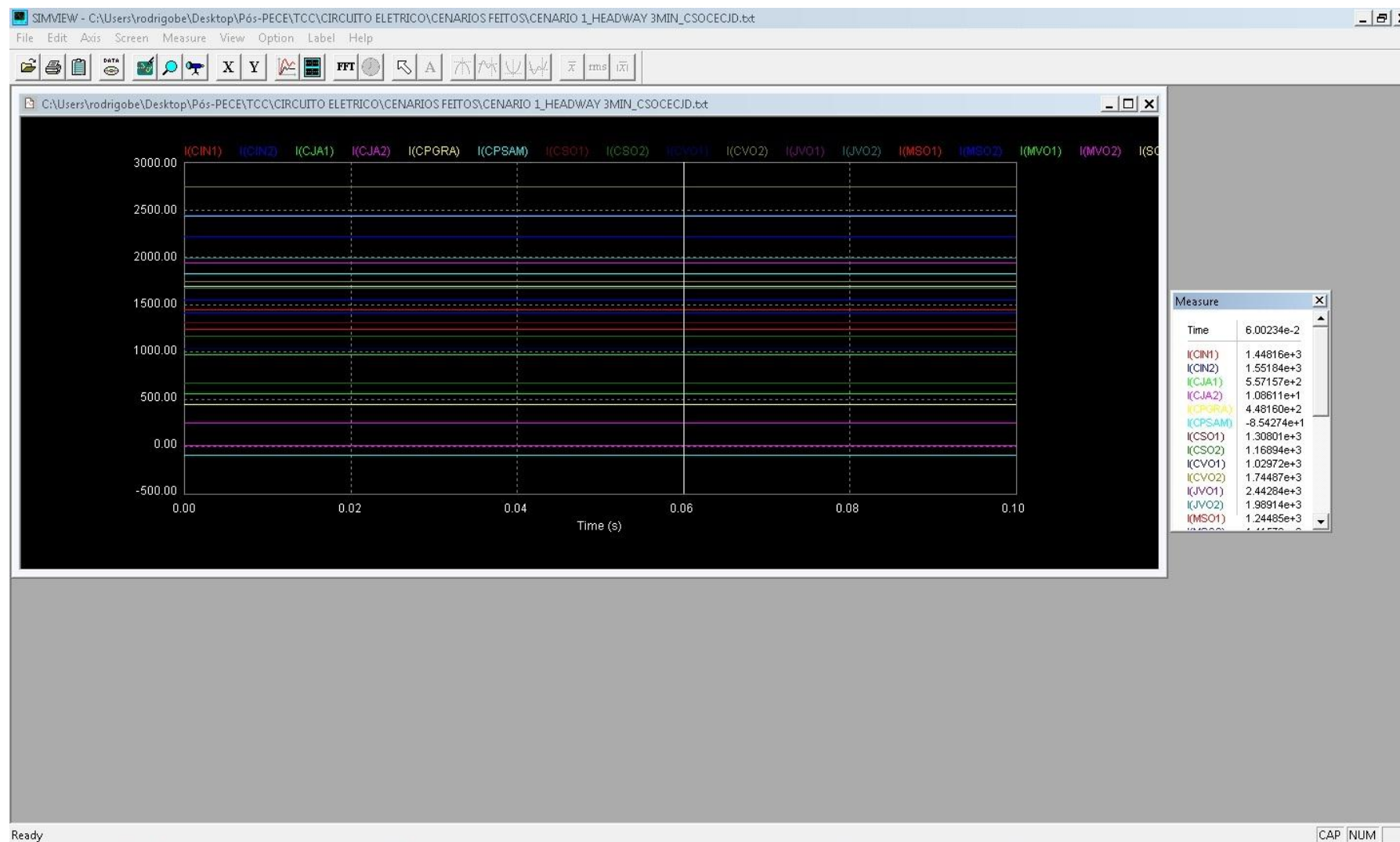


Figura 48 – Simulação, curvas e resultados do cenário 2

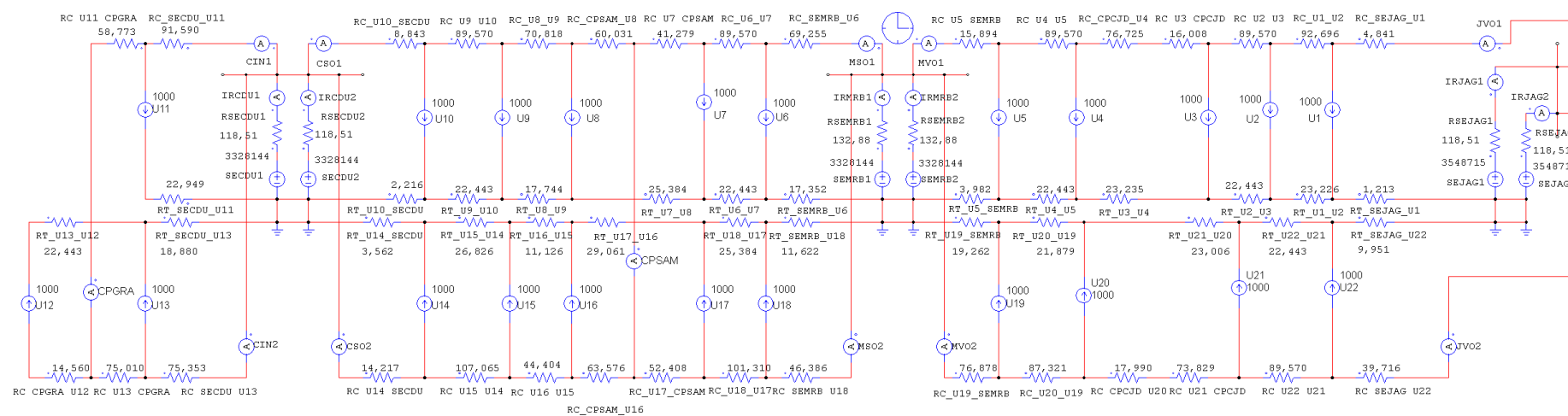


Figura 49 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 3

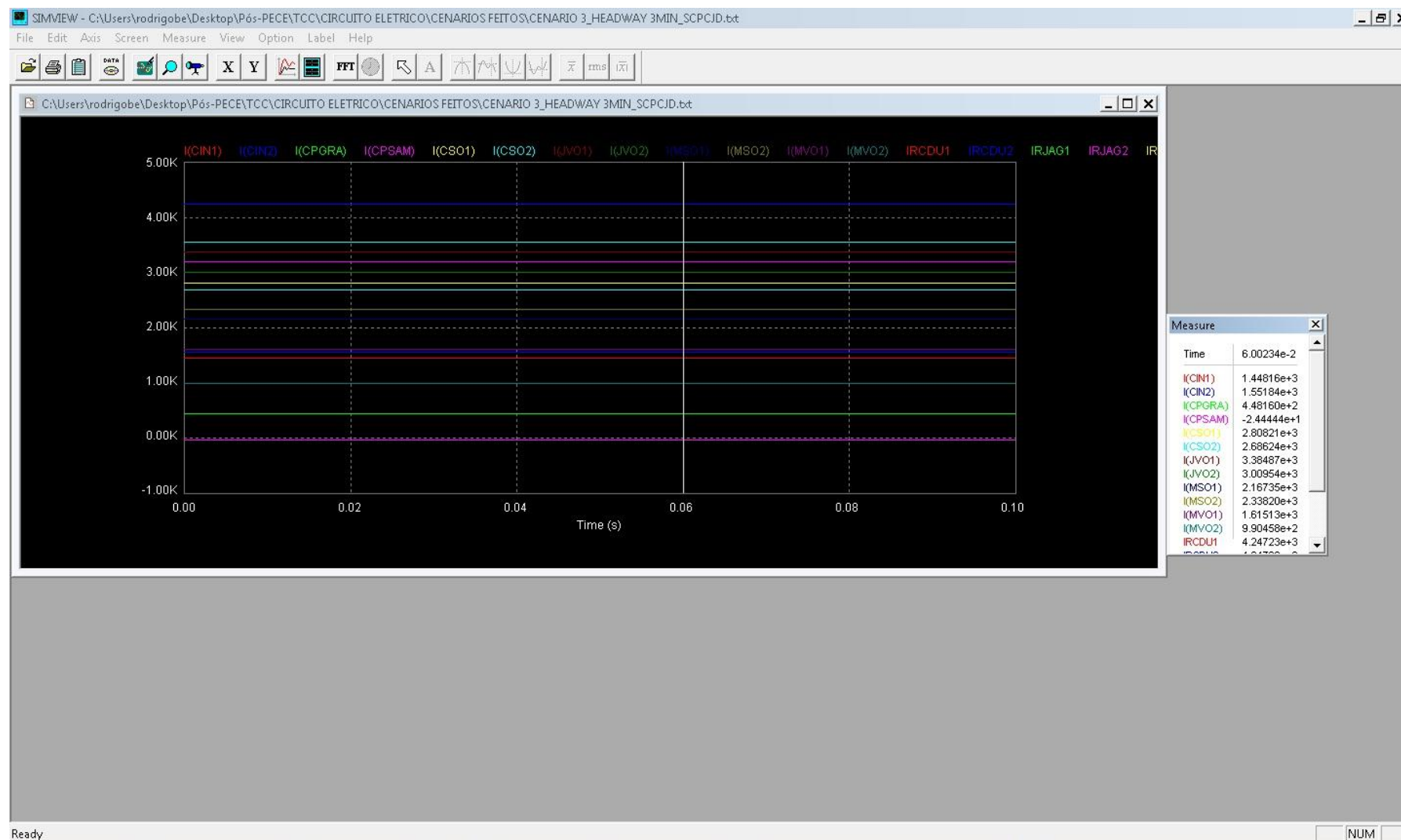


Figura 50 – Simulação, curvas e resultados do cenário 3

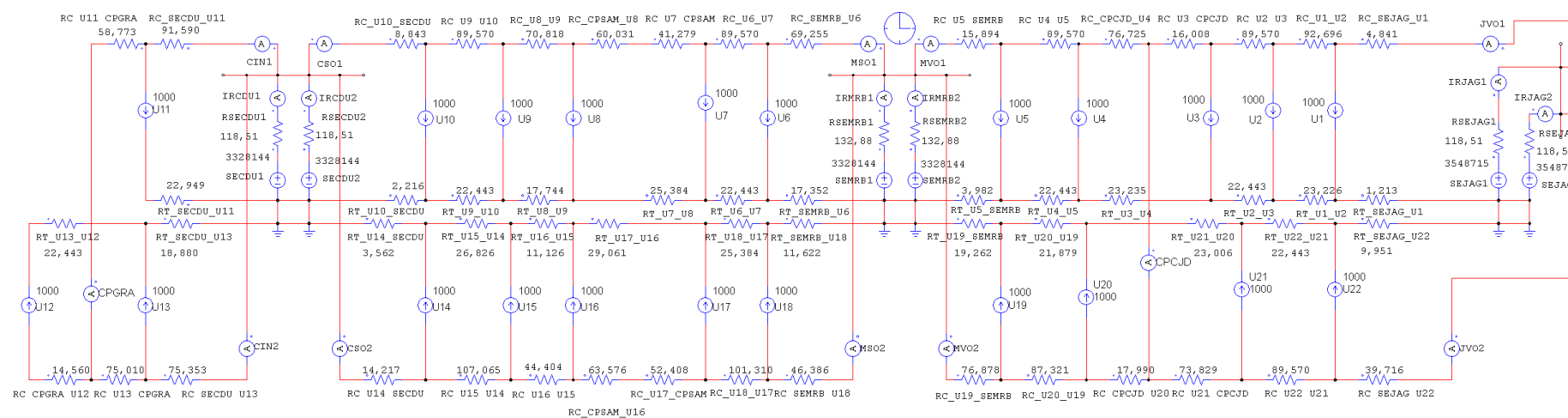


Figura 51 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 4

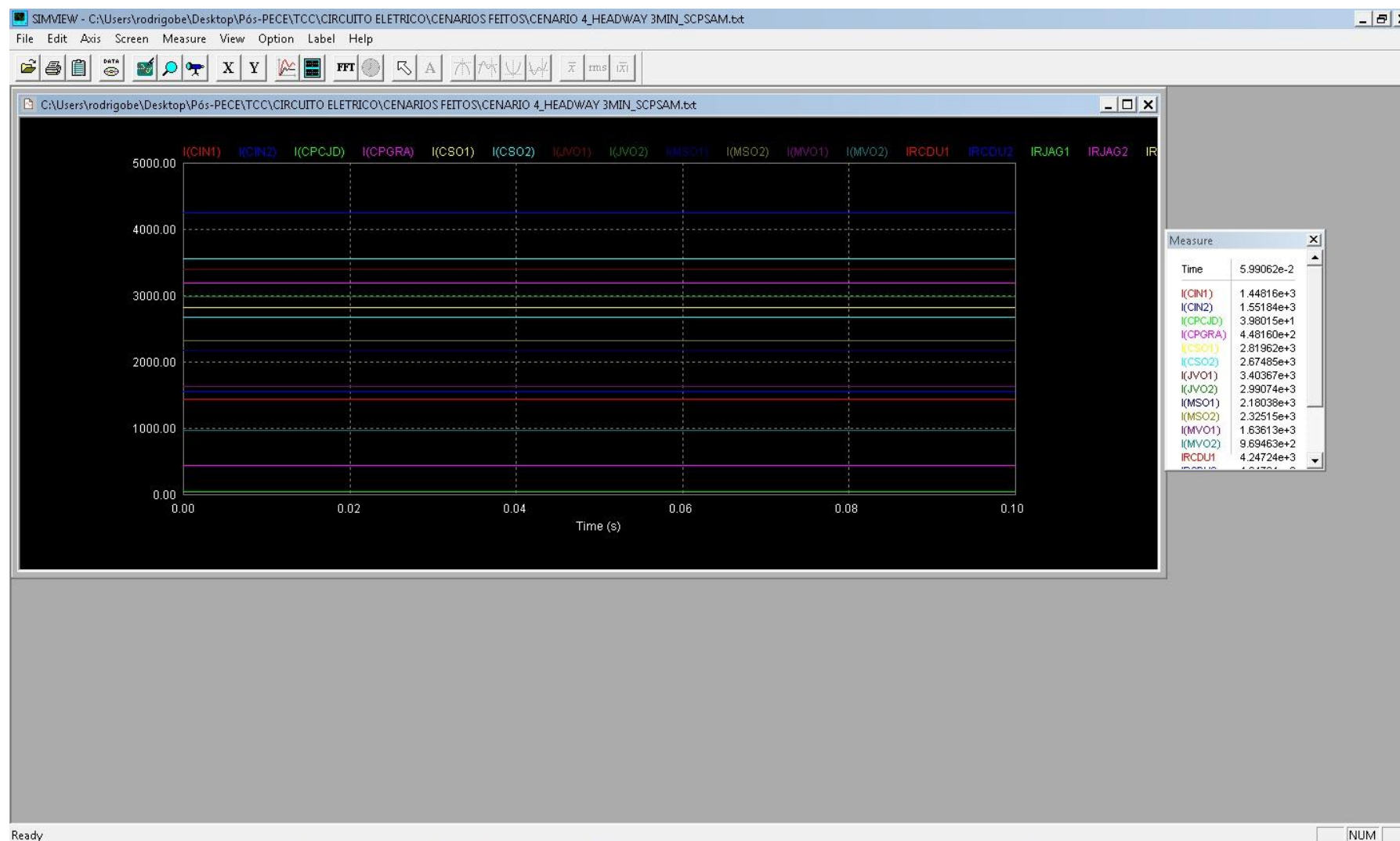


Figura 52 – Simulação, curvas e resultados do cenário 4

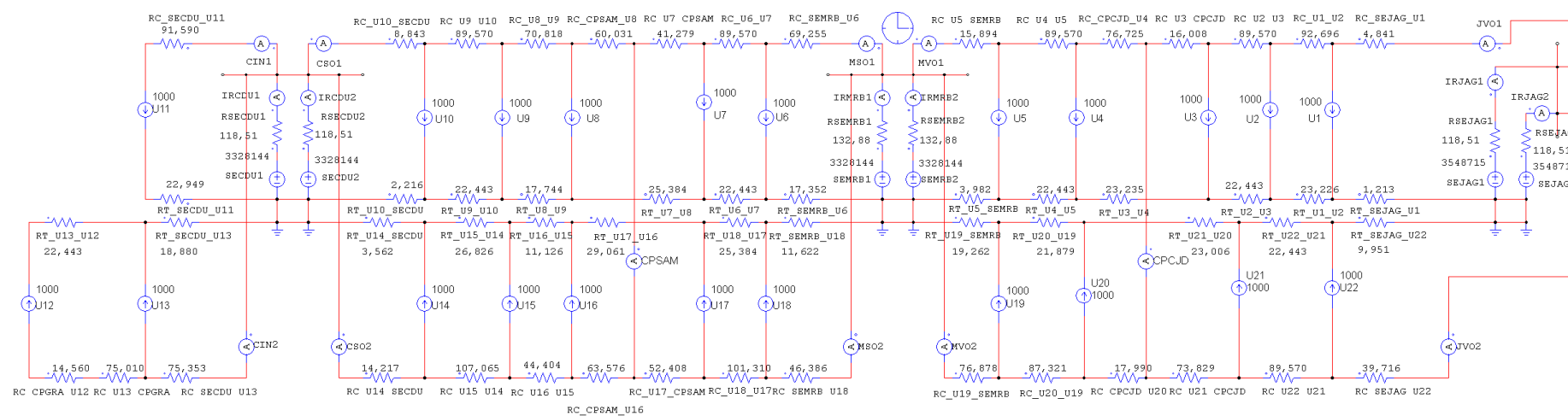


Figura 53 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 5

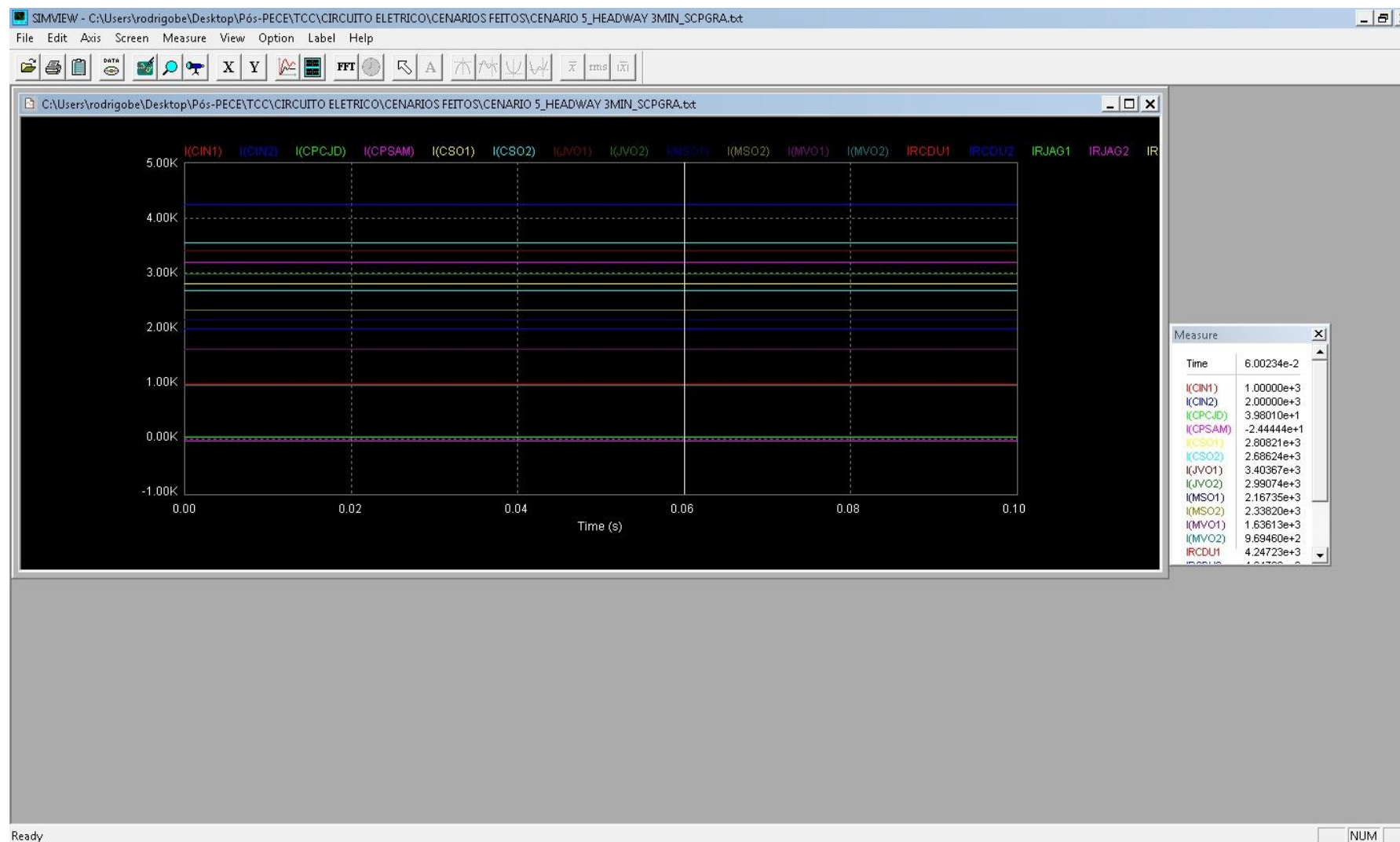
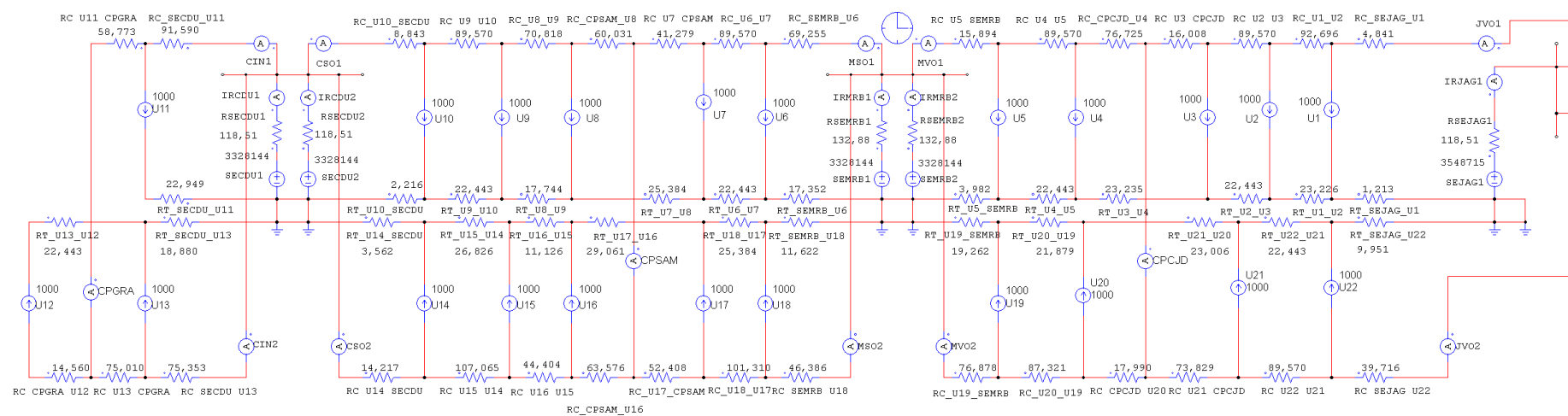


Figura 54 – Simulação, curvas e resultados do cenário 5



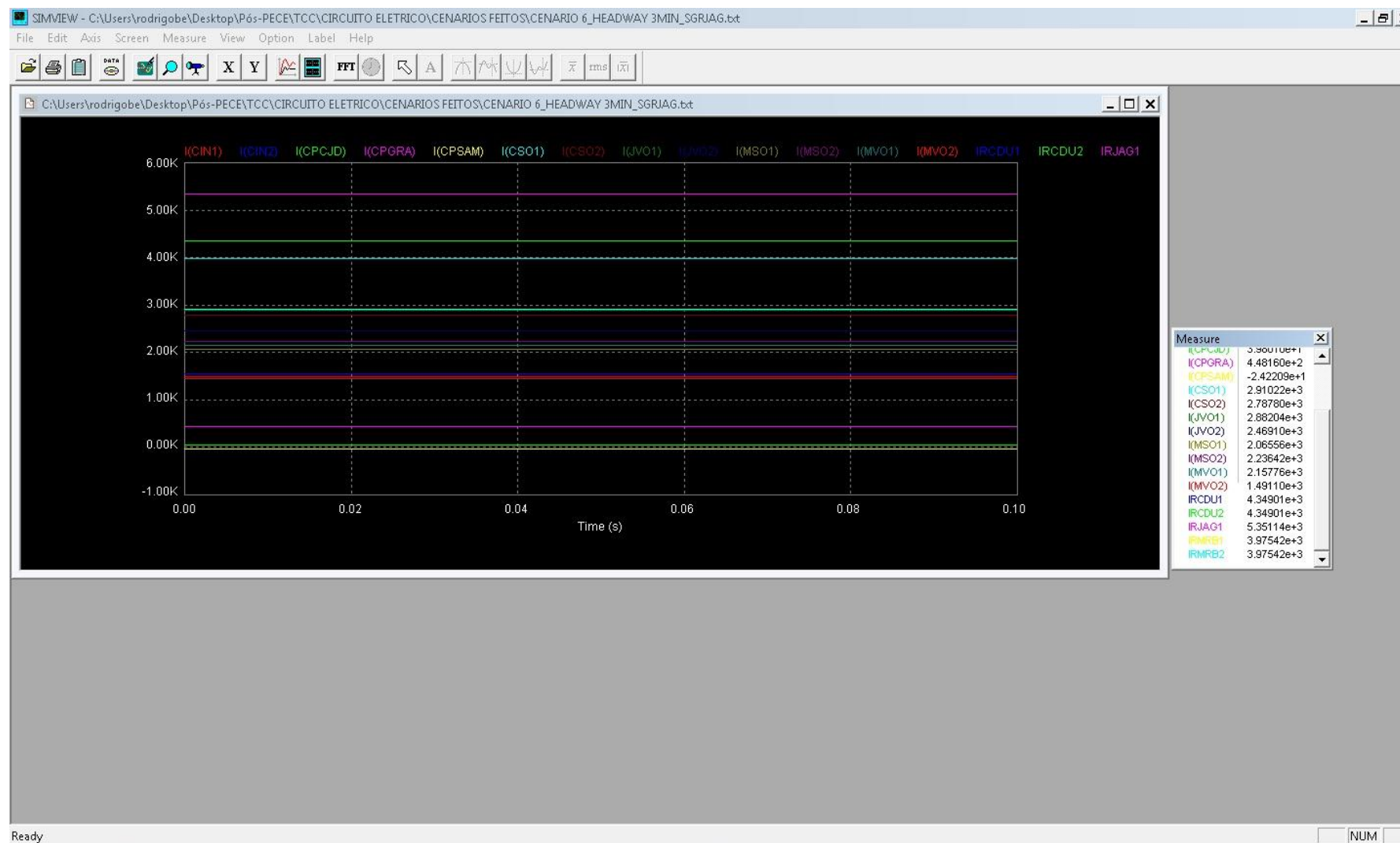


Figura 56 – Simulação, curvas e resultados do cenário 6

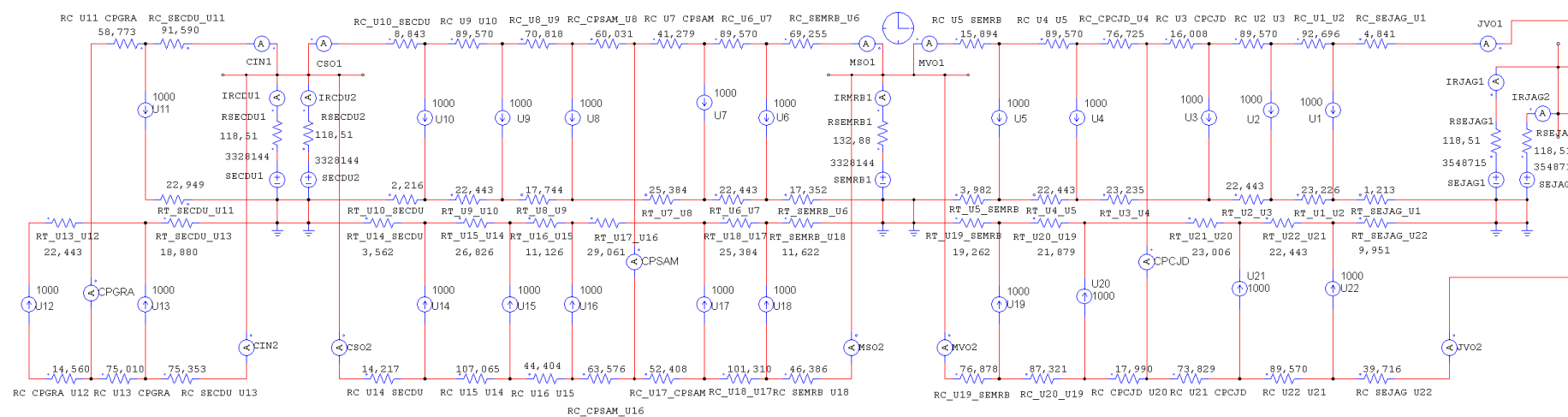


Figura 57 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 7

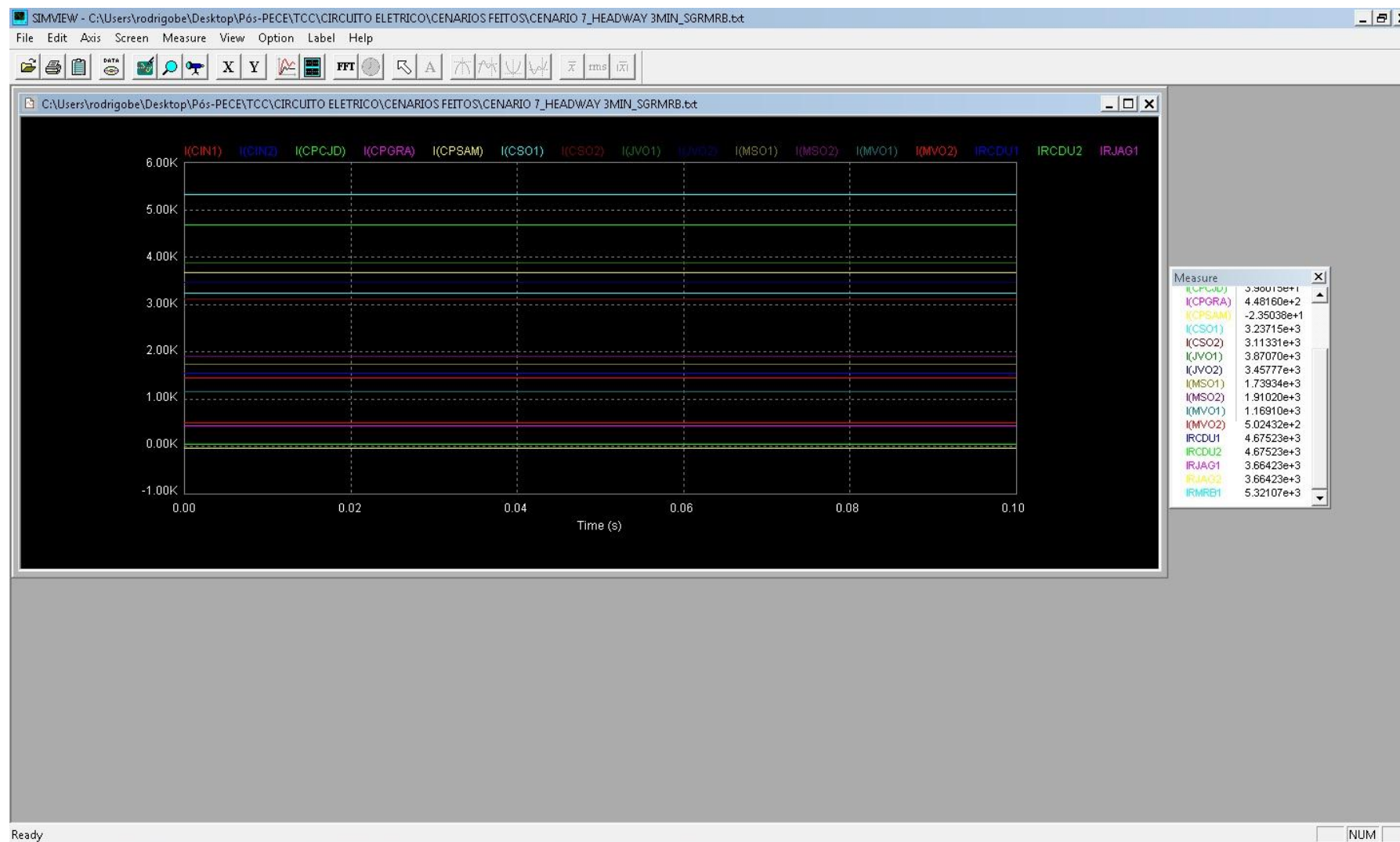


Figura 58 – Simulação, curvas e resultados do cenário 7

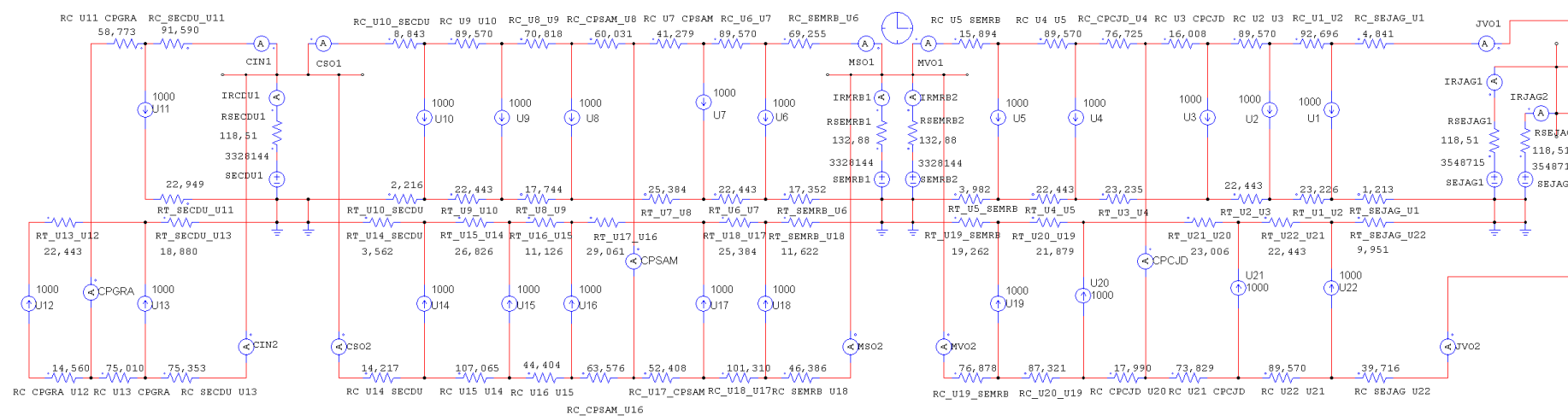


Figura 59 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 8

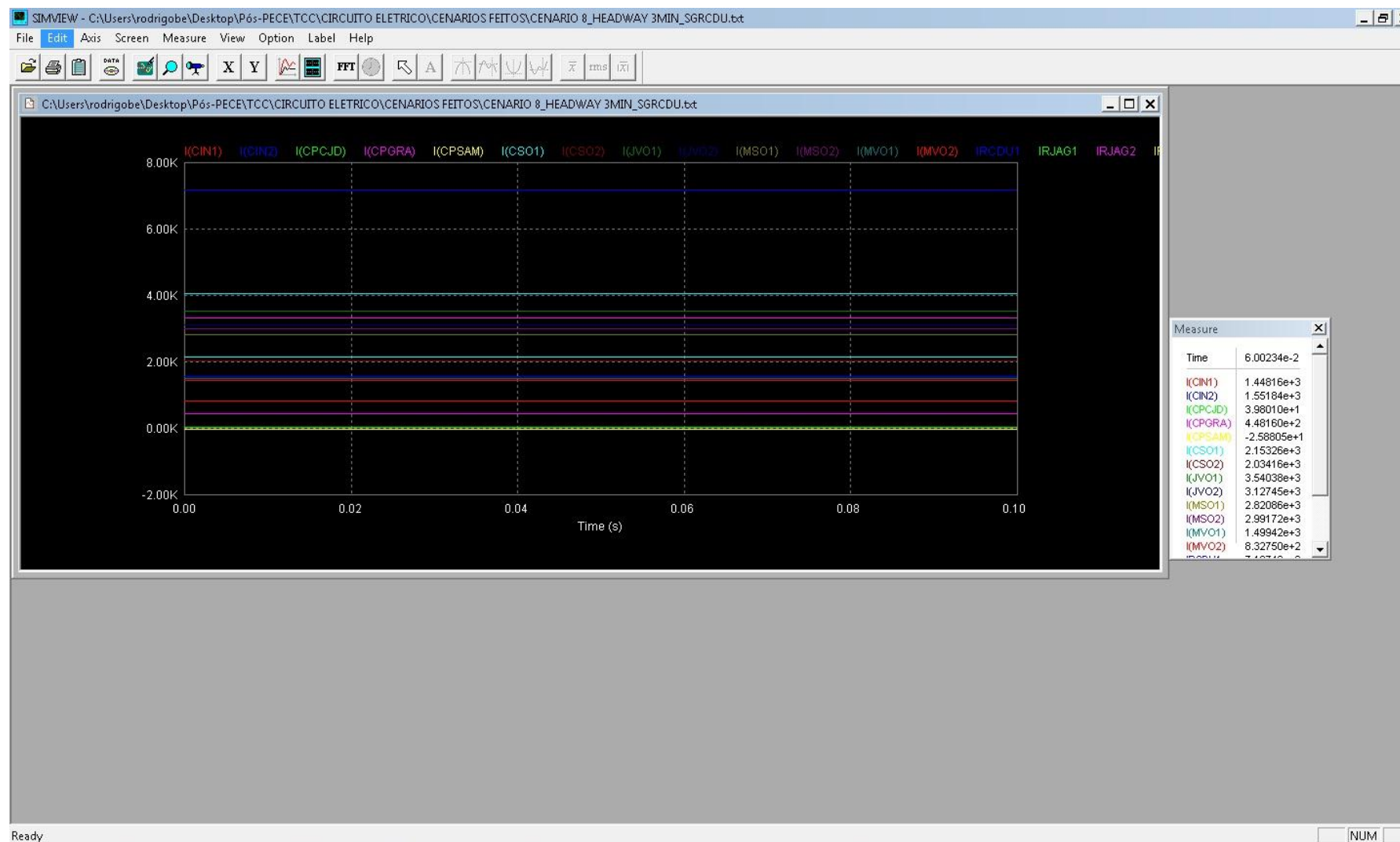


Figura 60 – Simulação, curvas e resultados do cenário 8

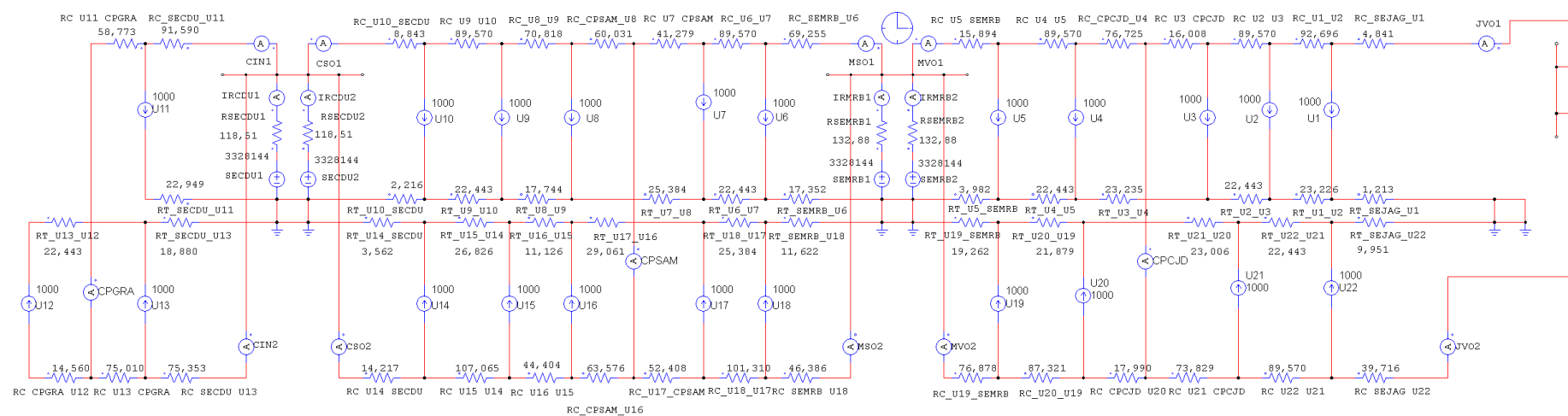


Figura 61 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 9

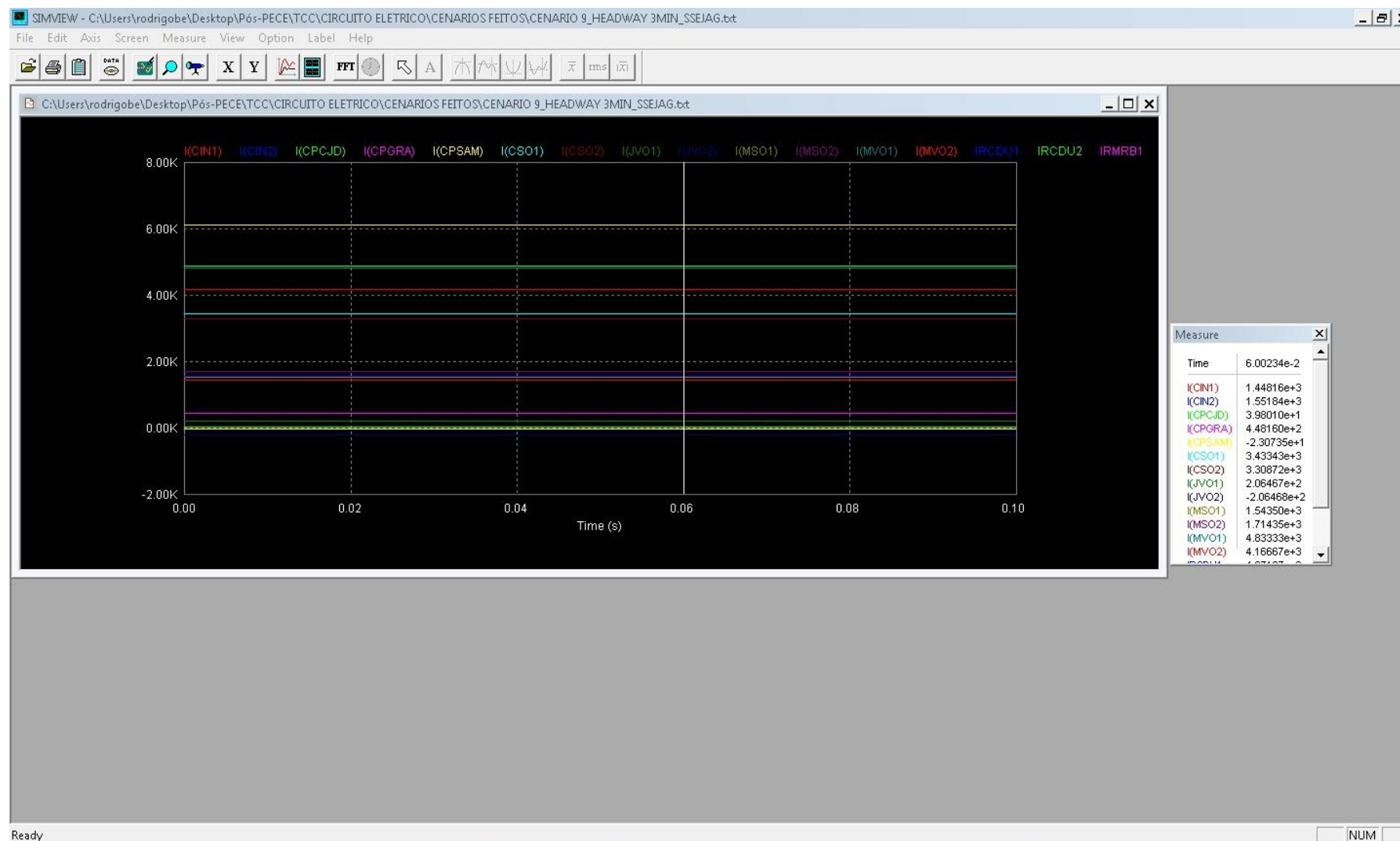


Figura 62 – Simulação, curvas e resultados do cenário 9

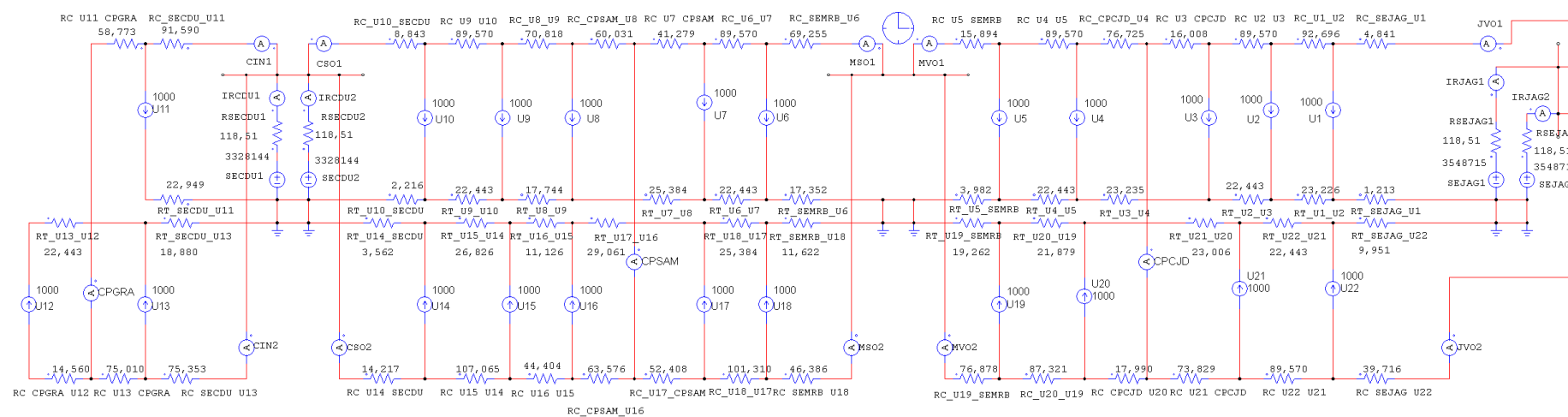


Figura 63 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 10

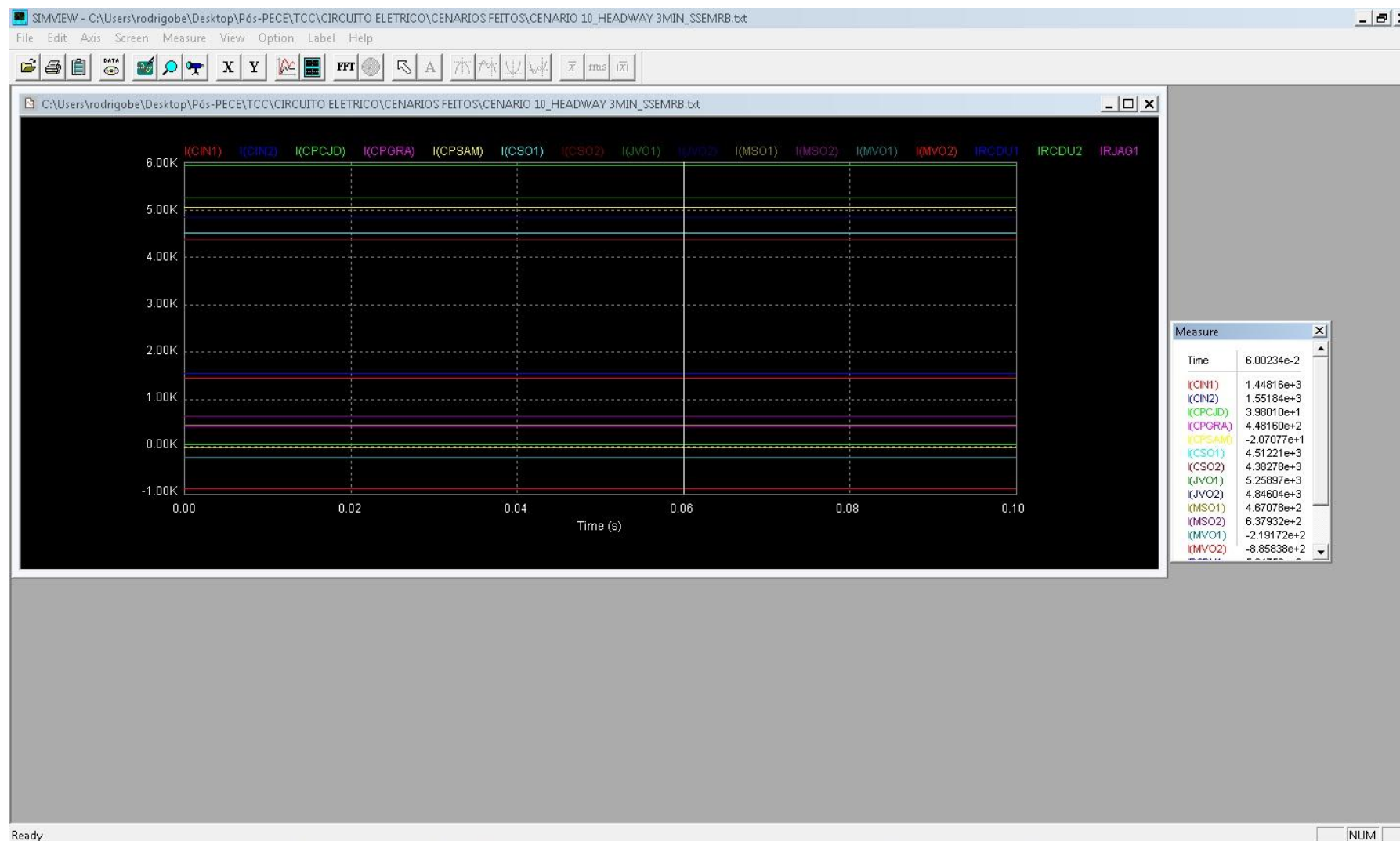


Figura 64 – Simulação, curvas e resultados do cenário 10

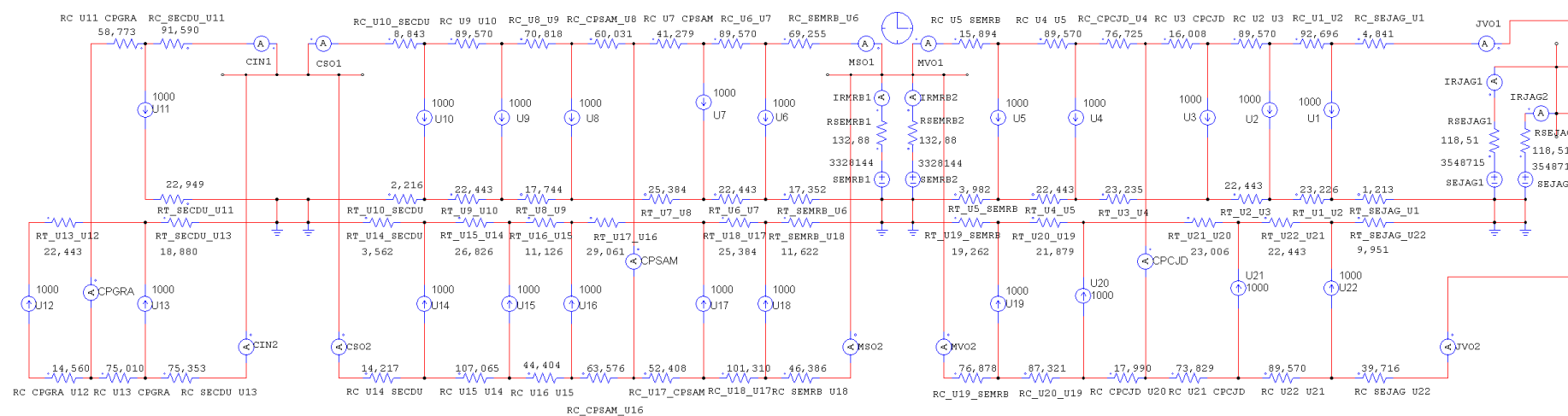


Figura 65 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 11

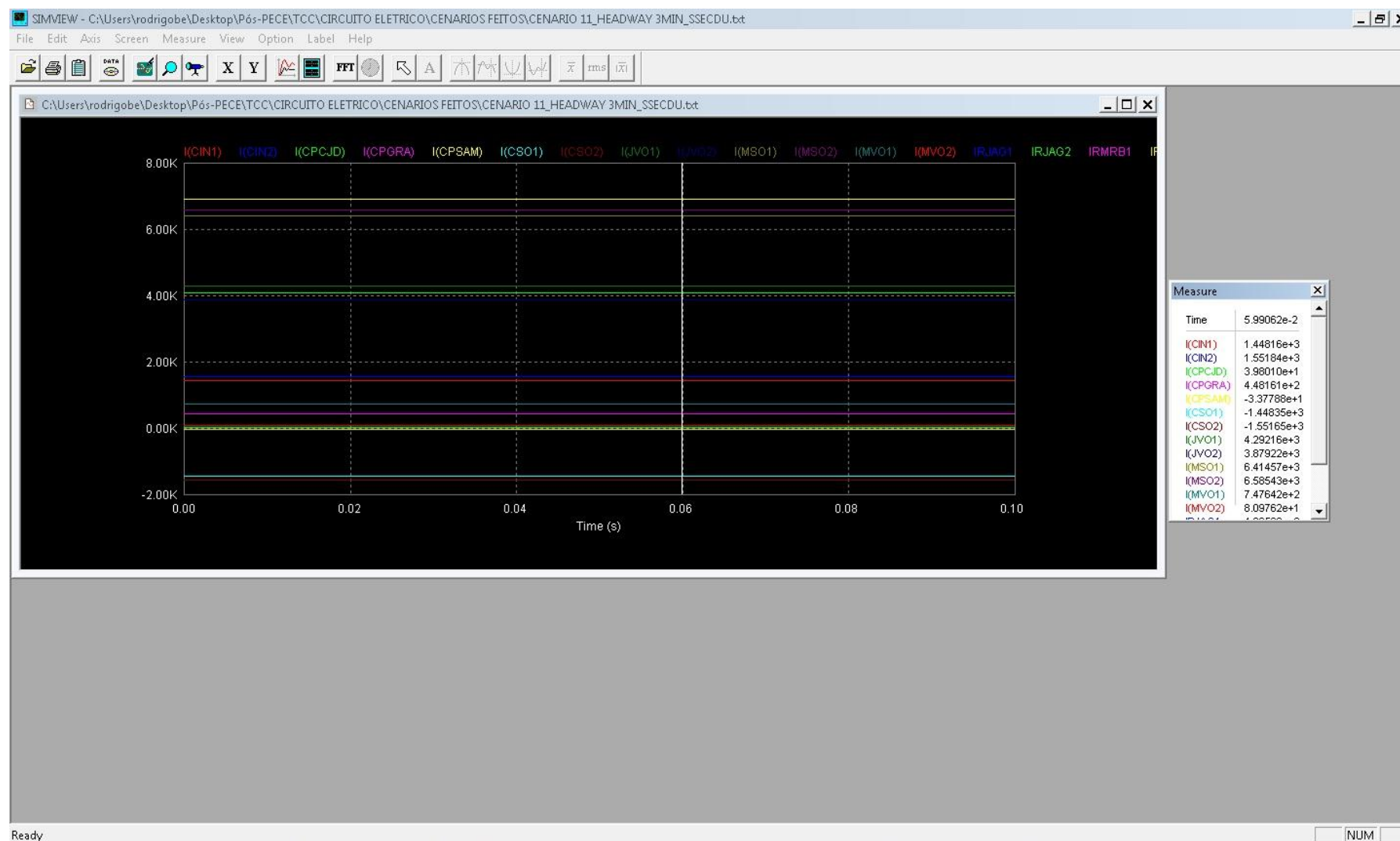


Figura 66 – Simulação, curvas e resultados do cenário 11

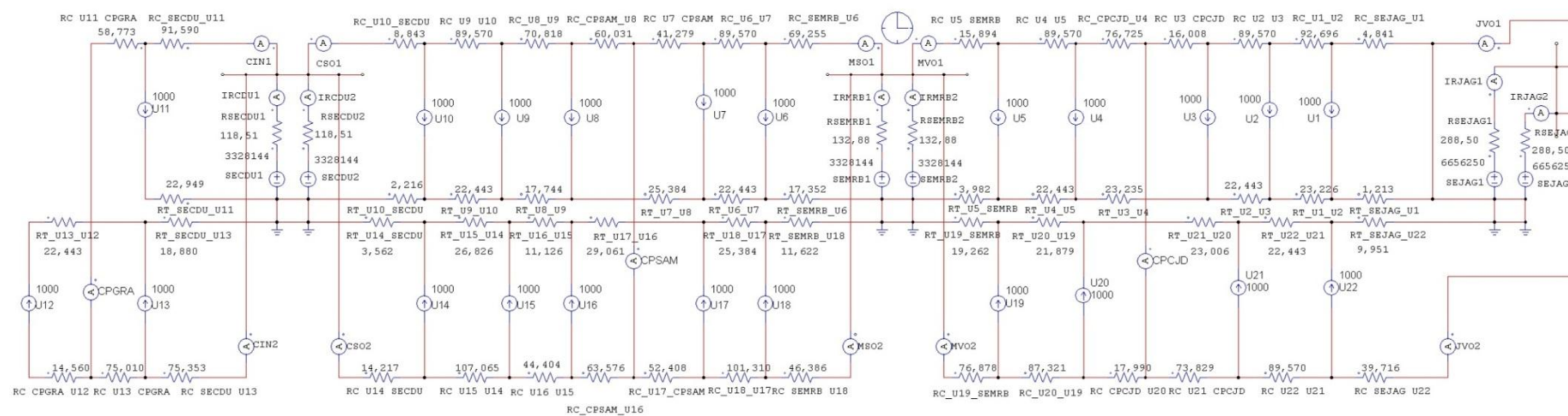


Figura 67 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 12

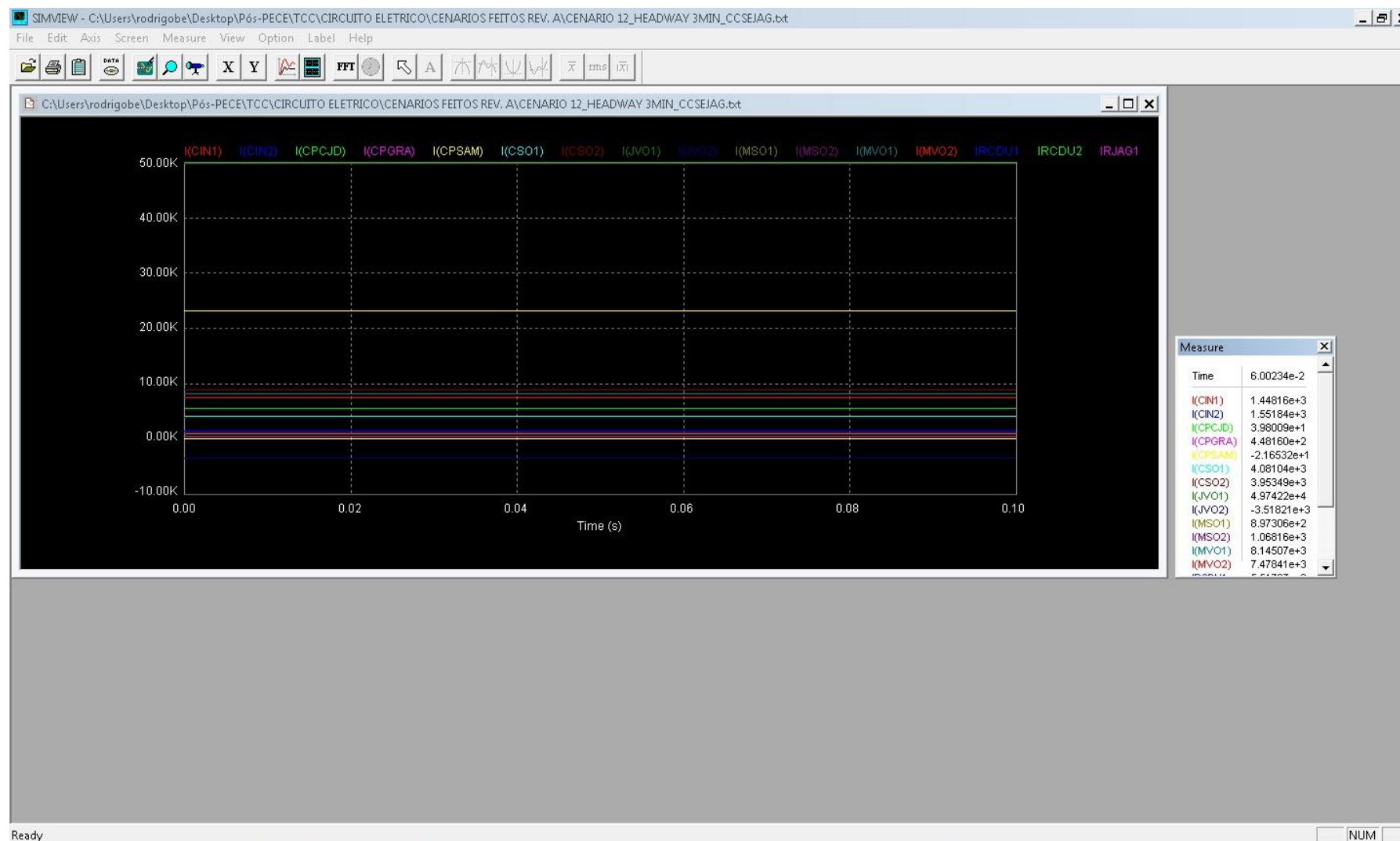


Figura 68 – Simulação, curvas e resultados do cenário 12

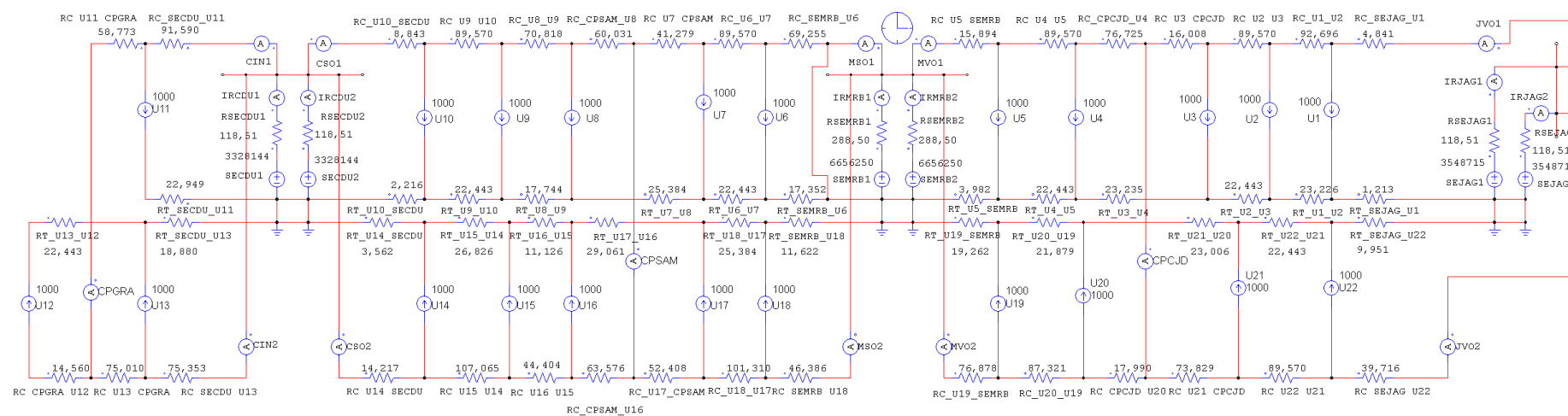


Figura 69 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 13

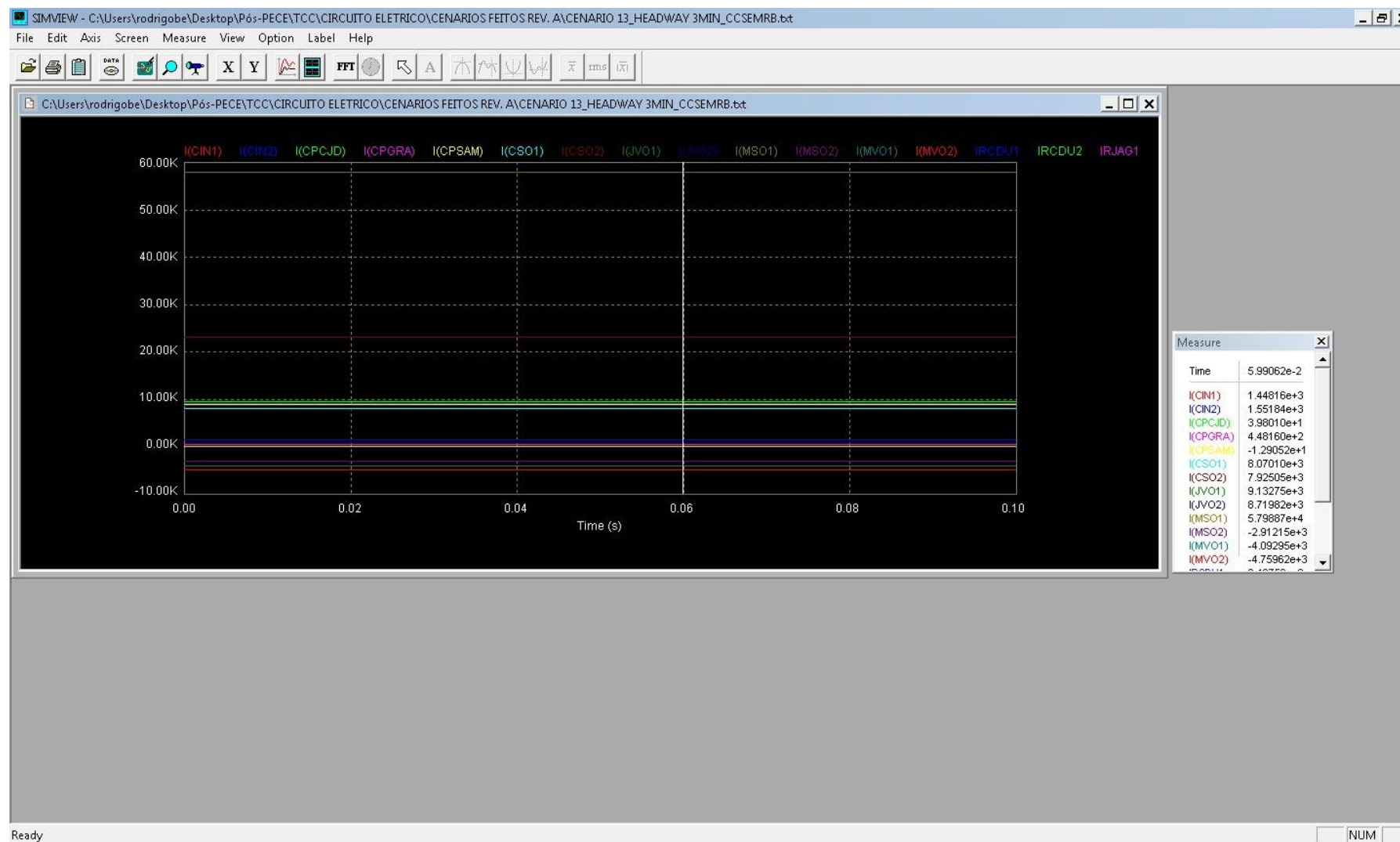


Figura 70 – Simulação, curvas e resultados do cenário 13

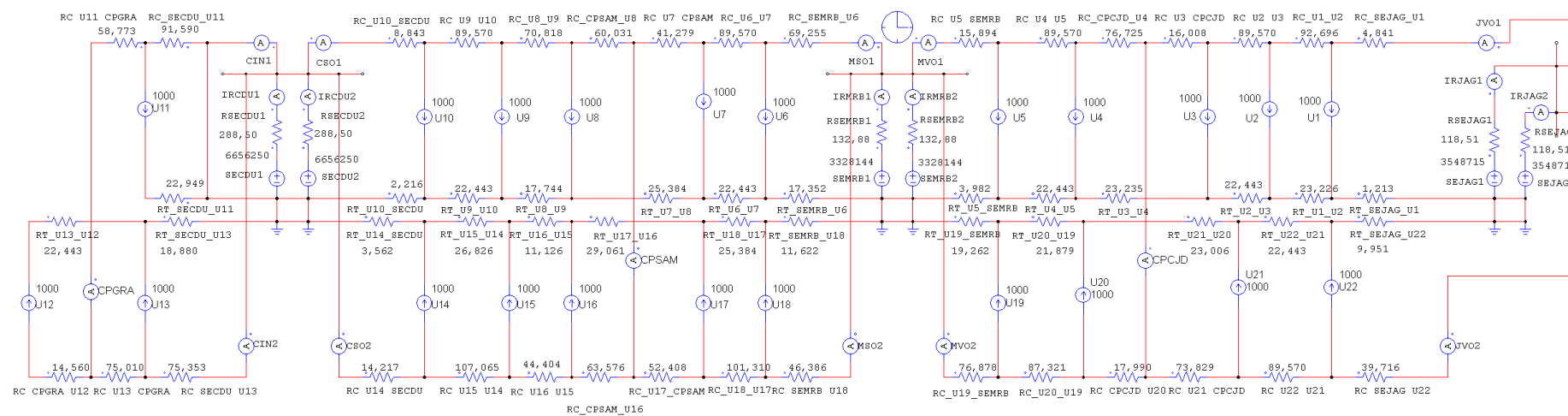


Figura 71 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 14

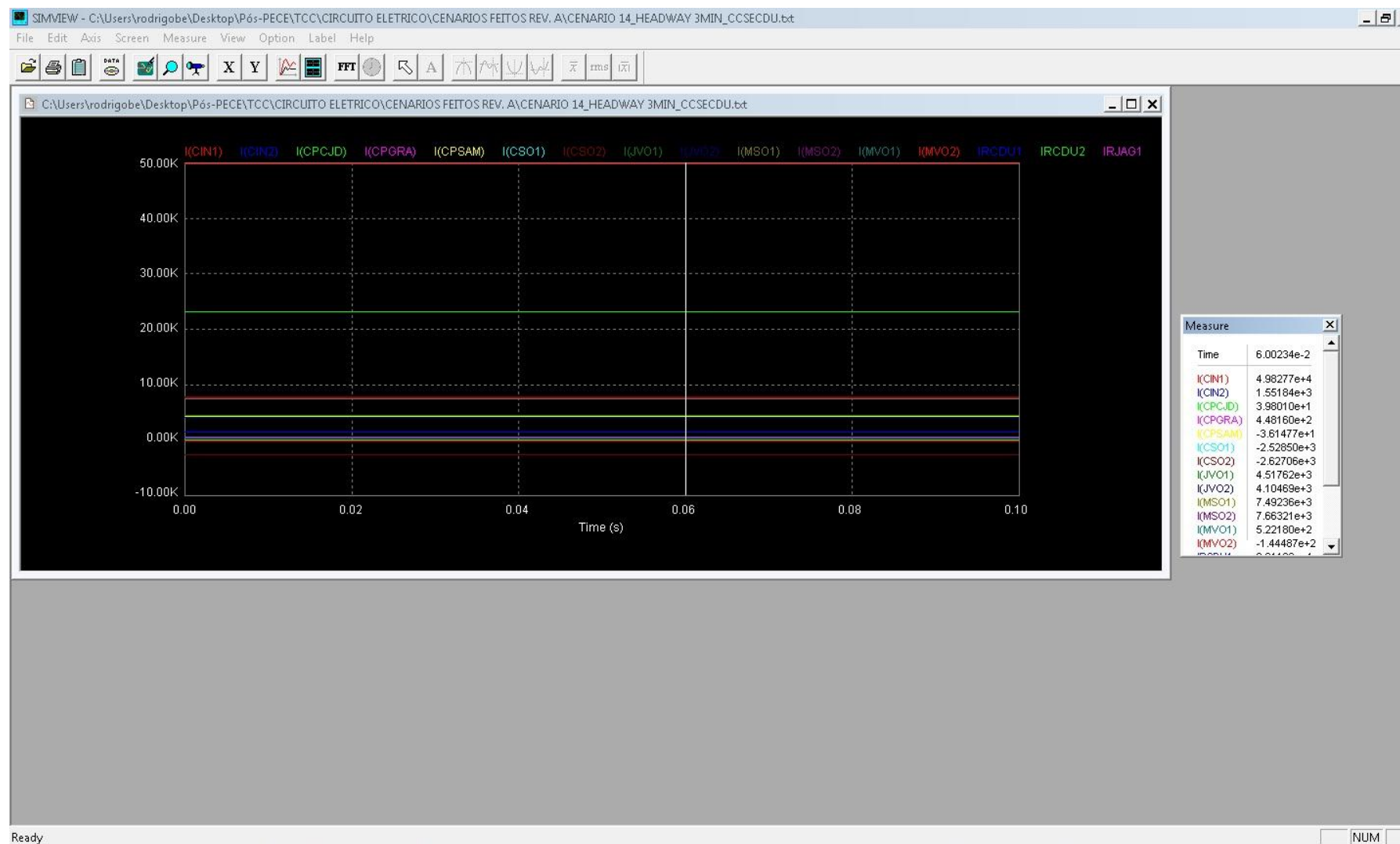
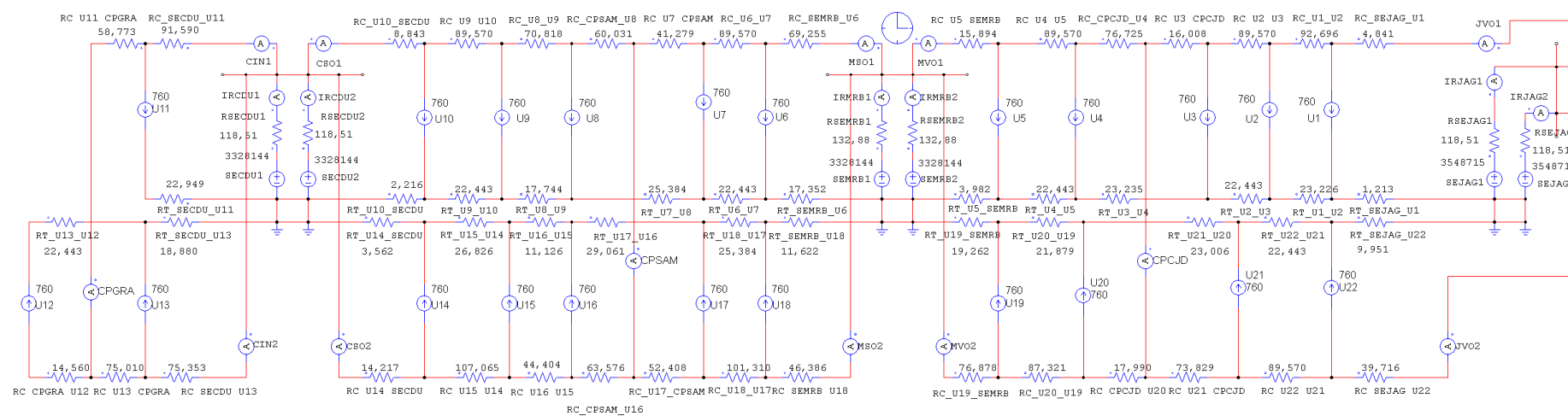


Figura 72 – Simulação, curvas e resultados do cenário 14



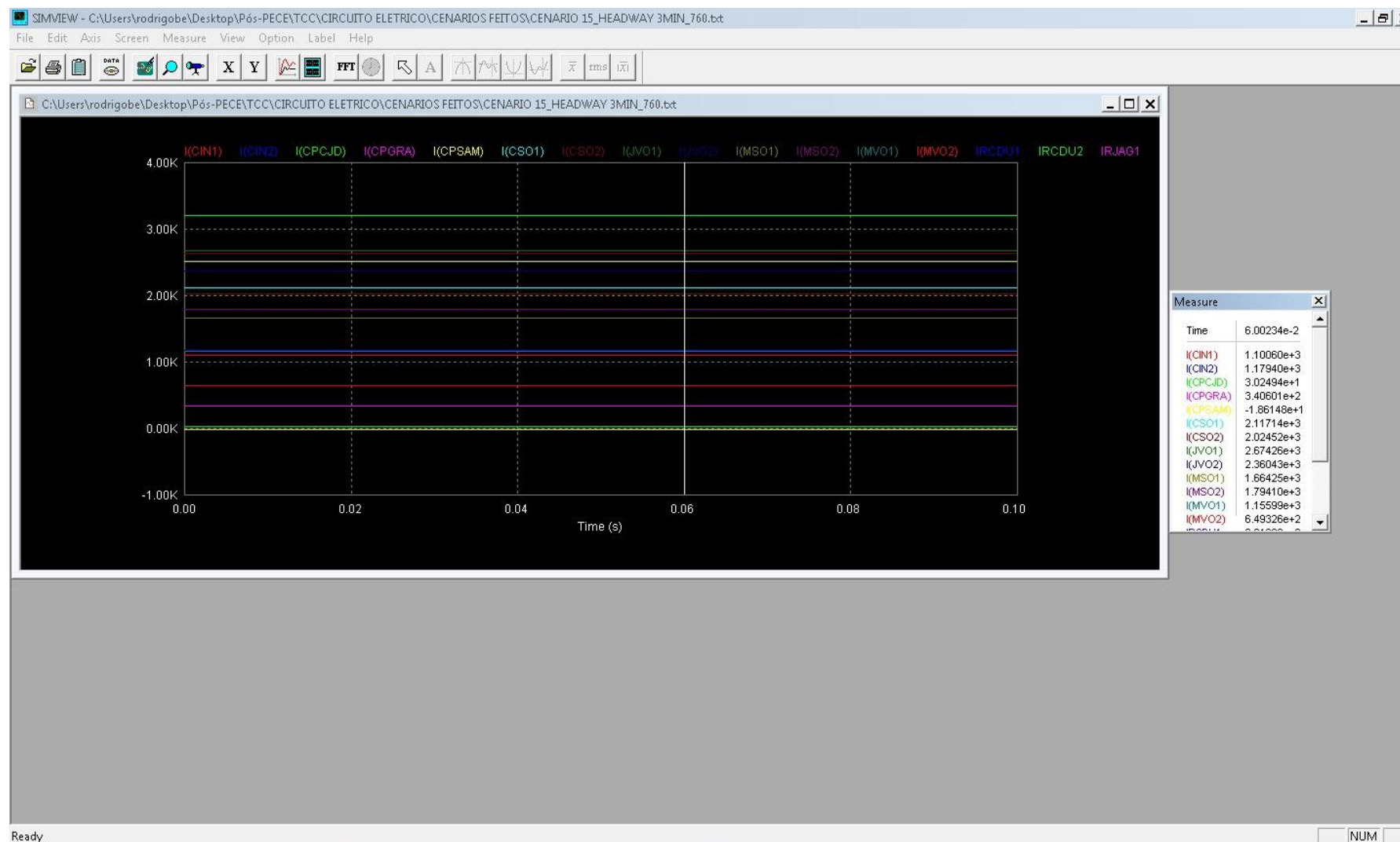


Figura 74 – Simulação, curvas e resultados do cenário 15

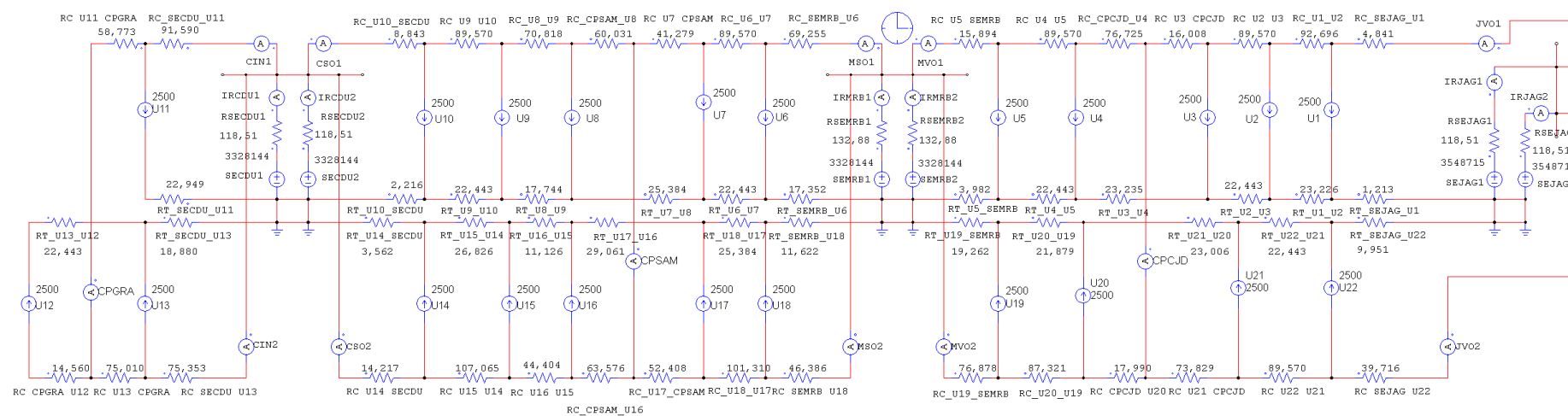


Figura 75 – Circuito elétrico equivalente – Cenário 16

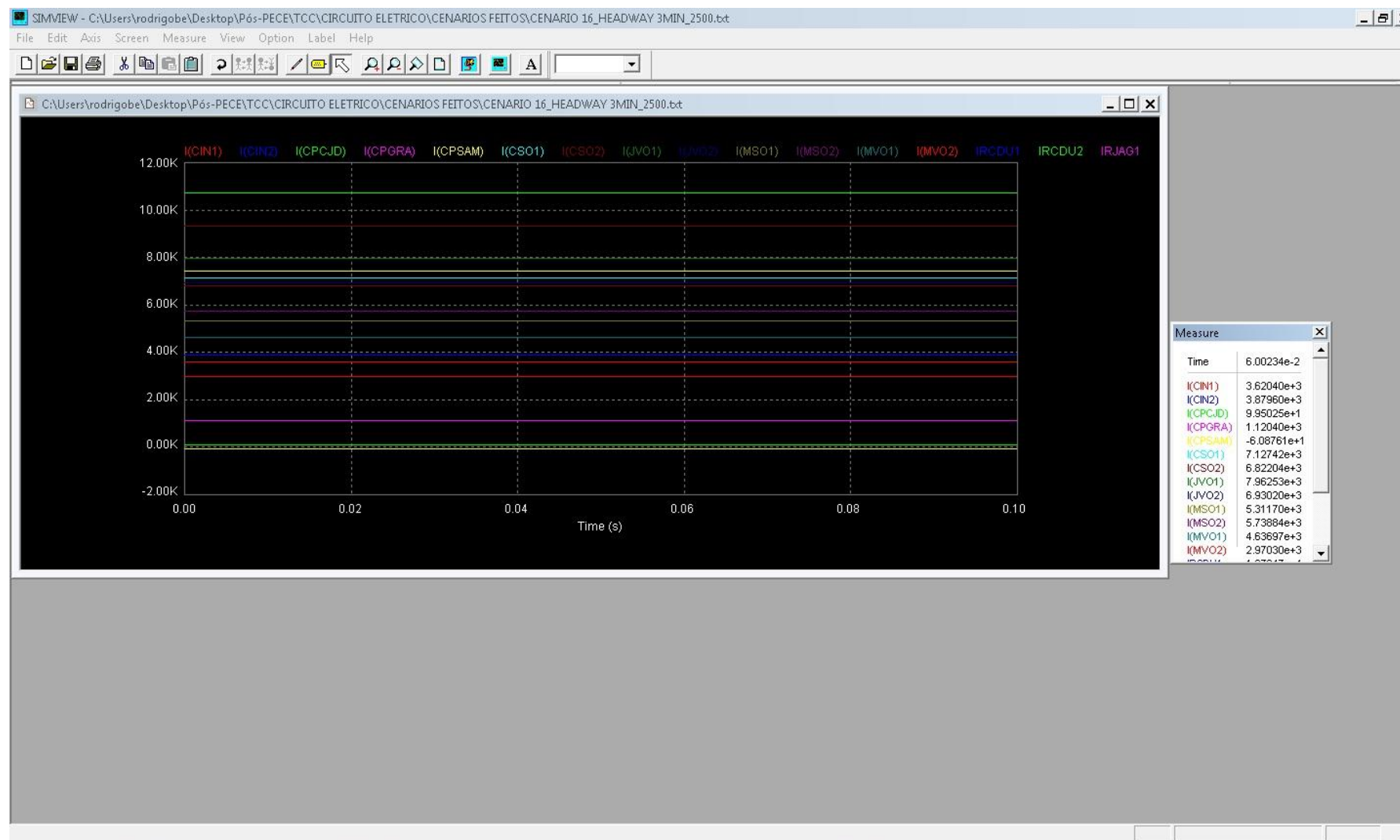


Figura 76 – Simulação, curvas e resultados do cenário 16

LISTA DE REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

BARTON, T. H. **Rectifiers, Cycloconverters, and AC Controllers**. Oxford: Oxford University Press, 1994. 687p.

CAI, Y.; IRVING, M. R.; CASE, S. H. **Modelling and numerical solution of multibranched DC rail traction power systems**. IEE Proceedings on Electric Power Applications, v. 142, n. 5, p. 323-328, September 1995.

CAI, Y.; IRVING, M. R.; CASE, S. H. **Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking**. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, v. 142, n. 5, p. 445-452, September 1995.

CARDOSO, A. C. **Contribuição ao Estudo da Eletrificação das Linhas da Companhia Paulista de Estradas de Ferro**. Jundiaí: 1922. 81p.

CARDOSO, J. R. **Estado da Arte do Aterramento de Sistemas Ferroviários**. São Paulo: Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, 2002. (Relatório Técnico, RT CPTM AK2961-8).

CASE, S. **So what's the problem? In: IEE Seminar on DC Traction Stray Current Control – "Offer a stray a good ohm?"**. London, 1999. Anais. London: IEE, 1999, p. 1/1-1/6.

DA SILVA, J. A. P. **Uma nova metodologia para a avaliação de sistemas de aterramento metroferroviários**. 1997. 71p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1997.

DE FILIPPI, J. A. **Método para a avaliação das correntes de fuga e tensões de toque entre trens e passageiros em redes de tração metro-ferroviárias em corrente contínua com o auxílio do software Electronics Workbench**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

FILIPOVIĆ, Ž. **Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung**. 3.ed. Heidelberg: Springer, 1995. 277p.

GOODMAN, C. J.; MELLITT, B.; RAMBUKWELLA, N. B. **CAE for the electrical design of urban rail transit systems.** In: **International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit System.** Frankfurt: Computational Mechanics Institute, 1987. p. 173-193.

GOODMAN, C. J.; SIU, L. K. **DC Railway Power Network Solutions by Diakoptics.** In: **IEEE/ASME Joint Railroad Conference.** Chicago: Anais. Chicago: IEEE, 1994. p. 103-110.

HOFMAN, G.; KONTCHA, A.; ROHLIG, S. **ELBAS-SINANET - Simulation System for d. c. Railways of LRT and Long Distance Transport – Integrated Traction Simulation and Network Calculation Software.** ELBASTOOLS, no 1, 2001.

KOMATSU, W.; JUNIOR, L. M.; KAISER, W. **Notas de Aula – PEA-2487 Eletrônica de Potência I.** São Paulo, 2010. 155p. Versão 0.99.

LANDER, C. W. **Power Electronics.** 2.ed. Maidenhead: McGraw-Hill, 1987. 415p.

LAUDANNA, A. H. **Conservação de energia: regeneração ou cogeração.** **Engenharia** – Revista do Instituto de Engenharia, n. 536, p. 105-112, 1999.

PIRES, C. L. **Simulação do Sistema de Tração Elétrica Metroferroviária.** 2006. 453p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1986.

POZZOBON, P. **Transient and Steady-State Short-Circuit Currents in Rectifiers for DC Traction Supply.** IEEE Transactions on Vehicular Technology, v. 46, n. 4, p. 1-15, November 1998.

RAMBUKWELLA, N. B. et al. **Traction equipment modelling and the power network solution for DC supplied rapid transit system studies.** In: **International Conference on Electric Railway Systems for a New Century,** London, 1987. Anais. London: IEE, 1987. p. 218-224.

STEPHAN, A. **OpenPowerNet –simulation of railway power supply systems**. In: **Computers in Railways XI - Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems**. WIT Transactions on The Built Environment. United Kingdom, 2008.

TERANISHI, M. R. **Manutenção da Rede Aérea**. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo 2008. 112p.

TESSIER, M. **Traction électrique et thermo-électrique**. Paris: Éditions Scientifiques Riber, 1978. 585p.

TOLEDO, E. D. et al. **Tração elétrica**. 1.ed. São Paulo: Nobel, 1988. v.2. 309p.

TSE, C. T. et al. **Tracking techniques for DC traction loadflow**. In: International Conference on Developments in Mass Transit Systems, London, 1998. Anais. London: IEE, 1998. p. 286-290.