



AEAMESP



**Autores:**

**Vito Labate Neto**

**Emmanuel Luis Anselmo Joanitti**

**Onisley Oliveira Pinto**



AEAMESP



## **21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROVIÁRIA**

### **PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

#### **CATEGORIA 3**

**TÍTULO: “EXPANSÃO DO METRÔ DO DISTRITO FEDERAL – ADEQUAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ÀS EXTENSÕES DA LINHA E À REDUÇÃO DO *HEADWAY*”**



AEAMESP



## 1 Introdução

A Companhia do Metropolitano do Distrito Federal passa atualmente por um processo de expansão e modernização do sistema existente. Assim, foram realizados estudos técnicos na área do Sistema de Energia visando a subsidiar a elaboração dos Projetos Básicos a serem utilizados futuramente na execução deste empreendimento.

Dentre as ações tomadas durante o período de elaboração do Projeto Básico do Sistema de Energia, destacamos àquelas que têm relação direta com o desenvolvimento deste trabalho:

- Extensão da linha existente para Asa Norte, Samambaia e Ceilândia, num total de aproximadamente 6,3 km de linha;
- Redução do *headway* no Plano Piloto, entre as estações GTB e Asa Sul, de forma a aumentar a oferta de transporte na região de maior demanda de passageiros.

A implantação dessas medidas resultará em aumento significativo da carga do sistema de alimentação elétrica. Consequentemente, impôs-se a necessidade de verificar a sua capacidade para o atendimento dessas novas condições operacionais e de serem projetadas as reformas e adequações eventualmente requeridas.

Os principais reflexos das novas condições operacionais sobre o carregamento elétrico, tanto sobre o sistema de tração como sobre o de distribuição em média tensão, foram:

- Aumento da carga de tração devido aos seguintes fatores:
  - Redução do *headway* no trecho central e acréscimo das extensões da linha;
  - e
  - Aumento da carga de serviços auxiliares do trem devida à introdução do ar condicionado.

- Novas estações de passageiros nas Extensões, com o acréscimo das cargas de serviços auxiliares das suas subestações;

Foram feitas simulações para as novas condições de carregamento abrangendo:

- As simulações de marcha, grade horária e elétrica do sistema de tração; e
- As simulações de fluxo de carga do sistema de distribuição em média tensão

A partir dos resultados obtidos, foram feitos os estudos complementares para a definição das medidas de adequação requeridas: no caso da tração foram consideradas a introdução de novas subestações retificadoras ao longo da linha e o eventual reforço da capacidade do terceiro trilho em alguns trechos; no caso do sistema de distribuição em média tensão, a previsão de novos alimentadores e o reforço de alguns dos alimentadores existentes.

Neste trabalho abordaremos em particular os estudos e simulações referentes ao sistema de tração elétrica, ainda que seja apresentada uma descrição do sistema de alimentação elétrica como um todo.

Deve ser ressaltada a importância da realização de simulações para o estudo de um sistema de alimentação elétrica, pois possibilitam a avaliação de diversas possibilidades e configurações bem como a adoção das melhores soluções do ponto de vista técnico e econômico.

## **2 O Sistema de Transporte do Metrô do Distrito Federal**

### **2.1 Descrição Geral**

O sistema de Metrô em Brasília é operado pela estatal Companhia do Metropolitano do Distrito Federal e atualmente transporta cerca de 160 mil usuário por dia, que entram por meio das 24 Estações de Passageiros nas Linhas Verde e Laranja.



AEAMESP



Quanto à malha metroviária, o Metrô-DF tem cerca de 42 km de extensão em via dupla, sendo atualmente a quarta maior do país – atrás apenas dos sistemas metroviários de São Paulo (79 km), Recife (71 km) e Porto Alegre (43,4 km).

As linhas Verde e Laranja compartilham um trecho inicial de 19,19 km - entre as estações Central (localizada na Rodoviária do Plano Piloto em Brasília) e Águas Claras - e depois se bifurcam, em forma da letra “Y”. O primeiro ramal de 14,31 km compreende parte de Águas Claras, percorrendo Taguatinga Centro e Taguatinga Norte, e chega até o Terminal Ceilândia. O segundo ramal, de 8,8 km, passa por Taguatinga Sul e chega até o Terminal Samambaia.

## 2.2 Configuração em “Y”

O traçado das Linhas Verde e Laranja delimita um esquema operacional de entroncamento e bifurcação em linha única. Historicamente, em todos os sistemas metroviários, a operação de linha em formato de “Y” decorreu da implantação inicial de um sistema metroviário mais simples, ou seja, uma malha não bifurcada. Com o passar dos anos, a ampliação da extensão da via operacional, agregada ao aumento do carregamento, tornaram as estratégias operacionais inócuas para atender, igualmente e com mesmo padrão, a um dos ramais do sistema em “Y”. Além disso, ao se tentar privilegiar um dos ramais, sempre o de maior demanda, gerava-se uma saturação no trecho imediatamente anterior à bifurcação da linha, antes mesmo do início do tronco, como já observado também na Linha 13 do Metrô de Paris.

Imediatamente a seguir, a próxima etapa para a operação eficiente de um carrossel único em “Y” seria aumentar a oferta de material rodante, ou seja, a densidade de trens em operação, e, concomitantemente, modernizar os sistemas de energia, sinalização, controle e telecomunicações, como planejado e implantado Linha 13 da capital francesa. Por outro



AEAMESP



lado, a operação segregada de um dos ramais do “Y”, alternativa também testada pelo operador da Linha 13 de Paris, requereria, além da modernização dos sistemas fixos, adequações na via permanente e reformas nas estações para a sua operacionalização inicial.

Mesmo assim, tais melhorias são limitadas em seus alcances, principalmente nos casos em que o sistema em “Y” cresce a partir de prolongamentos da linha existente, e não com a implantação de nova linha operacional que constitua rota alternativa para um mesmo destino. É o que ocorreu com o crescimento do Metrô de Lisboa desde a sua inauguração, em 1959, até 1995 e, mais recentemente, com a Linha 13 e o Metrô RIO. Hoje, o Metrô-DF já opera os trens com taxas de ocupação similares às do Metrô-SP no horário do pico da manhã, em virtude, principalmente, dos embarques efetuados nas estações do trecho Ceilândia até a Praça do Relógio, o que limita, portanto, a funcionalidade dos sistemas em face da configuração implantada.

Diante disso, o Metrô-DF fez a contratação de uma empresa especializada para realizar os estudos técnicos que subsidiem a formulação de alternativa para a operação do sistema com configuração de linha única em “Y” e para a operação de mais de uma linha sem dependência do carrossel em “Y”, conforme delimitações abaixo:

- Estudos de Demanda e Carregamento com “Y”;
- Estudo de Demanda e Carregamento sem “Y”; e
- Revisão do Projeto Funcional – Operacional.

A contratação da revisão do Projeto Funcional – Operacional teve como objetivo modelar, simular e sintetizar os requisitos necessários aos componentes dos sistemas e estabelecer as estratégias adequadas à operação, de forma que os componentes dos sistemas móveis e os componentes estáticos (Estações de Passageiros, Sistemas Fixos e Via Permanente)

suportassem as seguintes ofertas de carregamento na hora-pico para cada meta, conforme a evolução abaixo discriminada:

- Meta 1: 220 mil usuário/dia;
- Meta 2: 240 mil usuário/dia;
- Meta 3: 320 mil usuário/dia; e
- Meta 4: 400-440 mil usuário/dia.

A parametrização de cenários de carregamento em função da Expansão utilizou, fundamentalmente, os sistemas e os subsistemas novos (Expansão) e os existentes, de forma a compatibilizá-los, sem deixar de maximizar a capacidade de uso da infraestrutura instalada, seja através de adequações (Meta 1), de adaptações (Meta 2), de reformas (Meta 3) e de modernizações (Metas 1, 2, 3 e 4). Sendo assim, torna-se evidente que as metas anteriormente fixadas derivam de possíveis cenários, que incorporam o aumento da oferta de transporte metroviário previsto no Plano Diretor de Transporte Urbano do Distrito Federal – PDTU-DF (2010): complementação da rede atual - término das obras de 05 (cinco) estações de passageiros e a ampliação de Ceilândia, de Samambaia e da Asa Norte.

Paralelo a isso tudo, a Contratada deveria elaborar, após a revisão do Projeto Funcional-Operacional, os projetos de modernização de sistemas, juntamente com a expansão da linhas Verde e Laranja do Metrô-DF, de forma a atender as metas de ofertas apontadas pelo PDTU-DF.

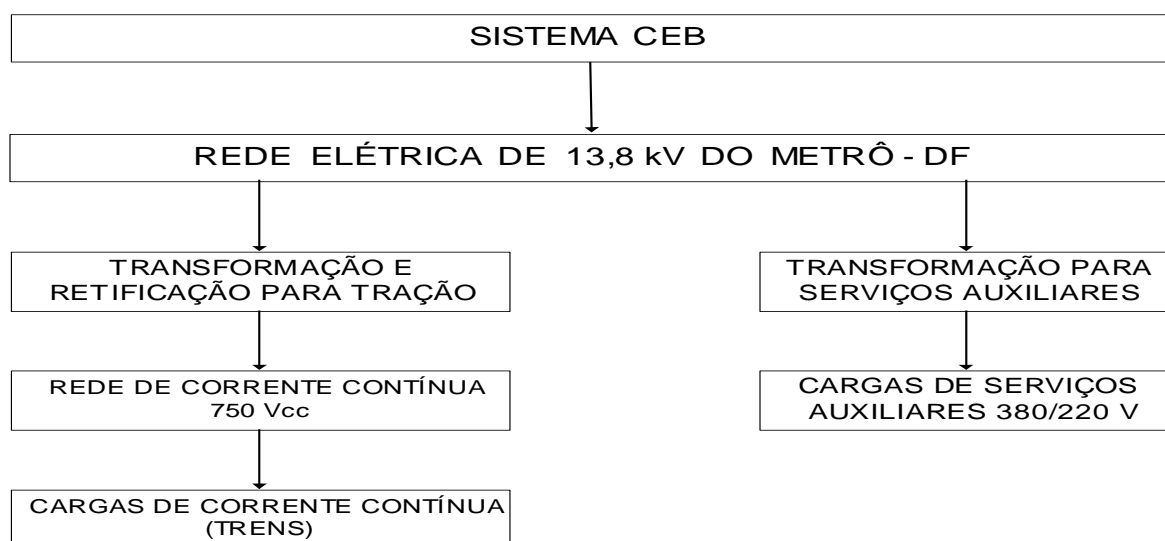
### **3 Descrição Geral do Sistema de Alimentação Elétrica**

A função básica do Sistema de Energia da Companhia do Metropolitano do Distrito Federal é atender, com confiabilidade, as cargas elétricas da própria Companhia.

Hoje existem basicamente dois tipos de carga atendidas pelo Sistema de Energia da Companhia:

- Carga de Tração, em 750 Vcc, para os TUEs da série 1000 e 2000; e
- Carga das Estações de Passageiros e do Túnel (no trecho do Plano Piloto), em 380 Vca, para os Serviços Auxiliares em Geral.

O diagrama de bloco abaixo apresenta uma visão geral atual do Sistema de Energia do Metrô-DF, desde a fonte primária, subestação da CEB, até as cargas finais da Companhia.



*Figura A – Diagrama de Blocos do Sistema de Energia*

Esse diagrama de bloco refere-se tanto ao trecho existente quanto àqueles que serão expandidos.

O Sistema de Energia da Companhia existente foi projetado em 1992 de forma a possuir a máxima confiabilidade, assegurando uma operação contínua e sem interrupções de alimentação elétrica das cargas. Junto ao projeto da expansão dos três trechos será feita também a modernização do sistema de proteção elétrica das dezesseis Subestações





AEAMESP



Retificadoras (trecho operacional) e da Subestação de Manutenção (implantada no Pátio Águas Claras).

No projeto de 1992, a configuração do Sistema de Energia e os próprios equipamentos das Subestações Retificadoras apresentavam redundâncias entre si ou possuíam opções de alimentação alternativa através da execução de manobras, executadas de forma remota pelos controladores do Centro de Controle Operacional ou localmente pelos Técnicos de Manutenção – TMs. Com o aumento da carga tração devido a redução do *headway* existente, as redundâncias nas próprias Subestações Retificadoras deixarão de existir, porém, a possibilidade de manobras continuará existindo.

No trecho existente e nas expansões, a alimentação elétrica do Sistema de Energia do Metrô-DF será feita diretamente dos barramentos de 13,8 kV da Companhia Energética da CEB.

Já o Sistema de Energia da Expansão foi projetado em 2014 e 2015 de forma a possuir também uma confiabilidade alta, assegurando uma operação contínua e sem interrupções de alimentação elétrica das cargas, porém, com uma configuração diferente de interligação entre as Subestações Elétricas da CEB e as Subestações Retificadoras do Metrô-DF.

De uma forma simples, apresenta-se abaixo um esquemático do traçado existente do Metrô-DF com as posições das Subestações Retificadoras desta Companhia e das Subestações Elétricas da CEB.

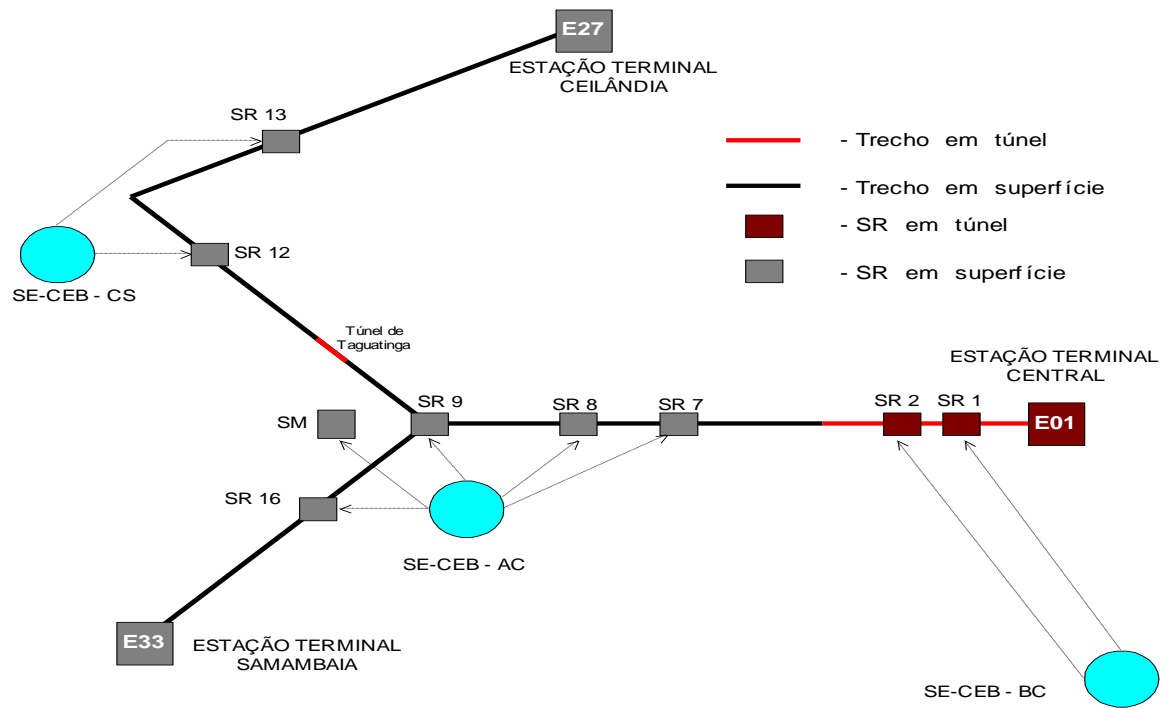


Figura B – Esquemático do Traçado Existente do Metrô-DF com localização das Subestações Elétricas da CEB e as Subestações Retificadoras do Metrô-DF

Em seguida, apresenta-se o esquemático do traçado existente junto com a expansão do Metrô-DF, também com as posições das Subestações Retificadoras desta Companhia e das Subestações Elétricas da CEB.

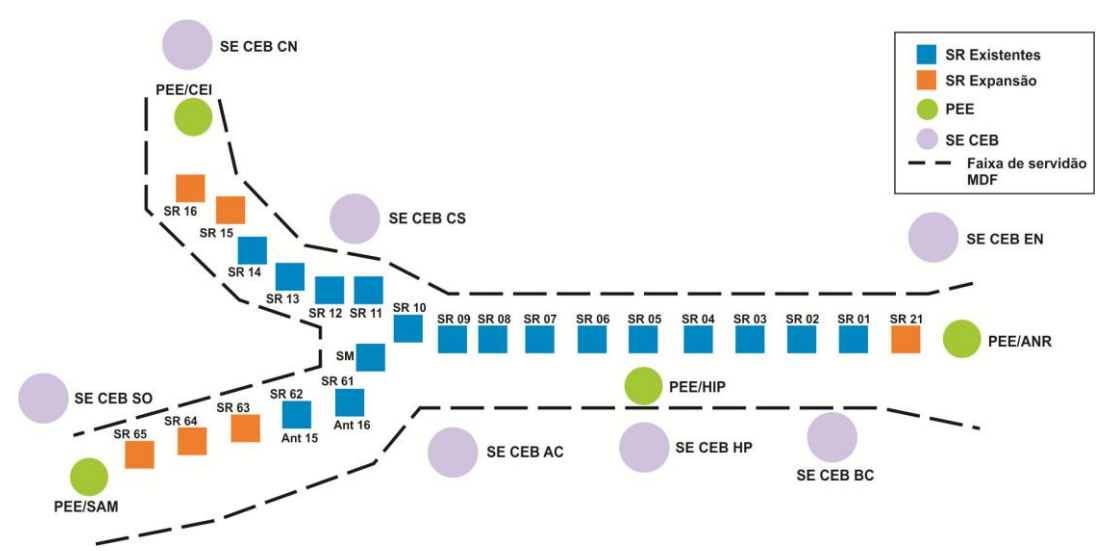


Figura C – Esquemático do Traçado Futuro do Metrô-DF com localização das Subestações Elétricas da CEB e as Subestações Retificadoras do Metrô-DF

A alimentação das Subestações Retificadoras existentes vem através de circuitos exclusivos, derivados diretamente dos barramentos de 13,8 kV dos painéis de 15 kV das Subestações Elétricas da CEB, conforme pode ser visto no diagrama abaixo:

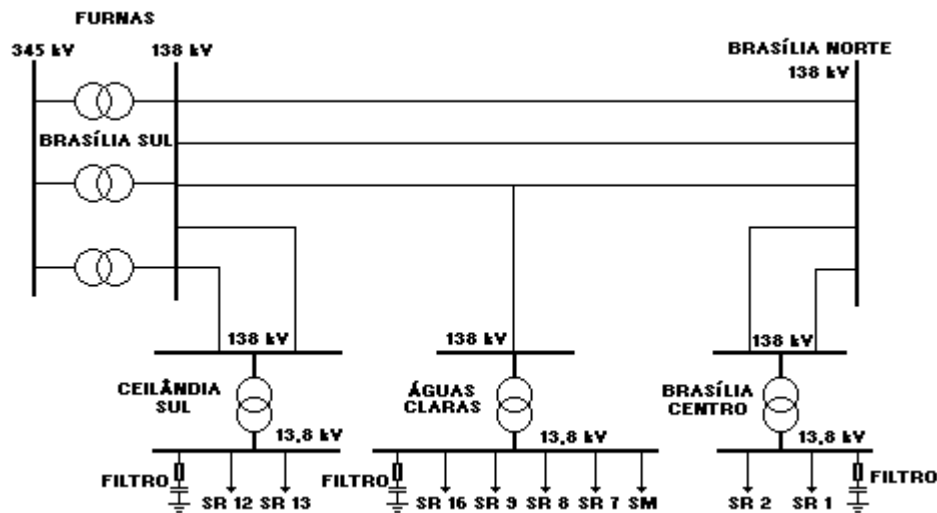


Figura D – Diagrama Unifilar de Alimentação Primária do Trecho existente

As medições de energia da CEB, no trecho existente, ficam nos próprios cubículos de 15 kV das três Subestações Elétricas da CEB apresentada acima, totalizando nove pontos de medições.

Já a alimentação das Subestações Retificadoras futuras, ou seja, nos trechos da expansão do sistema, também terá circuitos exclusivos, derivados diretamente dos barramento de 13,8 kV dos painéis de 15 kV das Subestações Elétricas da CEB, porém, oriunda de pontos diferentes daqueles existentes.

As medições de energia da CEB, nos trechos da expansão, ficarão no Painel de Entrada de Energia – PEE, dentro da área interna do Metrô-DF. No total serão três pontos: Ceilândia; Samambaia; e Asa Norte. Um quarto ponto a ser inserido será o ponto de medição da Hípica.

Já a rede de alimentação em 13,8 kV existente do Sistema de Energia do Metrô-DF é constituída pela a interligação entre os barramentos de 13,8 kV das Subestações Elétricas da CEB e barramentos de 13,8 kV das dezessete Subestações Retificadoras do Metrô-DF e destas às Subestações Auxiliares, que atendem as Estações de Passageiros e outras cargas elétricas, principalmente no túnel.

O diagrama unifilar da Rede de Alimentação Elétrica abaixo apresenta as interligações entre Subestações Elétricas da CEB e as Subestações Retificadoras do Metrô-DF para o trecho existente:

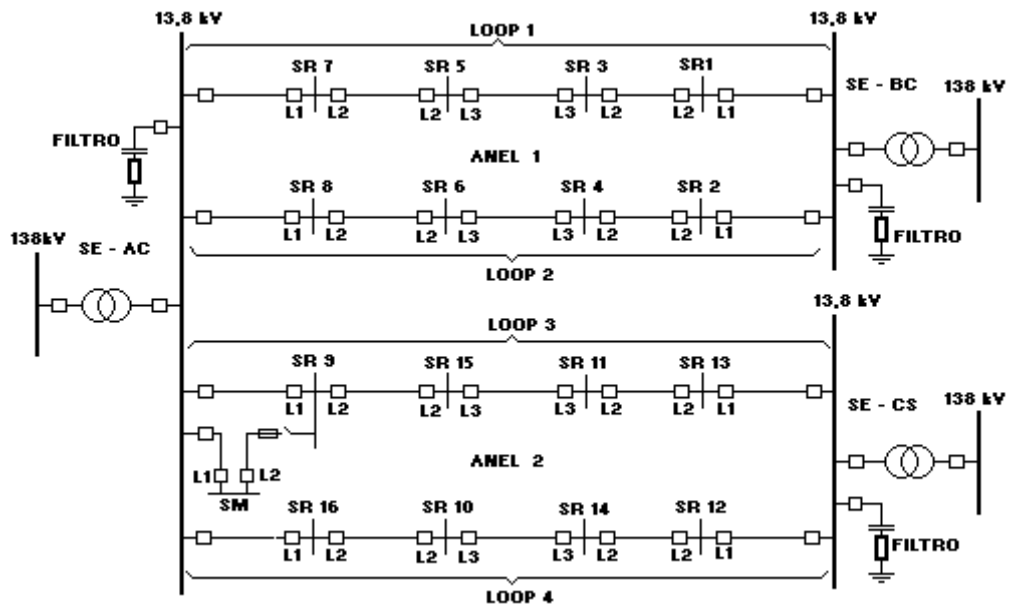


Figura E – Diagrama Unifilar da Rede de Alimentação em 13, 8 kV

De forma complementar, segue abaixo o diagrama unifilar da Rede de Alimentação em 13,8 kV com os circuitos também em 13,8 kV das Subestações Auxiliares. As letras acima das linhas do diagrama unifilar representam a codificação dos circuitos.

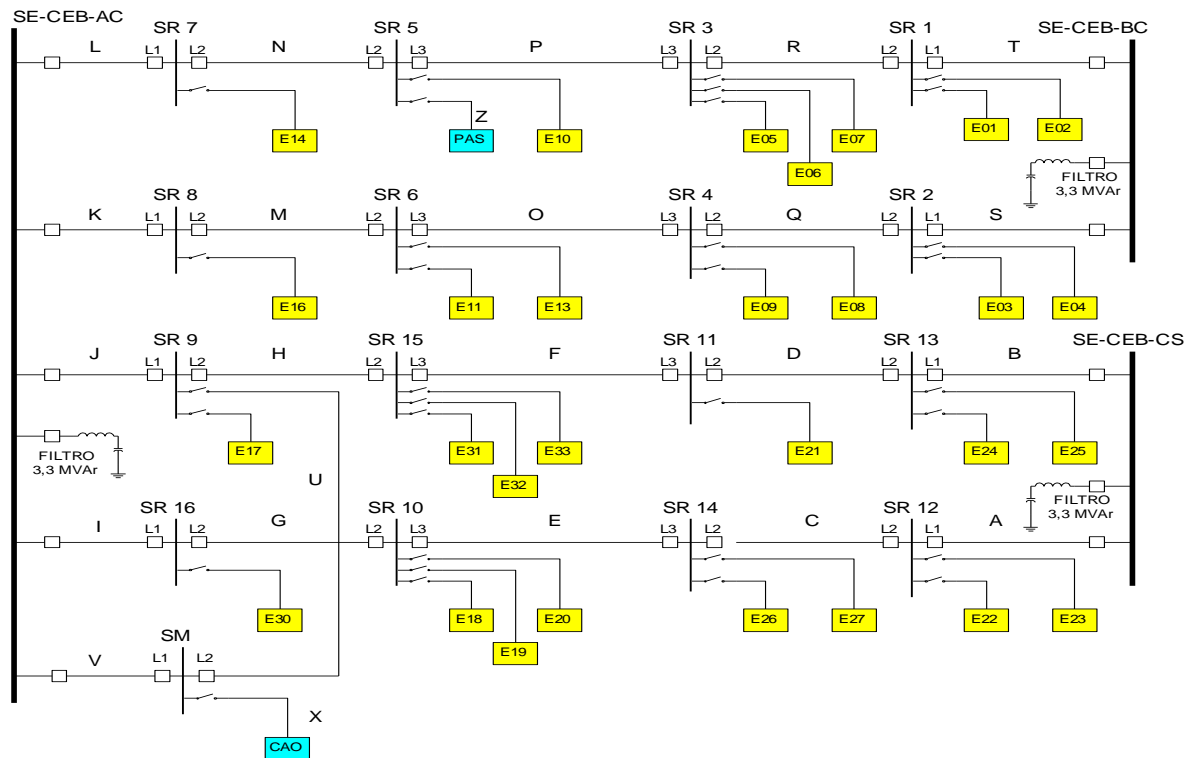


Figura F – Diagrama Unifilar da Rede de Alimentação em 13,8 kV das Subestações Auxiliares

Quanto à potência instalada das Subestações Retificadoras do Metrô-DF, segue abaixo uma tabela com os dados de cada uma delas e o somatório da potência total instalada. Cada uma das SRs é composta por dois transformadores de tração, sendo a Subestação de Manutenção a única exceção, ou seja, única com somente um transformador.

Potência Instalada do Metrô-DF				
SRs	Pot.(KW)/Trafo	Pot.(KW)/Total	Pot.(KVA)/Trafo	Pot.(KVA)/Total
01	1750	3500	1925	3850
02	2750	5500	3025	6050
03	2750	5500	3025	6050
04	2000	4000	2200	4400
05	2000	4000	2200	4400
06	1750	3500	1925	3850

07	1750	3500	1925	3850
08	1750	3500	1925	3850
09	2750	5500	3025	6050
10	2750	5500	3025	6050
11	1750	3500	1925	3850
12	2000	4000	2200	4400
13	2000	4000	2200	4400
14	2000	4000	2200	4400
62	2750	5500	3025	6050
61	2000	4000	2200	4400
SM	1750	3500	1925	3850
63	2750	5500	3025	6050
64	2000	4000	2200	4400
65	2000	4000	2200	4400
15	2000	4000	2200	4400
16	2000	4000	2200	4400
21	2750	5500	3025	6050
Total	36250	94000	37950	109450

Tabela A – Potência Instalada do Metrô-DF

## 4 Condições Operacionais

- **Condições do Sistema:**

Atualmente a malha metroferroviária de Brasília constitui-se basicamente de um “Y”, conforme apresentado no item anterior. Segue abaixo uma figura com a disposição de todas as estações atuais e futuras ao longo de todo o sistema:

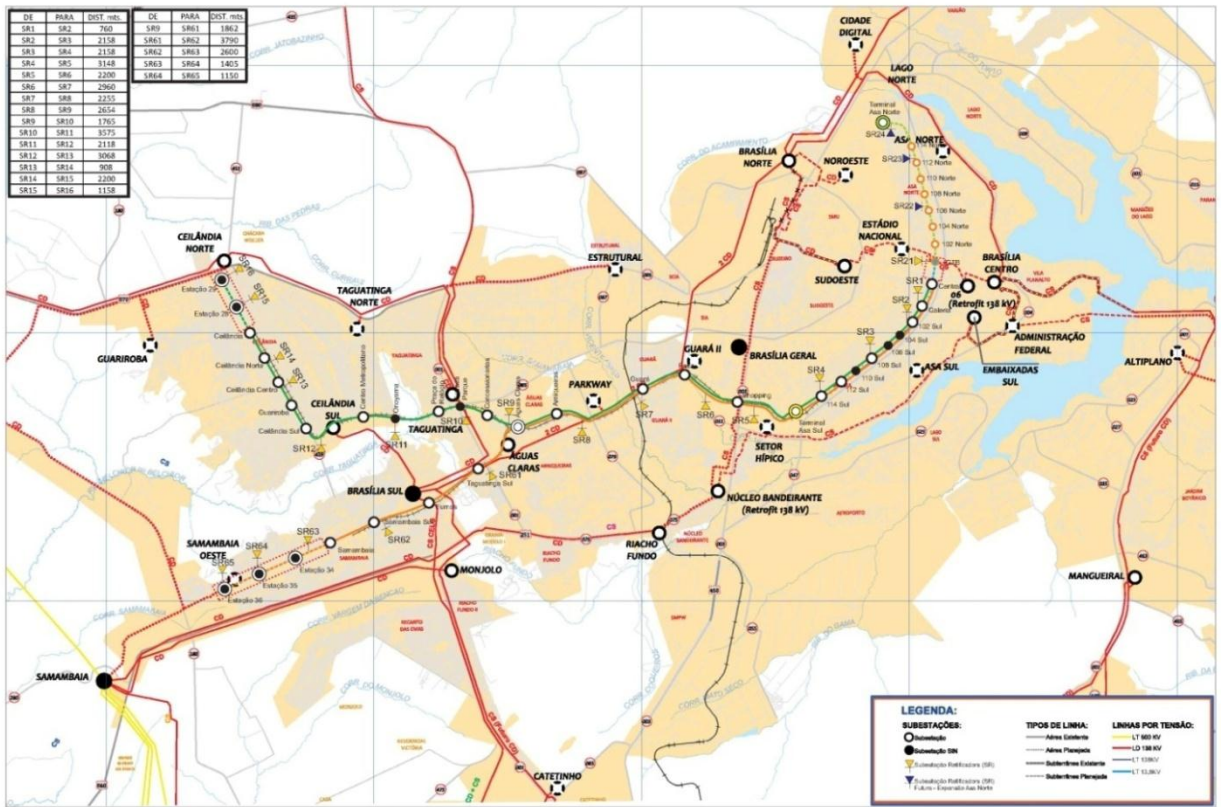


Figura G – Disposição das estações de passageiros

O “Y” atualmente é dividido basicamente em “tronco” (região entre estação “Águas Claras” e estação “Central”) e “pontas” (trecho entre Águas Claras e Samambaia, e Águas Claras e Ceilândia).

A estratégia operacional basea-se na circulação de trens ao longo do “Y”, onde o despacho em CTL (estação Águas Claras), bifurcação, ocorre de forma alternada, na razão 1:1 para as duas pontas, ou seja, um trem para Ceilândia e um para Samambaia. Assim, temos como *headway* mínimo na região de tronco 180s, e 360s nas regiões de pontas. Apesar disso, todos os estudos e simulações foram realizados considerando um *headway* único, de 180s para todo o sistema, visto que situações de contingência podem impor esta condição operacional.

Este valor de *headway* será reajustado após a expansão até o fim da Asa Norte, em um momento futuro. Neste cenário haverá uma superposição operacional entre os trechos Asa norte e Asa sul, fazendo com que o *headway* entre a estação GTB e Terminal Asa Sul (estação 10) se reduza à 90s, conforme pode ser verificado na grade horária abaixo:

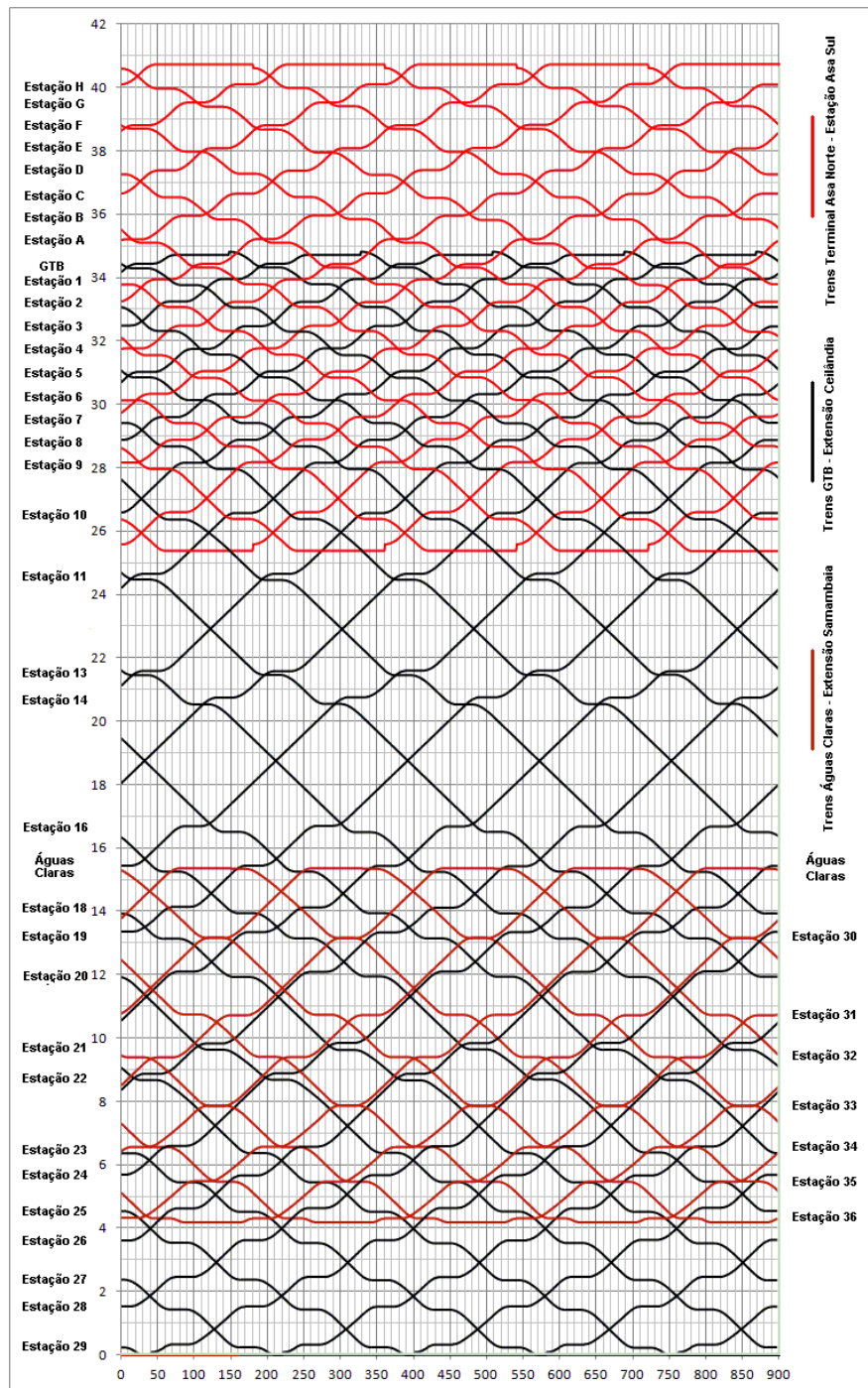


Figura H - Operação simultânea dos ciclos Terminal Asa Norte– Asa Sul, GTB – Ceilândia e Águas Claras - Samambaia





AEAMESP



Todos estes cenários, bem como o futuro aumento da carga de tração por acréscimo de auxiliares, foram considerados nos estudos de Simulação de Marcha e Simulação Elétrica.

- Características Operacionais

A utilização do Sistema Metroviário de Brasília tem uma característica pendular, ou seja, um fluxo de usuários muito intenso pela manhã em um sentido, e outro igualmente intenso ao fim da tarde no sentido contrário. Os horários de maior intensidade de fluxo de passageiros são denominados “picos”, período em que a demanda de energia é máxima e, portanto, carga considerada nas medições de energia e Simulações Elétricas.

Outra característica do sistema é a operação com duas frotas de trens distintas. Cada uma possui características elétricas específicas e, portanto, participação distinta no comportamento da carga do sistema. Para fins de estudos, foram considerados trens da série 2000, que possuem motores de corrente alternada e consumo ligeiramente maior de energia.

## **5 As simulações do Sistema de Tração**

### **5.1 Metodologia de Cálculo**

Para a verificação e redimensionamento do sistema de tração elétrica foram realizadas as seguintes simulações:

- Simulação de marcha dos trens;
- Grade horária;
- Simulação elétrica.

Os programas utilizados foram desenvolvidos em Visual Basic, versão 2010. A seguir é apresentada a descrição resumida da metodologia adotada.



AEAMESP



### 5.1.1 A simulação de marcha dos trens

Os trabalhos de simulação de marcha consistiram no processamento do movimento do trem da série 2000 sobre os ciclos Extensão Asa Norte-Asa Sul, GTB-Extensão Ceilândia e Águas Claras-Extensão Samambaia, na ida e na volta para cada um desses ciclos operacionais.

O mecanismo de funcionamento do processamento baseia-se nas equações físicas da dinâmica de movimento de um móvel sobre um percurso determinado.

O programa faz seus cálculos de uma forma iterativa, admitindo, para o instante inicial, o valor de uma variável de referência, e utiliza esse valor em equações cinemáticas e dinâmicas, chegando a um novo valor para a variável que foi assumida. Os valores admitido e calculado dessa variável são, então, comparados e, quando a diferença entre elas se torna menor que o erro que é aceito, o cálculo avança um intervalo de tempo e torna a proceder da mesma forma que no instante anterior, usando para a variável de referência o valor a que se chegou no instante anterior e prossegue, daí para frente, repetindo o mesmo procedimento.

O programa utilizado para a simulação de marcha usa, como variável de referência, o valor da aceleração a cada instante.

Partindo de uma aceleração é possível determinar, dentro de intervalo de tempo que foi definido para o cálculo, a velocidade atingida no final do intervalo e a nova posição em que o veículo se encontra. A velocidade final define o novo valor do esforço de propulsão e o novo valor da resistência de arraste. A nova posição do veículo determina a resistência acidental provocada por rampas e curvas do traçado da via. O esforço de propulsão e as resistências de arraste e acidental, associados à massa do trem, determinam o novo valor da aceleração

que é, então, comparada com a que foi utilizada no início do cálculo, para o intervalo de tempo que está sendo processado.

Ao final de cada intervalo de cálculo o programa registra os valores das variáveis que são de interesse para a análise da marcha do trem e segue dessa forma até que o veículo pare na próxima estação.

Com a associação de instantes e posições do trem (curva posição em função do tempo) é preparada a tabela que é utilizada para a montagem do programa horário que vai ser utilizado para os cálculos do sistema de alimentação elétrica.

A título de exemplo é apresentado a seguir o resultado da corrida num dos trechos da Via 1, entre Estação GTB e Estação 01.

<b>Aceleração (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Espaço (m)</b>	<b>Velocidade (km/h)</b>	<b>Força tração (kN)</b>	<b>R arraste (kN)</b>	<b>R acid (kN)</b>	<b>T perc (s)</b>	<b>Pot (kW)</b>
1,12	6391,9	0	297600	3490,4	0	0	320
1,12	6392,4	4	297600	3626,3	0	1	653,3
1,12	6394,1	8,1	297600	3786	0	2	986,4
1,12	6396,9	12,1	297600	3969,4	0	3	1319,3
1,12	6400,8	16,1	297600	4176,6	0	4	1652
1,12	6405,9	20,1	297600	4407,3	0	5	1984,4
1,12	6412	24,2	297600	4661,6	0	6	2316,6
1,11	6419,3	28,2	297600	4939,3	0	7	2648,4
1,11	6427,7	32,2	297600	5240,5	0	8	2979,9

1,02	6437,1	36,1	280341,4	5557,3	6179,9	9	3130,7
0,88	6447,7	39,5	256062,6	5852,7	18448,9	10	3130,7
0,76	6459,1	42,5	238232,6	6121,8	31748,6	11	3130,7
0,66	6471,2	45	224728,1	6364,3	45940,6	12	3130,7
0,56	6484	47,2	214308	6580	60899,6	13	3130,7
0,47	6497,4	49,1	206223,6	6767,8	76513,3	14	3130,7
0,38	6511,3	50,6	199976,9	6927,2	92675,1	15	3130,7
0,33	6525,5	51,9	195143	7060,1	101688,2	16	3130,7
0,31	6540,1	53	190892,2	7184,5	101688,4	17	3130,7
0,3	6554,9	54,1	187020,6	7304,6	101688,4	18	3130,7
0,28	6570,1	55,1	183477,2	7420,6	101688,4	19	3130,7
0,28	6585,6	56,1	180217,7	7532,8	100081	20	3130,7
0,33	6601,3	57,2	176770	7657,7	81709,5	21	3130,7
0,38	6617,4	58,5	172859,5	7807,7	64717,5	22	3130,7
0,4	6633,8	60	168780,2	7974,4	54613,7	23	3130,7
0,43	6650,7	61,4	164670	8153,8	44261,7	24	3130,7
0,45	6668	63	160539,3	8347	33647,6	25	3130,7
0,41	6685,7	64,6	156615,3	8543,7	39547,1	26	3130,7
0,36	6703,9	66	150130	8718,7	48180,9	27	3071,9
0,33	6722,4	67,2	143609,2	8877,2	48180,9	28	3001,5

0,31	6741,2	68,4	137897,3	9026,7	48180,9	29	2938,8
0,29	6760,3	69,4	132849	9168	48180,9	30	2882,4
-1,42	6779,8	69,7	-315092	9196,3	48180,9	31	320
-1,41	6798,4	64,6	-315092	8537,3	46144,9	32	320
-1,39	6815,6	59,5	-315092	7922,7	42602,2	33	320
-1,36	6831,5	54,5	-315092	7353,9	35187,6	34	320
-1,33	6845,9	49,7	-315092	6833,8	27183	35	320
-1,3	6859,1	45	-315092	6359	19913,9	36	320
-1,27	6870,9	40,3	-315092	5926,2	13363,7	37	320
-1,25	6881,5	35,8	-315092	5532,1	8726,1	38	320
-1,24	6890,8	31,3	-315092	5172,7	5490,4	39	320
-1,23	6898,9	26,9	-315092	4846,1	2685,7	40	320
-1,22	6905,7	22,5	-315092	4551,1	307,3	41	320
-1,22	6911,4	18,1	-315092	4286	0	42	320
-1,22	6915,8	13,7	-315092	4049,2	0	43	320
-1,21	6919	9,3	-315092	3840,8	0	44	320
-1,21	6921	4,9	-315092	3660,5	0	45	320
-1,21	6921,7	0	-315092	3489,4	0	46,14	320
0	6921,7	0	0	3489,4	0	0	320
0	6921,7	0	0	3489,4	0	0	320





AEAMESP



<b>Tempo de parada (s):</b>	19,86	<b>segundos</b>				
<b>Distância percorrida (m):</b>	529,80	<b>metros</b>				
<b>Velocidade Máxima (km/h):</b>	80,00	<b>km/h</b>				
<b>Velocidade Média (km/h):</b>	41,34	<b>km/h</b>				
<b>Velocidade Comercial (km/h):</b>	28,90	<b>km/h</b>				
<b>Máxima Velocidade (km/h):</b>	69,70	<b>km/h</b>				

### 5.1.2 A Grade Horária

Com a associação de instantes e posições do trem (curva posição em função do tempo) é preparada a tabela que é utilizada para a montagem do programa horário que vai ser utilizado para os cálculos do sistema de alimentação elétrica.

A montagem da grade horária é feita deslocando a característica de instante versus posição do trem de um intervalo de tempo igual ao intervalo entre trens na operação (*headway*). Isso é feito para os dois sentidos de marcha (de ida e volta em uma determinada linha).

Esses dados são tabelados e são fornecidos em conjunto com os dados das vias ocupadas pelos trens e das potências postas em jogo em cada instante de modo que possa ser feito o processamento do dimensionamento elétrico na linha (ou linhas) toda.

### 5.1.3 A Simulação Elétrica

O intervalo de tempo adotado entre instantes subsequentes é de 1 segundo, acompanhando o intervalo considerado na grade horária.

A rede elétrica é representada por um circuito elétrico equivalente incluindo modelos para trens, subestações, linha de contato e retorno.



AEAMESP



Os trens são modelados como fontes ideais de corrente cuja posição e valor são dados através da simulação de marcha e da simulação de tráfego (grade horária). Da variação das posições e valores resulta a alteração do fluxo de cargas de instante para instante.

As fontes de tensão (subestações retificadoras) são modeladas considerando uma tensão em vazio,  $U_{do}$ , em série com uma resistência interna,  $R_i$ .

A partir das tensões em vazio e nominal consideradas, respectivamente 862,5 V e 825 V, foram obtidas as resistências internas para as diversas potências das subestações. A resistência das subestações com 2 grupos em paralelo é igual à metade da resistência interna de cada grupo.

A partir dos valores instantâneos de corrente são calculadas as correntes eficazes nos grupos das subestações retificadoras e nos alimentadores das subestações para o intervalo de tempo considerado, correspondente a um ciclo de operação.

São também calculadas as quedas de tensão nos diversos elementos do sistema, tanto no circuito positivo como no de retorno. O programa calcula a tensão aplicada entre os terminais positivo e negativo dos trens e determina a menor tensão que ocorre ao longo do ciclo de operação considerado. Essa tensão é de interesse para verificação das condições operacionais do trem quanto à mínima tensão admissível.

## 5.2 Condições Operacionais e configurações consideradas nas Simulações Elétricas

Do ponto de vista do tráfego dos trens foram considerados 2 trechos:

- De Ceilândia a Asa Norte; e
- De Águas Claras a Samambaia.





AEAMESP



Apesar de não haver interpenetração dos trens de um trecho para o outro, o sistema de tração elétrica dos 2 trechos será interligado através de ligações do 3º trilho e do retorno nas proximidades da Estação Águas Claras. Dessa forma as subestações retificadoras dos 2 trechos operarão em paralelo e o sistema deverá, portanto, ser simulado como um todo.

Para cada configuração estudada foram simulados tanto o caso sistema íntegro, com todas as subestações retificadoras em operação, como os casos de fora de operação de cada uma delas. Não foram simulados casos de dupla contingência, ou seja, de perda simultânea de 2 subestações.

Tendo em vista o escopo de trabalho previsto, qual seja verificar o sistema de tração existente e propor as reformas requeridas para as condições operacionais do horizonte de projeto, foram realizadas simulações para diversas configurações do sistema de tração.

Inicialmente foi simulada a configuração que foi denominada básica. Os resultados obtidos mostraram os pontos críticos do sistema de tração, tanto no que se refere à potência das subestações retificadoras como ao carregamento do terceiro trilho.

A partir desses resultados, foram escolhidas várias configurações para estudo, com a interposição de novas subestações retificadoras, situadas em locais próximos às subestações mais carregadas.

A escolha de novas configurações foi limitada principalmente pela questão física, ou seja, de locais disponíveis para a instalação de novas subestações. Num sistema existente como esse, novas subestações nos trechos em túnel devem ser localizadas no interior de estações existentes ou futuras. Em trechos em superfície a liberdade de escolha é maior, mas as localizações também precisam ser otimizadas.



AEAMESP



Assim sendo, diversas novas configurações foram simuladas, e os resultados obtidos confrontados de forma a escolher a melhor do ponto de vista técnico-econômico. No item seguinte esses resultados são apresentados para a configuração atual e para a configuração considerada como mais adequada dentre as várias estudadas.

## **6 Análise dos Resultados das Simulações Elétricas**

### **6.1 Condições Consideradas na Análise dos Resultados.**

A condição de sobrecarga admissível dos grupos retificadores \_ classe VI “Heavy Traction” da norma IEC 60146 é a seguinte:

- 150% durante 2 horas; e
- 300% durante 1 minuto.

Essa condição foi adotada também para os grupos das subestações futuras.

Quanto à potência nominal das novas subestações não foram adotados valores diferentes dos das subestações existentes. Ressalte-se que, como o dado de entrada das simulações é a resistência equivalente da subestação, haverá margem para a adoção de 1 ou 2 grupos por subestação. Essa questão será tratada adiante neste trabalho.

A corrente nominal do terceiro trilho, que será confrontada com as correntes eficazes máximas calculadas, é 2.900 A.

Os limites de tensão admissíveis no 3º trilho, para a nominal de 750 Vcc, são 500 Vcc e 900 Vcc. Foi adotada, contudo, uma margem de 50 V em relação à tensão mínima, ou seja, o limite inferior será de 550 Vcc de forma a melhorar a segurança operacional do trem.



AEAMESP



## 6.2 Critérios de Dimensionamento.

Conforme já referido no item 5.2 – Condições Operacionais e Configurações consideradas nas Simulações Elétricas - deste trabalho, as simulações, para cada configuração estudada, foram feitas para a condição de sistema íntegro e de sistema degradado pela perda de cada uma das subestações (sem dupla degradação).

Para o dimensionamento e verificação da potência das subestações foi adotado o seguinte critério:

- Com o sistema íntegro, não foram admitidas, ou adotadas no caso de novas subestações, potências nominais inferiores às máximas calculadas;
- Nos casos de sistema degradado, foram admitidas potências nominais superiores à nominal desde que não superassem o limite de sobrecarga de 150% admissível durante 2 horas. Conforme exposto no item 4.2, o sistema de transporte de Brasília tem uma característica pendular com 2 picos de maior demanda, cuja duração usual é da ordem de 2 horas.

No caso do 3º trilho não estão disponíveis dados sobre a capacidade de sobrecarga. A corrente máxima no terceiro trilho será considerada como sendo igual à corrente no alimentador proveniente da subestação.

## 6.3 Apresentação e Análise dos Resultados.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para a configuração básica e para a configuração com reforço de novas subestações que foi escolhida para ser implantada dentre as várias que foram estudadas.

A configuração básica inclui as subestações existentes ao longo da Linha, as subestações das Extensões, além de mais 3 subestações na Extensão Asa Norte (SR's 22, 23 e 24) que serão objeto de licitação futura para um novo prolongamento nessa direção.

Os valores que superam os admissíveis estão assinalados em vermelho nas tabelas a seguir.

### 6.3.1 Configuração Básica

#### Potências das subestações

SR	Sistema íntegro	Sistema degradado	Potência nominal	Sobrecarga adm. 150%
16	2197,8 kW	3769,9 kW	4000 kW	6000 kW
15	2708,2 kW	4424,5 kW	4000 kW	6000 kW
14	2618,8 kW	4201 kW	4000 kW	6000 kW
13	2942,6 kW	4245,9 kW	4000 kW	6000 kW
12	2904,8 kW	4328,8 kW	4000 kW	6000 kW
11	3109,2 kW	4323,9 kW	3500 kW	5250 kW
10	3613,0 kW	5084,3 kW	5500 kW	8250 kW
65	1540,2 kW	2636,3 kW	4000 kW	6000 kW
64	2197,0 kW	3610,2 kW	4000 kW	6000 kW
63	3019,9 kW	4519,5 kW	5500 kW	8250 kW
62	3449,5 kW	4478,2 kW	5500 kW	8250 kW
61	3156,3 kW	4185,3 kW	4000 kW	6000 kW

9	3858,8,7 kW	5609,5 kW	5500 kW	8250 kW
8	2451,0 kW	3545,9 kW	3500 kW	5250 kW
7	2721,7 kW	3634,9 kW	3500 kW	5250 kW
6	2737,7 kW	4661,3 kW	3500 kW	5250 kW
5	4507,3 kW	6493,2 kW	4000 kW	6000 kW
4	6369,8 kW	8784,3 kW	4000 kW	6000 kW
3	6886,8 kW	9716,0 kW	5500 kW	8250 kW
2	4453,6 kW	6652,6 kW	5500 kW	8250 kW
1	3688,0 kW	5668,1 kW	3500 kW	5250 kW
21	4716,0 kW	6062,7 kW	5500 kW	8250 kW
22	3776,0 kW	5363,1 kW	5500 kW	8250 kW
23	3038,3 kW	4702,3 kW	5500 kW	8250 kW
24	2291,1 kW	3890,5 kW	5500 kW	8250 kW

Tensões mínimas

Caso Simulado	Tensão mínima
Sistema Integro	664,2 V
SR16 fora	664,2 V
SR15 fora	664,2 V
SR14 fora	664,2 V



AEAMESP



SR13 fora	664,2 V
SR12 fora	655,6 V
SR11 fora	653,7 V
SR10 fora	642,9 V
SR9 fora	664,1 V
SR65 fora	664,2 V
SR64 fora	664,2 V
SR63 fora	664,2 V
SR62 fora	610,7 V
SR61 fora	650,0 V
SR8 fora	664,0 V
SR7 fora	651,2 V
SR6 fora	649,0 V
SR5 fora	550,0 V
SR4 fora	531,8 V
SR3 fora	600,9 V
SR2 fora	663,0 V
SR1 fora	663,8 V
SR21 fora	649,6 V
SR22 fora	664,2 V

SR23 fora	664,2 V
SR24 fora	664,2 V

Correntes máximas nos alimentadores do terceiro trilho

Alimentador da SR	Sistema íntegro	Sistema degradado
16	1401,9 A	2482,5 A
15	1683,5 A	2441,3A
14	1297,3 A	2176,9 A
13	1799,1 A	2371,4 A
12	1658,1 A	3131,2 A
11	1533,1 A	2557,7 A
10	1688,4 A	2605,3 A
65	1341,3 A	2112 A
64	1412,1 A	2607,2 A
63	2023,3 A	2797,6 A
62	1813,3 A	2641,7 A
61	1396,7 A	2186 A
9	2169,2 A	3154,6 A
8	1696,6 A	2359,4 A
7	1651,7 A	2347 A

6	1227,6 A	2745,2 A
5	3295,9 A	4776,3 A
4	2389,5 A	4395,9 A
3	2917,8 A	5201,1 A
2	2732,1 A	4948,6 A
1	1950,6 A	3516,6 A
21	2157,9 A	3004 A
22	1724,9 A	2872,1 A
23	1641,3 A	2778,1 A
24	1329,8 A	2366,4 A

Da análise da tabela de potências verifica-se que em várias subestações localizadas na região central, onde ocorrerá a redução do “*headway*”, ocorreram potências elevadas, tanto para a condição de sistema íntegro como de sistema degradado. Em alguns casos os valores admissíveis foram largamente ultrapassados, como nas SR’s 3 e 4 principalmente.

Quanto às tensões mínimas, em apenas 1 caso de sistema degradado (SR 4 fora) ocorreu tensão inferior à mínima de 550Vcc.

Já no que respeita às correntes eficazes no terceiro trilho, a capacidade nominal também foi ultrapassada em vários trechos na região de redução do “*headway*” além de 2 trechos fora dessa região que serão analisados na Conclusão .

A partir desses resultados, e levando em conta as restrições físicas existentes, foram escolhidas 4 novas configurações para estudo, com a introdução de novas subestações. Os



resultados obtidos para a configuração que foi julgada como sendo a mais adequada do ponto de vista técnico e econômico são apresentadas a seguir.

### 6.3.2 Configuração com Reforço

Foram simulados os casos de degradação de subestações localizadas na região onde ocorrerá a redução do “*headway*” ou nas suas proximidades. Nas subestações mais afastadas, como pode ser verificado pela comparação das tabelas da configuração básica e da configuração com reforço, os reflexos do aumento do “*headway*” não são significativos.

As subestações acrescidas, intercaladas entre existentes, foram denominadas 1X, 2X e 3X.

#### Potências das subestações

SR	Sistema íntegro	Sistema degradado	Caso (SR fora)	Potência nominal	Sobrecarga adm. 150%
16	2175,2 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
15	2555,6 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
14	2706,3 kW	-	-	4000 kW	6000 kW
13	2972,2 kW	-	-	4000 kW	6000 kW
12	2908,4 kW	-	-	4000 kW	6000 kW
11	3108,1 kW	-	-	3500 kW	5250 kW
10	3597,7 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
9	3781,5 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
65	1827,4 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
64	2109,2 kW	-	-	5500 kW	8250 kW



AEAMESP



63	3079 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
62	3394 kW	-	-	4000 kW	6000 kW
61	3089,2 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
8	2422,8 kW	3496,4 kW	SR07	3500 kW	5250 kW
7	2677,1 kW	3576,9 kW	SR08	3500 kW	5250 kW
6	2498,2 kW	3554,3 kW	SR05	3500 kW	5250 kW
5	3124,6 kW	4149,9 kW	SR1X	4000 kW	6000 kW
1X	3685 kW	5133,2 kW	SR04	5500 kW	8250 kW
4	3218,3 kW	4803,4 kW	SR1X	4000 kW	6000 kW
2X	3715,2 kW	5280,7 kW	SR03	5500 kW	8250 kW
3	3551 kW	5223,4 kW	SR2X	5500 kW	8250 kW
3X	3426,6 kW	4677,3 kW	SR02	5500 kW	8250 kW
2	3142,2 kW	4618,4 kW	SR3X	5500 kW	8250 kW
1	2879,5 kW	4430,2 kW	SR21	3500 kW	5250 kW
21	4662 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
22	4185,2 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
23	3242,5 kW	-	-	5500 kW	8250 kW
24	2271,2 kW	-	-	5500 kW	8250 kW



AEAMESP



Tensões mínimas

<b>Caso Simulado</b>	<b>Tensão mínima</b>
<b>Sistema Integro</b>	<b>727,1 V</b>
<b>SR9 fora</b>	<b>675,1 V</b>
<b>SR8 fora</b>	<b>709 V</b>
<b>SR7 fora</b>	<b>653,4 V</b>
<b>SR6 fora</b>	<b>654,7 V</b>
<b>SR5 fora</b>	<b>659,4 V</b>
<b>SR1X fora</b>	<b>690,9 V</b>
<b>SR4 fora</b>	<b>726,8 V</b>
<b>SR2X fora</b>	<b>727 V</b>
<b>SR3 fora</b>	<b>727 V</b>
<b>SR3X fora</b>	<b>727,1 V</b>
<b>SR2 fora</b>	<b>727,1 V</b>
<b>SR1 fora</b>	<b>727,1 V</b>
<b>SR21 fora</b>	<b>660,7 V</b>

Correntes máximas nos alimentadores do terceiro trilho

Alimentador da SR	Sistema íntegro	Sistema degradado	Caso (SR fora)
16	1404,3 A	-	-
15	1620 A	-	-
14	1361,3 A	-	-
13	1795,6 A	-	-
12	1657,4 A	-	-
11	1533,9 A	-	-
10	1689,7 A	-	-
9	2102,8 A	-	-
65	1351,8 A	-	-
64	1501,8 A	-	-
63	2025,1 A	-	-
62	1615,7 A	-	-
61	1569,5 A	-	-
8	1689,5 A	2326,3 A	SR09
7	1625,3 A	2253 A	SR06
6	1252,5 A	1963,1 A	SR07
5	2200 A	3040,7 A	SR1X
1X	2084,1 A	3321,3 A	SR05

4	2162,2 A	2871,3 A	SR2X
2X	1800,5 A	2905,4 A	SR03
3	2291,8 A	2928,6 A	SR3X
3X	1752,4 A	2547,4 A	SR03
2	1760,6 A	2690,1 A	SR01
1	1705,2 A	3283,2 A	SR21
21	2234,8 A	-	-
22	1883,9 A	-	-
23	2094 A	-	-
24	1283,9 A	-	-

Da tabela de potências verifica-se que não ocorreram casos em que os valores admissíveis de potência foram ultrapassados.

Com relação às tensões observa-se que os níveis de tensão se elevaram e foi corrigido o problema que ocorria no caso da SR4 fora.

Com respeito às correntes no terceiro trilho foram detectados alguns casos de correntes superiores à nominal de 2.900 A, todos na condição de sistema degradado pela perda de uma subestação. Quanto aos casos fora da região de aumento do “*headway*” não foram feitas novas simulação, pois o reflexo da introdução das 3 novas subestações é reduzido.

Optou-se por não fazer a introdução de novas subestações com o objetivo de reduzir as correntes no terceiro trilho pelos seguintes motivos:



AEAMESP



- Em alguns casos a corrente nominal é apenas ligeiramente ultrapassada (com exceção de 2 casos não supera 10%) e só em condições de degradação ; Além disso, os resultados das simulações podem ser considerados como sendo conservativos.
- Considera-se que deve primeiramente ser feito um estudo detalhado da capacidade térmica do terceiro trilho antes de incorrer em custos adicionais.

## 7 Conclusão

Conforme mostrado no item anterior, a introdução de 3 novas subestações retificadoras resolve os problemas de potência e de queda de tensão detectados nas simulações da configuração básica do sistema de tração.

Uma observação deve ser feita a respeito ao número de grupos a ser instalado nas 3 novas subestações. Como as subestações serão instaladas em estações já construídas, a redução da área requerida é desejável. Uma opção que se apresenta é a instalação de um único grupo ao invés de 2. Essa opção é também mais favorável do ponto de vista econômico e não implica em perda de confiabilidade do sistema visto que, mesmo com perda total de uma subestação, as demais podem manter o sistema em operação sem restrições ao tráfego.

Com relação ao terceiro trilho optou-se por não introduzir novas subestações no sistema para a redução das correntes eficazes pelos motivos expostos no item anterior. Caso se verifique realmente a necessidade de providências a respeito, a solução mais adequada, em princípio, seria o reforço do terceiro trilho nos trechos sobrecarregados.



AEAMESP



## 8 Referências Bibliográficas

8.1 Plano Diretor Territorial Urbano – PDTU – DF de 2010;

8.2 O Dimensionamento Preliminar e Final de um Sistema de Tração Metroferroviário.

Apresentado na Semana de Tecnologia da AEAMESP no ano de 2005

Autores: Vito Labate Neto e Mário Giuriatti.

8.3 Curso para Treinandos do Metrô de Bagdad – Janeiro de 1985

Apresentado no III ENMAT da ABNT

Autores: João Paulo Lacerda e Carlos Alberto Alquéres

8.4 Engenharia Elétrica Ferroviária E Metroviária: Do Trólebus Ao Trem De Alta Velocidade

Autor: Cassiano Lobo Pires