



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/09
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

**ANÁLISE DA MELHOR LOCALIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS RLCC NO SISTEMA DA GRANDE SÃO PAULO
APLICADA AO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO**

Marcos A. Santos (*)
Luiz Y. Giro
Mariana P. Monteiro
CTEEP

Rômulo B. Broetto
Waldecy Macedo

CTEEP

Daniel J. T. Souza

EPE

RESUMO

O artigo propõe uma metodologia simples para avaliar e identificar a melhor localização de aplicação de RLCC-Reator Limitador Curto-Circuito nas subestações, seja como elemento série em linhas de transmissão, seja como elemento segregador de barras. Decorrente do aumento da demanda de energia e do crescimento constante do Sistema Interligado Nacional (SIN), tem se tornado necessária a intensificação de estudos de planejamento de modo a serem avaliados os diferentes impactos no sistema. Com destaque para os efeitos relacionados à superação de disjuntores devido ao aumento do nível de curto-circuito.

PALAVRAS-CHAVE

RLCC-Reator Limitador Curto-Circuito, Grande São Paulo, Disjuntores, Superação, Subestações.

1. INTRODUÇÃO

Com relação à região objeto desta análise, Grande São Paulo, há uma previsão significativa no aumento da rede receptora das grandes interligações, principalmente dos mais recentes projetos de Usinas Hidrelétricas localizadas na região Norte do Brasil. De forma a atender ao constante crescimento do SIN, mantendo os níveis adequados de confiabilidade e segurança, as análises deverão ser incrementadas com a realização de um monitoramento prévio das subestações dos grandes centros urbanos quanto à evolução dos níveis de curto-circuito. Este monitoramento pode ser aplicado a quaisquer grandes centros urbanos do SIN, principalmente aqueles impactados diretamente por eixos de grandes interligações entre os novos complexos de usinas hidrelétricas e os grandes centros consumidores.

Observa-se que novas tecnologias para mitigação de problemas de curto-circuito estão se desenvolvendo. No entanto, aquelas que fazem o uso de eletrônica de potência ainda não se mostram competitivas, com a aplicação do RLCC devido aos elevados investimentos associados a estes novos equipamentos. Pode-se afirmar que o uso do RLCC torna possível a postergação da substituição de equipamentos por superação das capacidades de curto-circuito, reduzindo assim a necessidade de desligamentos de elementos da rede para serviços de troca de equipamentos, o que torna mais otimizada a operação do SIN.

A região da Grande São Paulo, considerada nesta análise, é constituída pelas SEs 345/88 kV em operação Norte, Miguel Reale, Ramon Reberte Filho, Leste e Sul, assim como as SEs 345/88 kV São Caetano e Vila Olívia, em fase de análise pelo planejamento. As subestações são compostas, na sua configuração final, por quatro bancos transformadores 345/88 kV de 400 MVA cada um (3x133,33 MVA), além de um amplo sistema, em 88 kV, para atendimento exclusivo de demanda da distribuidora AES Eletropaulo. Dentre os principais consumidores estão o Hospital das Clínicas, palácio do governador, condomínios de alto padrão, shoppings, além dos grandes centros

empresariais e comerciais, existentes na região da Grande São Paulo, o que, devido a sua importância requer atenção do planejamento.

Tendo em vista os reforços recomendados para esta região, por ocasião da Força Tarefa da Copa do Mundo 2014, como por exemplo, o 4º banco de transformadores 345/88 kV 400 MVA na SE Bandeirantes, que entrou em operação em 30-12-2013 em condição de reserva quente, garantindo maior flexibilidade na operação desta subestação. Com uma elevada demanda, esta subestação atualmente possui limitação devido à capacidade nominal dos cabos condutores que alimentam o sistema de 345 kV, que são os três circuitos provenientes da SE Xavantes, sendo a fonte principal a SE Ibiúna (FURNAS). Porém, com a constante e crescente demanda do mercado atendido, faz-se necessário ampliar sua capacidade, atendendo ao compromisso de se buscar um ponto de suprimento diferente do atual. Sendo a solução recomendada pelos estudos de planejamento o fechamento em anel do sistema de 345 kV entre as SEs Piratininga II e Bandeirantes, recomendação esta que será estendida a outros importantes pontos de suprimento da Grande São Paulo.

As expansões previstas pelo órgão de planejamento (EPE) podem impor, como consequência, elevados níveis de correntes de curto-circuito na rede, devendo realizar análises adicionais que identifiquem a melhor localização de equipamentos limitadores de correntes de curto-circuito, o RLCC-Reator Limitador Curto-Circuito, de modo a minimizar os efeitos das superações das capacidades disruptivas dos disjuntores. Com destaque, neste estudo, para os equipamentos das redes de 345 kV e 88 kV que atendem à região da Grande São Paulo. Cabe ressaltar que nas análises de viabilidade econômica, devem ser considerados os benefícios da redução e/ou postergação do significativo número de disjuntores a serem substituídos nas subestações da CTEEP e AES Eletropaulo.

O objetivo deste trabalho é, portanto, mostrar a necessidade de se realizar análises de curto-circuito e regime permanente, considerando sempre como alternativa a inserção de equipamentos RLCC. No caso específico deste estudo, foram analisadas as aplicações em barras de 88 kV, assim como em barras de 345 kV, segregando barramentos estrategicamente selecionados, de modo a restringir a circulação das correntes de curto-circuito, não só pela Rede Básica como também pelas Demais Instalações Transmissão (DIT) e pelo sistema de distribuição em 88 kV da AES Eletropaulo. A metodologia proposta pelo artigo, baseada nos resultados do programa Anafas do CEPEL [1] e nos casos de Curto-Circuito de Planejamento CTEEP-ONS (PV) [2], permite validar, de forma geral, o montante e a localização ideal dos equipamentos RLCC na região da Grande São Paulo, além dos benefícios técnico-econômicos da sua inserção.

2. METODOLOGIA

A inserção de equipamentos RLCC no sistema é, normalmente, proposta para a redução da circulação de correntes de curto-circuito através do sistema de transmissão, com o intuito de evitar/postergar a superação das capacidades disruptivas dos disjuntores responsáveis pelas manobras das linhas de transmissão e transformadores. No entanto, a metodologia aqui aplicada nesta análise procura avaliar e identificar, entre inúmeras alternativas, a melhor composição para a sua instalação. Avaliando o melhor arranjo das novas SEs propostas para a Grande São Paulo já considerando o RLCC na concepção inicial, de forma a contabilizar o menor número de disjuntores em estado de alerta e superados nas subestações do entorno, neste caso as da CTEEP. Cumpre notar que o ano horizonte considerado nas análises é o de 2023.

Os limites dos níveis das correntes de curto-circuito, adotados nesta análise, para sinalizar os disjuntores em estado de “alerta” ou em estado “superado” deverão seguir os valores das faixas exigidas nos Procedimentos de Rede do ONS [3,4], conforme **Tabela 1**.

Tabela 1 – Fatores da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores [3]

Correntes Passantes I_{cc} (kA)	Estado Operativo Relação Capacidade Nominal (kA)
$I_{cc} \geq 100\%$	Superado
$90\% < I_{cc} < 100\%$	Alerta

Para o sistema da Grande São Paulo considerado nesta análise, o diagrama apresentado a seguir destaca o sistema de 345 kV e 88 kV, monitorados nesta análise, bem como as principais subestações que alimentam a região metropolitana da cidade de São Paulo. Estas fontes servirão como base de avaliação para a conexão das novas SEs em análise pela área de planejamento da expansão da EPE que reforçarão o suprimento à região metropolitana de São Paulo.

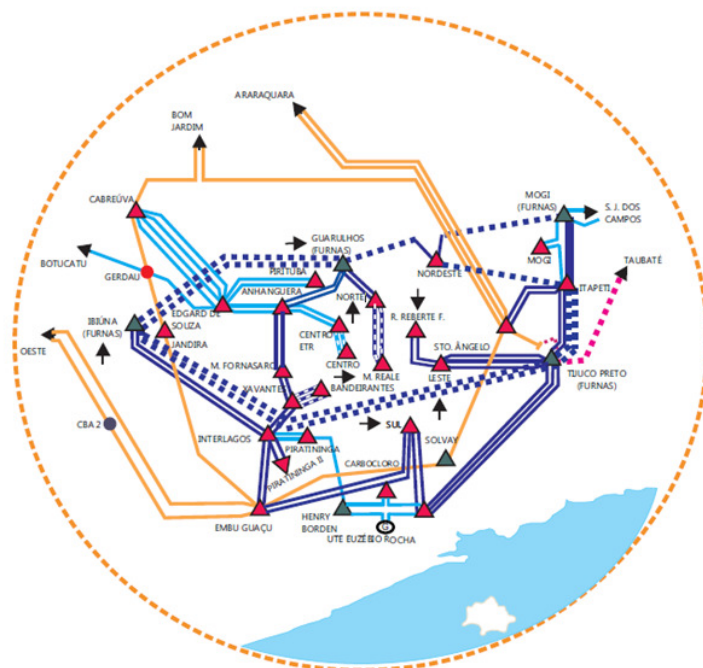


Figura 1 – Região da Grande São Paulo

Estas novas subestações, denominadas SE Vila Olívia e SE São Caetano, são apresentadas no diagrama a seguir, destacando não só o sistema de 345 kV e 88 kV monitorados nesta análise, bem como os locais onde estão sendo considerados os equipamentos RLCC. Nos quais permitirão o menor índice possível de superação de equipamentos para o horizonte de planejamento (2023).

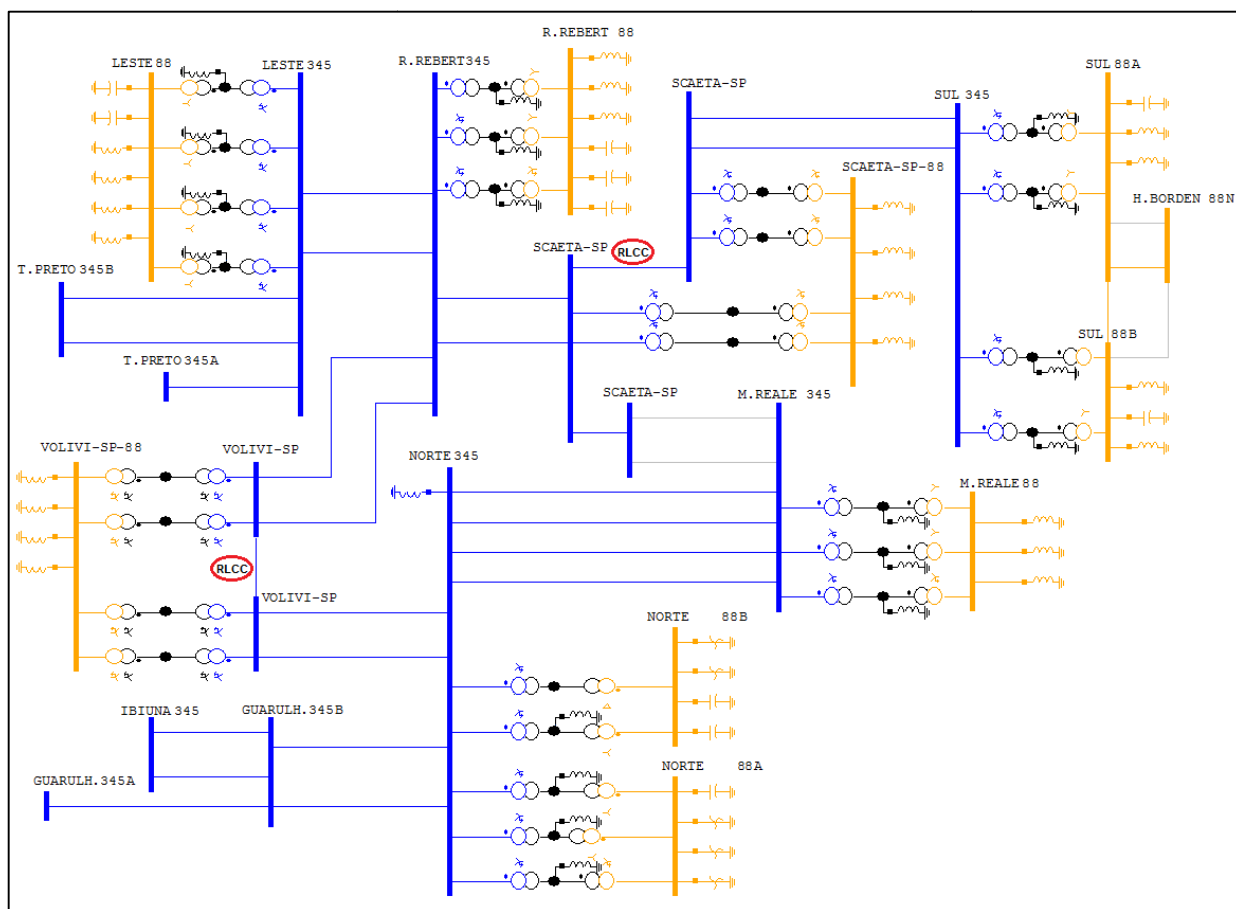


Figura 2 – Subestações da Região da Grande São Paulo consideradas na análise

De forma complementar às análises, seria importante que as empresas distribuidoras realizassem, de forma paralela, o monitoramento dos valores das correntes de curto-circuito em todas suas subestações atendidas pelos ramais de 88 kV, de modo a confirmarem as sinalizações feitas pelo planejamento. Além disso, seria importante a validação dos valores limites das correntes de curto-circuito, trifásico e monofásico que foram considerados nesta análise. Estes valores limites, de certo modo, serviram de parâmetros balizadores para o dimensionamento da capacidade dos equipamentos RLCC aqui considerados e propostos.

2.1 Diagnóstico

A metodologia proposta no trabalho divide estrategicamente a Região da Grande São Paulo em cinco sub-regiões, assim agrupadas em função das SEs em análise:

- Região Norte: SEs Norte e Guarulhos;
- Região Sul: SE Sul;
- Região Leste: SEs Leste, Ramon Reberte Filho e Vila Olívia;
- Centro: SE Miguel Reale;
- ABC: SE São Caetano.

As novas SEs propostas pelo planejamento e presentes nesta análise estão eletricamente representadas no sistema da Grande São Paulo, sendo a SE Vila Olívia (Região Leste) interligando as Regiões Leste e Norte da cidade, assim como a SE São Caetano, no ABC, interligando as Regiões Leste e Sul.

A escolha das localizações das novas SEs Vila Olívia e São Caetano tiveram como premissa dois pontos fundamentais:

- 1) Quanto à disponibilidade de áreas livres capazes de comportar a instalação de uma subestação do porte da necessidade atual e futura, para o atendimento ao mercado da AES Eletropaulo;
- 2) Possibilidade de compatibilizar as distâncias entre o sistema da Rede Básica com a rede de distribuição, de 88 kV, da AES Eletropaulo, minimizando a necessidade de construção de novas linhas de transmissão, tanto na Rede Básica, como na rede de distribuição.

Em função da alta densidade populacional da região analisada, serão consideradas as novas SEs com tecnologia blindada (GIS) e as linhas de transmissão com construção subterrânea, pois só assim será possível a viabilização dos projetos de ampliação do sistema da Grande São Paulo.

As alternativas e configurações do sistema de transmissão, consideradas nesta análise, foram divididas em três etapas (1, 2 e 3), sendo as etapas 1 e 2 subdividida em duas variantes (A e B):

- **Etapla 1A:** Com cinco TRs em uma semibarra 345 kV na SE Norte, interligada com a outra semibarra com RLCC de 30 Ω . Os cinco TRs são conectados ao sistema de 88 kV através da formação 2 e 3 TRs conectados nas duas semibarras de 88 kV, operando aberto. Este equipamento fica localizado entre as SEs Vila Olívia e Miguel Reale, o segundo RLCC de 30 Ω fica na SE Vila Olívia, este equipamento é localizado entre as SEs Norte e Ramon Reberte Filho. O terceiro RLCC de 30 Ω fica na SE São Caetano, este equipamento é localizado entre as SEs Sul e Ramon Reberte Filho. Com a interligação Miguel - Reale-São Caetano;
- **Etapla 1B:** Com cinco TRs na SE Norte, divididos com 2 e 3 TRs conectados em duas semibarras de 345 kV, interligadas com RLCC de 30 Ω . Este equipamento fica também localizado entre as SEs Vila Olívia e Miguel Reale. Na SE Vila Olívia, quatro TRs, formação 2 e 2 no barramento 345 kV interligado pelo RLCC de 30 Ω , ficando portanto localizado entre as SEs Norte e Ramon Reberte Filho. O terceiro RLCC de 30 Ω fica na SE São Caetano, quatro TRs, formação 2 e 2 no barramento 345 kV interligado pelo RLCC de 30 Ω , ficando portanto localizado entre as SEs Sul e Ramon Reberte Filho. Com a interligação Miguel Reale;
- **Etapla 2A:** Na SE Norte, com quatro TRs em uma semibarra 345 kV, interligada com a outra semibarra com RLCC de 30 Ω . Os quatro TRs são conectados ao sistema de 88 kV nas duas semibarras, operando fechado. Na SE São Caetano as duas semibarras 345 kV estão interligadas com o RLCC de 30 Ω . A formação 2 e 2 no barramento de 345 kV e barra única no setor de 88 kV. Deste modo o RLCC da SE São Caetano fica localizado entre as SEs Sul e Ramon Reberte Filho, além da SE São Caetano também está conectada com a SE Miguel Reale. Com esta mesma formação de quatro TRs na SE Vila Olívia, com RLCC de 30 Ω interliga as duas semibarras operando na formação 2 e 2 no barramento de 345 kV e barra única no setor de 88 kV. Com esta configuração o RLCC na SE Vila Olívia fica localizado entre as SEs Norte e Ramon Reberte Filho;
- **Etapla 2B:** Na SE Norte a formação é a mesma da Etapa 2A, no entanto para a SE São Caetano os quatro TRs estão conectados em uma mesma semibarra do setor de 345 kV e barra única no setor de 88 kV. As

duas semibarras 345 kV estão interligadas com o RLCC de 30 Ω . Deste modo, o RLCC da SE São Caetano também fica localizado entre as SEs Sul e Ramon Reberte Filho, assim como a SE São Caetano também está conectada com a SE Miguel Reale. Na SE Vila Olívia, os quatro TRs estão conectados em uma mesma semibarra do setor de 345 kV e barra única no setor de 88 kV. As duas semibarras de 345 kV estão interligadas com RLCC de 30 Ω . Deste modo, o RLCC da SE Vila Olívia também fica localizado entre as SEs Norte e Ramon Reberte Filho.

- **Etapa 3:** Configuração conforme Figura 2, apresenta barra única na SE Norte, quatro circuitos 345 kV, Norte - Miguel Reale. Na barra de 345 kV, RLCC de 30 Ω na SE São Caetano, este equipamento fica localizado entre as SEs Sul e Ramon Reberte Filho, e outro RLCC de 30 Ω na SE Vila Olívia, este equipamento fica localizado entre as SEs Norte e Ramon Reberte Filho. Sem interligação Miguel Reale - São Caetano.

Posteriormente aos resultados das simulações de curto-circuito, incluindo análises de Line-Out, foi criada uma Matriz de resultados gerando assim uma amostra para cada alternativa analisada quanto às sinalizações dos disjuntores em estado de alerta e superados, conforme apresentado na tabela a seguir.

Tabela 2 – Disjuntores em estado de alerta e superados

Alternativas	Disjuntores Sinalizados							
	Com RLCC				Sem RLCC			
	Alerta		Superado		Alerta		Superado	
	345 kV	88 kV	345 kV	88 kV	345 kV	88 kV	345 kV	88 kV
Etapa 1A	5	13	11	5	0	22	22	16
Etapa 1B	5	13	11	5	0	22	22	16
Etapa 2A	5	13	11	5	0	23	22	28
Etapa 2B	5	13	11	5	0	23	22	28
Etapa 3	14	14	2	5	2	22	23	16

3. COMPARAÇÃO RESULTADOS CORRENTES FASE-TERRA E TRIFÁSICA DA ALTERNATIVA ETAPA-1 FINAL

Os resultados da simulação de curto-circuito trifásico e monofásico para a Alternativa que resultou no menor impacto quanto ao número de disjuntores sinalizados na condição de superação, já contemplando a condição de análise de Line-Out, são apresentados nas figuras a seguir.

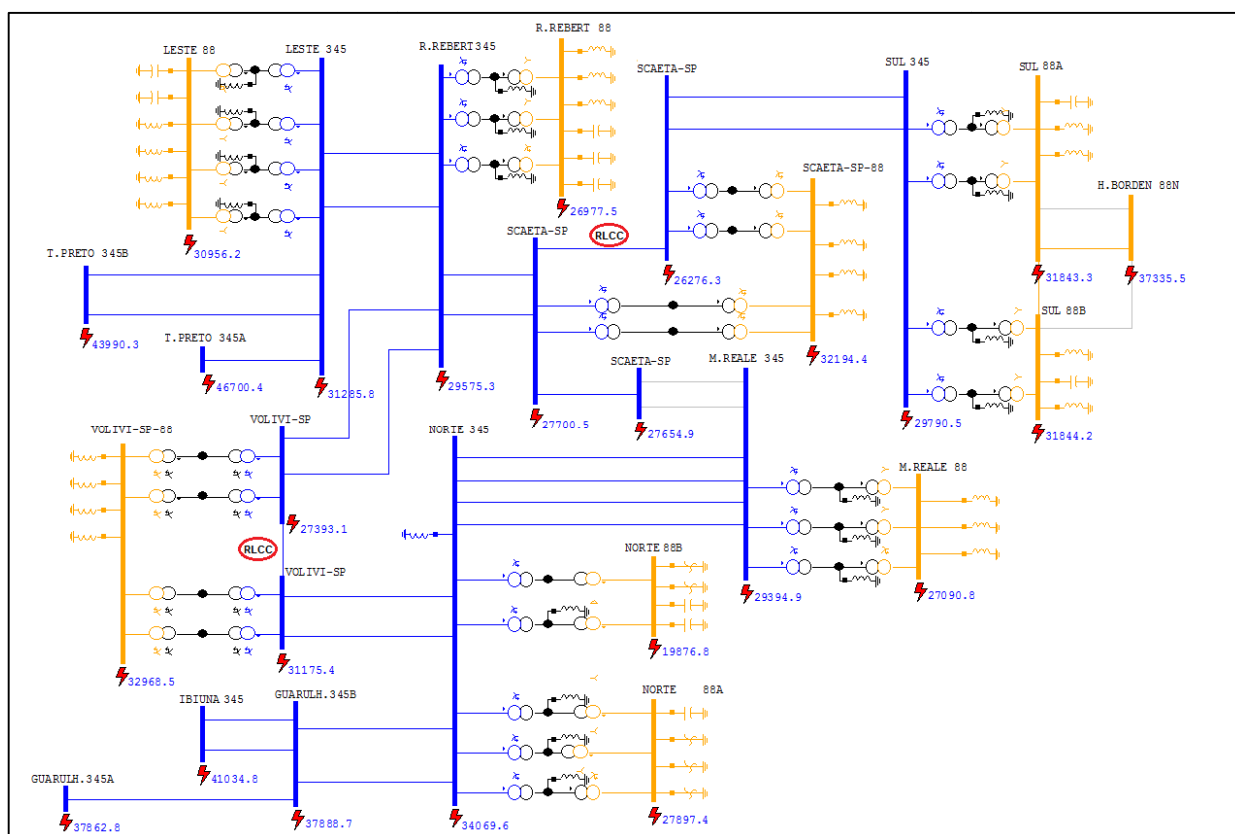


Figura 3 – Curto-circuito trifásico nas Subestações da Região da Grande São Paulo

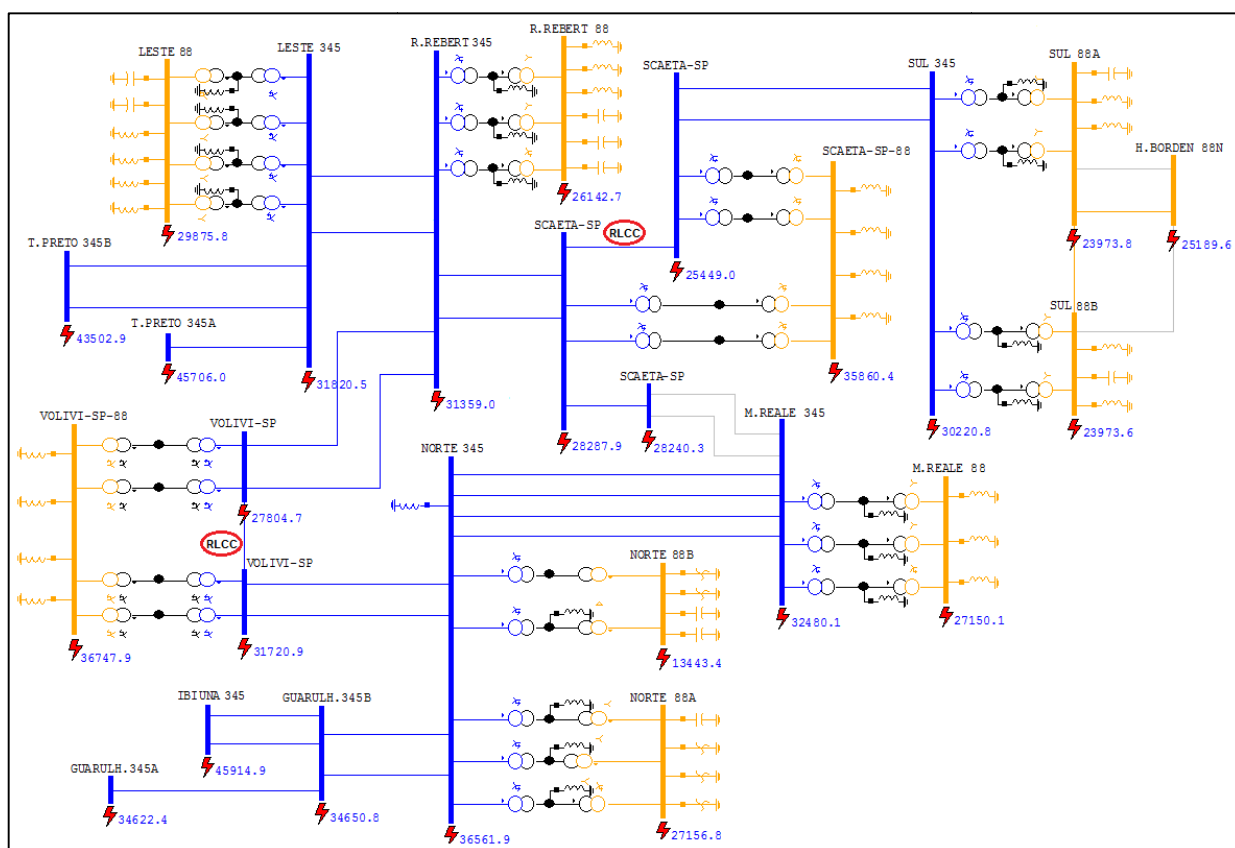


Figura 4 – Curto-circuito monofásico nas Subestações da Região da Grande São Paulo

Nos Diagramas apresentados nas **Figuras 3 e 4** destaca-se a melhor localização, otimização da capacidade e

quantidades dos equipamentos RLCC, recomendados para o sistema da Região da Grande São Paulo, de modo a viabilizar as ampliações em análise pelo planejamento da EPE, referente às SEs São Caetano e Vila Olívia.

Estão apresentados na tabela a seguir os menores disjuntores sinalizados na condição de superação os limites das respectivas capacidades disruptivas.

ANÁLISE DE CURTO - CIRCUITO (MÍNIMO DISJUNTOR) - ANO 2023 - 345 kV e 88 kV - RLCC 30 ohms - Etapa 1 final									
IDENTIFICAÇÃO			DISJUNTOR	FASE-TERRA			TRIFÁSICO		
Barra de Referência		kV	Nom (kA)	Calc.	Calc./Nom.	X/R	Calc.	Calc./Nom.	X/R
20000	LESTE 345	345	31,9	31,821	99,80%	11,664	31,286	98,10%	15,464
20010	LESTE 88	88	31,5	30,018	95,30%	95,487	30,956	98,30%	63,655
20020	M.REALE 345	345	40	32,48	81,20%	12,429	29,395	73,50%	13,617
20030	M.REALE 88	88	40	27,15	67,90%	81,845	27,091	67,70%	57,289
20060	NORTE 345	(***) 345	31,5	36,562	116,10%	16,35	34,07	108,20%	16,832
20069	NORTE 88B	88	31,5	13,6	43,20%	286,451	19,877	63,10%	114,584
20070	NORTE 88A	88	31,5	27,221	86,40%	114,584	27,897	88,60%	81,845
20080	R.REBERT345	345	31,5	31,359	99,60%	14,301	29,575	93,90%	16,35
20090	R.REBERT 88	88	40	26,208	65,50%	95,487	26,978	67,40%	71,613
20100	SUL 345	345	50	30,221	60,40%	12,429	29,791	59,60%	14,301
20110	SUL 88A	(***) 88	31,5	24,25	77,00%	114,584	31,843	101,10%	52,08
20111	SUL 88B	(***) 88	31,5	24,25	77,00%	114,584	31,844	101,10%	52,08
90000	VOLIVI-SP	345	63	31,721	50,35%	11,43	31,175	49,48%	13,617
90001	SCAETA-SP	345	63	28,288	44,90%	11,664	27,7	43,97%	13,951
90002	SCAETA-SP-88	88	40	35,86	89,65%	52,08	32,194	80,49%	57,289
90007	VOLIVI-SP-88	88	40	36,748	91,87%	57,289	32,969	82,42%	63,655

LEGENDA	
	Alerta (90% ≤ kA < 100%)
	Superado (kA ≥ 100%)
	TRT (kA ≥ 80%)

Tabela 3 – Análise de curto-circuito dos menores Disjuntores

4. CONCLUSÃO

A metodologia proposta pelo artigo indica a partir do ano de entrada em operação das novas SEs São Caetano e Vila Olívia, localizadas na região da Grande São Paulo, a instalação de dois equipamentos RLCC, de $X=30 \Omega$, a serem instalados nos barramentos de 345 kV de cada uma das SEs propostas pelo planejamento da EPE. Estes equipamentos serão responsáveis por uma redução significativa da necessidade de substituição dos disjuntores impactados diretamente pela ampliação do sistema de transmissão da região da Grande São Paulo.

Conforme apresentado nos resultados da **Tabela 2**, é significativa a influência dos equipamentos RLCC recomendados, pois são responsáveis pelo reduzido número de disjuntores sinalizados por superação, sendo apenas 2 de 345 kV e 5 de 88 kV. Sem a presença dos RLCC, são sinalizados como superados 23 disjuntores de 345 kV e 16 disjuntores de 88 kV, um total de 39 disjuntores no sistema da Grande São Paulo, considerando portanto um acréscimo 32 disjuntores, comparado com a condição com os equipamentos RLCC, para o horizonte de 2023.

Não foram realizadas análises de custos das Alternativas, mas sim uma análise quantitativa entre o número de equipamentos RLCC utilizados nas análises e o número de disjuntores sinalizados como superados e em alerta. O que já destaca a condição favorável à recomendação de instalação de equipamentos RLCC no sistema de 345 kV da Região da Grande São Paulo.

Portanto, o presente estudo foi capaz de identificar a necessidade de instalação de dois equipamentos RLCC de $X=30 \Omega$, no barramento de 345 kV, sendo um na SE São Caetano e outro na SE Vila Olívia. Com isso, a necessidade de substituição de disjuntores será de apenas 2 no setor de 345 kV da SE Norte, e 5 de 88 kV, sendo 2 na SE Leste e 3 na SE Sul.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Programa Anafas - CEPEL
- [2] Casos de Curto-Circuito de Planejamento CTEEP-ONS (PV)
- [3] Submódulo 23.3 – Tabela 1 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – ONS
- [4] Submódulo 11.3 – Tabela 1 – Estudos de curto-circuito – ONS

6. DADOS BIOGRÁFICOS

Marcos Affonso dos Santos

Nasceu em 14/02/1959 no Rio de Janeiro, Rio de Janeiro
Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Presbiteriana Mackenzie (1983)
Especialização em Sistema Elétrico de Potência pela EFEI (1989)
Trabalha na CTEEP (Planejamento da Transmissão) desde 1984.

Luiz York Giro

Nasceu em 19/02/1959 em São Paulo, São Paulo
Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade FAAP (1982)
Trabalha na CTEEP (Planejamento da Transmissão) desde 1988.

Mariana Pires Monteiro

Nasceu em 20/01/1988 em São Paulo, São Paulo
Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Presbiteriana Mackenzie (2013)
Especialização em Sistema Elétrico de Potência pela UNIFEI (2014)
Trabalha na CTEEP (Planejamento da Transmissão) desde 2012.

Rômulo Braga Broetto

Nasceu em 06/05/1985 em Osasco, São Paulo
Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Bandeirante de São Paulo (2009)
Trabalha na CTEEP (Planejamento da Transmissão) desde 2010.

Waldecy de Macedo

Nasceu em 14/08/1963 em Mogi das Cruzes, São Paulo
Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UMC (1994)
Mestrado em Sistema Elétrico de Potência pela EFEI (2001)
Trabalha na CTEEP (Planejamento da Transmissão) desde 1982.

Daniel Jose Tavares de Souza

Nasceu em 18/10/1981 no Rio de Janeiro, Rio de Janeiro
Graduou-se em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET-RJ (2005)
Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência pela COPPE/UFRJ (2011)
Trabalha na EPE (Planejamento da Transmissão) desde 2007.