



## **GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

### **FASE FLUENTE DE RECOMPOSIÇÃO: UMA VISÃO DO AGENTE DE TRANSMISSÃO**

**RAFAEL MONTES FONTOURA(1);GABRIELA RODRIGUES DA SILVA(2);RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA(1);DANIELE DE VASCONCELOS PEREIRA DA MOTTA(3);RAQUEL ALVES FERREIRA(3);SEBASTIÃO OTÁVIO MOREIRA(1)**  
**CEMIG GERACAO E TRANSMISSAO S.A(1);BRASTEL(2);OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO ONS(3)**

#### **RESUMO**

A recomposição no SIN requer um conjunto de equipamentos disponíveis, representando requisito de confiabilidade que, dentre outros, se tornam cada vez mais rigorosos. Por outro lado, intervenções que ocorrem a todo momento requerem equipamentos indisponíveis. O ambiente de antagonismo entre os dois temas influencia a forma de operar o sistema, e o quesito “flexibilidade” assume uma posição chave para o equilíbrio. Este trabalho aborda a importância da existência de alternativas para fase fluente de recomposição das áreas do sistema, sob a ótica da transmissora. São apresentadas alternativas para recomposição da área Emborcação, com simulações de regime e dinâmicas com objetivo de agregar flexibilidade ao processo.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

O setor elétrico brasileiro passa por grande transformação com a expansão do sistema de transmissão, com ampliação da capacidade de transferência de energia nas interligações, acompanhada dos diversos reforços e melhorias necessárias para adequação das novas topologias, capacidades ou simplesmente em função do fim de vida útil de equipamentos, o que se reflete em acréscimo de confiabilidade e de robustez ao sistema.

Decorrente da necessidade de implantação das obras de expansão ou de manutenções, as transmissoras e o Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS enfrentam o desafio de desligar funções transmissão (FT) do sistema em sua rotina diária. Para se ter uma ideia, cerca de 114 mil intervenções no sistema foram realizadas efetivamente em 2020, conforme contabilização do ONS apresentada em [1].

As intervenções para implantação de obras, em específico, requer atenção especial dos agentes e do Operador por envolver normalmente maiores períodos de desligamento e/ou maior tempo de retorno em emergência dos equipamentos envolvidos. Observando-se o sistema planejado até o ano 2030 na Figura 1 é possível ter uma maior dimensão da relevância deste tema.

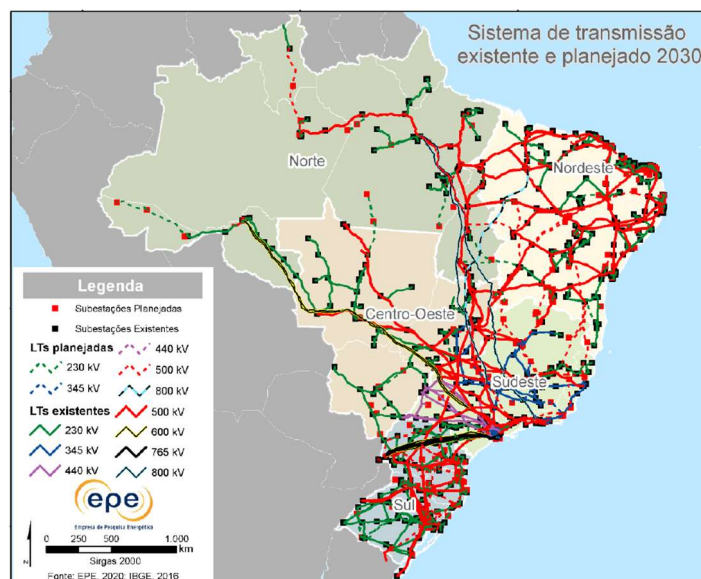


Figura 1 – Diagrama do Sistema Interligado Nacional planejado – 2030 [2].

Atualmente, o sistema possui 16 áreas de recomposição fluente apenas na região Sudeste [3], ao passo que o item 4.2 do submódulo 2.3 [4] define critérios mais restritivos para intervenções que possam inviabilizar a recomposição.

Há, portanto, um desafio para os agentes de transmissão: realizar as intervenções necessárias mesmo diante das restrições existentes. Uma forma de contornar o problema é buscar alternativas para a recomposição, reduzindo ou eliminando a dependência da recomposição em relação a um equipamento específico. Historicamente, a Cemig GT sempre buscou participar dos estudos de recomposição na área Minas Gerais e contribuir com o ONS. Neste trabalho específico, houve um foco especial na identificação de situações em que a indisponibilidade de um equipamento ou FT pudesse inviabilizar todo o corredor fluente (caracterizando uma vulnerabilidade) e, por conseguinte, proposição de procedimentos alternativos para estas situações.

Este trabalho apresenta alternativas para recomposição fluente da área Emborcação, que foram avaliadas em conjunto com o ONS, com o objetivo de agregar flexibilidade a esta área de recomposição. O estudo de tais alternativas foi possível devido à entrada de novos equipamentos de controle de tensão nesta área. Adicionalmente, são apresentados resultados de análises de regime permanente e de transitórios eletromecânicos, que foram realizados a fim de verificar o atendimento aos critérios de recomposição definidos nos procedimentos de rede [4][5].

## 2.0 RECOMPOSIÇÃO NA FASE FLUENTE

Após a ocorrência de um blecaute inicia-se o processo de recomposição do sistema elétrico, cujo objetivo é atingir, no menor tempo possível, as condições normais de operação. A fase fluente corresponde ao início do processo de recomposição quando se considera que o sistema está completamente desenergizado. A recomposição fluente ocorre de forma descentralizada e visa ao restabelecimento das cargas prioritárias dos agentes de distribuição e consumidores cujas instalações estejam conectadas à Rede Básica [5].

Nesta fase, um conjunto de equipamentos ou funções transmissão são utilizados. O processo fluente se inicia por uma usina de autorrestabelecimento integral onde um número mínimo de unidades geradoras é sincronizado. Em seguida, transformadores e linhas de transmissão são energizados, além de equipamentos de controle de tensão, sendo estes colocados em operação de forma a manter a tensão do sistema dentro de faixas adequadas em todo o processo. A tensão é transmitida até os centros de carga, normalmente localizados mais distantes da fonte de geração, sendo em um passo seguinte realizadas as tomadas de carga prioritárias atendendo ao principal objetivo dessa fase da recomposição. Na falta de recursos de controle de tensão, blocos de carga podem ser tomados ao longo do corredor, como recurso adicional. Entretanto, esta ação é evitada a fim de não inviabilizar as tomadas de cargas posteriores da área.

## 3.0 ÁREA EMBORCAÇÃO

A recomposição fluente da área Emborcação é responsável pelo restabelecimento de 390 MW no estado de Minas Gerais, distribuídos entre a malha triângulo e região metropolitana de Belo Horizonte. Esse corredor de recomposição é iniciado com a partida de pelo menos duas unidades geradoras na UHE Emborcação. Em seguida é realizada a energização de um dos transformadores 500-138 kV – 300 MVA da SE Emborcação. São energizadas linhas de distribuição e efetuada tomadas de carga na Malha Triângulo de Minas Gerais. Após três máquinas sincronizadas na UHE Emborcação é energizada a LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2. Na SE São Gotardo 2 é energizada a LT1 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2 e simultaneamente a LT2 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 e LT 500 kV Bom Despacho 3 – São Gonçalo do Pará considerando a SE Bom Despacho 3 previamente preparada para este procedimento. A partir da SE Neves 1 são realizadas tomadas de carga na região metropolitana de Belo Horizonte. Esta descrição retrata o corredor prioritário de recomposição da área Emborcação sob aspecto do caminho elétrico percorrido. A Figura 2 destaca este corredor de 500 kV desde a UHE Emborcação até a SE Neves 1.

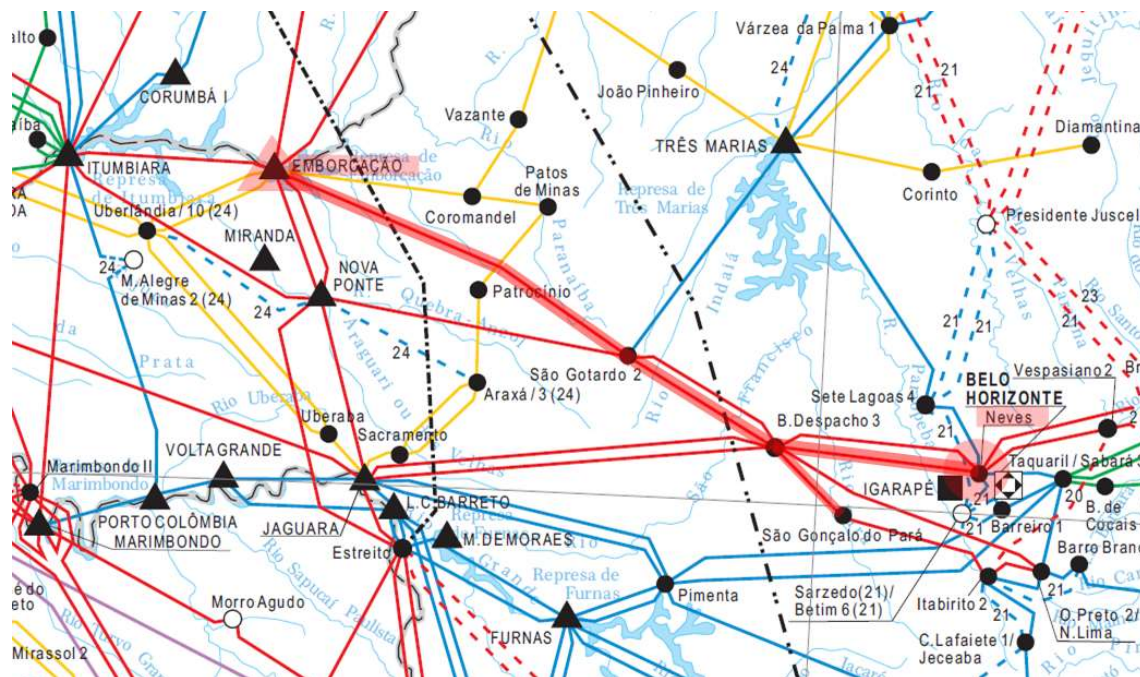


Figura 2 – Corredor prioritário de recomposição da área Emborcação (mapa fonte [6]).

Do sistema de transmissão considerado no procedimento prioritário atual são requeridos:

- SE Emborcação: Um dos reatores de 500 kV (S5 ou S6) disponível na LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2;
- LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2 disponível;
- LT1 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2 disponível;
- SE Bom Despacho 3: Dois reatores de 500 kV S19 e S18, de barra, disponíveis para operação;
- LT2 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 disponível;
- SE Neves 1: Reator S12, da LT 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 disponível;
- SE Neves 1: Transformador T5 500-138 kV disponível;
- SE São Gotardo 2: No final da fase fluente a energização para SE Três Marias requer um dos reatores de 500 kV S15 ou S16, de barra, disponível para operação.

Avaliou-se, dessa forma, os equipamentos sem redundância detalhando-se cada um deles.

Em caso de indisponibilidade da LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2 o procedimento atual é inviabilizado, pois não há alternativa para esta indisponibilidade.

Em caso de indisponibilidade do reator S12 da LT2 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 na SE Neves 1 é prevista a utilização de rota alternativa utilizando o sistema de 345 kV que interliga as subestações São Gotardo 2, Três Marias, Sete Lagoas 4 à SE Neves 1, desviando-se do eixo principal de 500 kV. Também devido a necessidade deste reator, não é possível a utilização do circuito 1 da LT 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1.

A indisponibilidade do transformador T5 da SE Neves 1 não é prevista. Já a indisponibilidade de um dos reatores da SE Bom Despacho 3 não é problema para o procedimento atual pois existe alternativa prevista ajustando-se a tensão de geração da UHE Emborcação.

A recente entrada em operação do reator S6 da SE São Gotardo 2, como recurso adicional para controle de tensão, permitiu reavaliar toda esta área de recomposição. Para a Cemig GT, a incorporação de flexibilidade a este processo é uma questão de especial interesse, pois minimiza restrições para intervenções, além de naturalmente incorporar maior confiabilidade a todo o processo. Neste contexto, foram estudadas alternativas que serão detalhadas nos próximos itens.

### 3.1 INDEPENDÊNCIA DO REATOR S12 DA SE NEVES 1 E USO DE CIRCUITOS PARALELOS

Para estudo de um novo procedimento prioritário, considerou-se a utilização dos seguintes recursos:

- SE Emborcação: Um dos reatores de 500 kV (S5 ou S6) disponível na LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2;
- LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2 disponível;
- SE São Gotardo 2: Dois reatores disponíveis, sendo um deles o reator S6 e o outro o S15 ou S16, ou, na indisponibilidade do reator S6 é prevista alternativa<sup>1</sup> utilizando-se os reatores S15 e S16;
- LT1 ou LT2 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2 disponível;
- Dois de três reatores disponíveis entre: reator S12 da SE Neves 1, reator S19 e S18 da SE Bom Despacho 3;
- LT2 ou LT1 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 disponível;
- SE Neves 1: T5 ou T4 500-138 kV disponível.

<sup>1</sup> Na alternativa à indisponibilidade do reator S6 da SE São Gotardo 2 o reator S12 da SE Neves 1 é obrigatoriamente utilizado;

A Figura 3 ilustra o uso dos recursos no procedimento prioritário analisado.

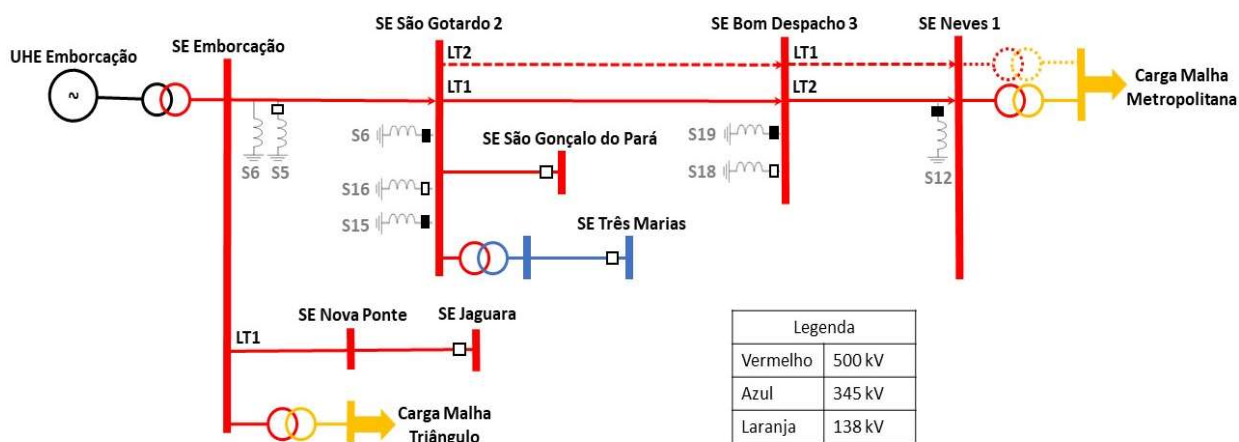


Figura 3- Recursos para o novo procedimento prioritário avaliado.

Para checar a viabilidade do procedimento foram realizadas simulações de regime permanente utilizando o programa Anarede [7] e simulação de transitórios eletromecânicos utilizando o programa Anatem [8].

Dentro desta análise, foram verificados e indicados os limites de tensão de pré-energização de linhas de transmissão, tomadas de carga, tapes de transformadores, tensão de geração, dentre outros aspectos, observando o atendimento a requisitos dos procedimentos de rede para cada etapa do processo. Algumas das simulações consideradas de maior importância estão apresentadas neste trabalho.

A Figura 4 apresenta tensões (em pu) durante energização aplicada em um instante qualquer adotado  $t=10s$  na SE São Gotardo 2 da LT1 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2, estando os reatores S18 e S19 previamente conectados na SE Bom Despacho 3, da LT 500 kV Bom Despacho 3 – São Gonçalo do Pará e da LT1 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1, sem a utilização do reator S12 da SE Neves 1. Foi verificado nesta simulação que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados nos procedimentos de rede [4].

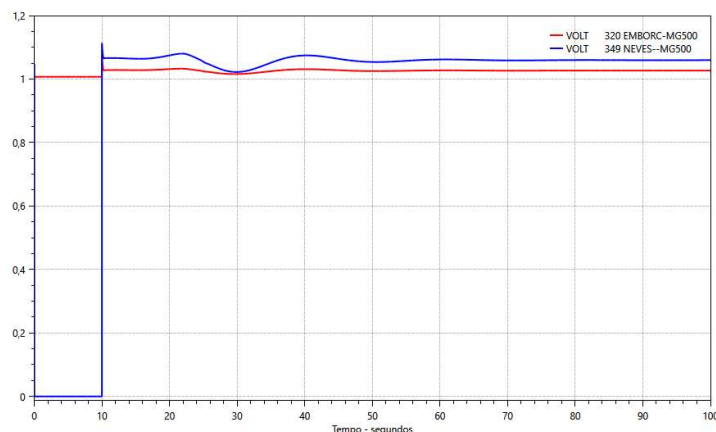


Figura 4 – Tensões durante energização das LT 500 kV a partir da SE São Gotardo 2, até Neves e S. G. do Pará.

Após a SE Neves 1 receber tensão em seu barramento de 500 kV, é realizada energização de um transformador 500-138 kV com tomada simultânea do primeiro e maior bloco de carga da malha metropolitana. A Figura 5 apresenta tensões (em pu) durante a energização aplicada no instante de simulação  $t=10$ s. Foi verificado nesta simulação que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados nos procedimentos de rede.

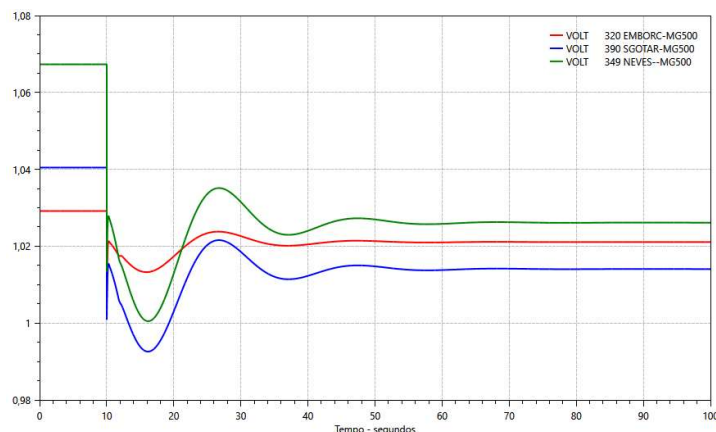


Figura 5 – Tensões durante tomada de carga na SE Neves 1.

Portanto, considerando os recursos utilizados, as simulações demonstraram ser possível eliminar a necessidade de utilização do reator manobrável S12 da LT2 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1. Como consequência, a não utilização deste reator abre a opção de se utilizar um circuito ou outro da LT 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1. Por sua vez, a flexibilidade na utilização de um dos circuitos da LT 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1, considerando a configuração da SE Neves 1, abre a possibilidade de se utilizar o transformador T5 ou o transformador T4 na SE Neves 1. Adicionalmente, a flexibilidade na utilização de um circuito ou outro da LT 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2 foi prevista.

A inclusão de todas essas flexibilidades no corredor de 500 kV minimiza sobremaneira a necessidade de se utilizar a rota alternativa pelo sistema de 345 kV até a SE Neves 1, sendo este um benefício complementar já que o corredor de 500 kV tem envolvimento de um menor número de subestações, portanto, mais direto.

### 3.2 ALTERNATIVA PARA INDISPONIBILIDADE DA LT 500 KV EMBORCAÇÃO – SÃO GOTARDO 2

Atualmente, a indisponibilidade programada ou não programada da LT 500 KV Emborcação – São Gotardo 2 é considerada crítica, pois ela inviabiliza toda a fase fluente de recomposição da área Emborcação. Por este motivo, intervenções envolvendo a indisponibilidade desta linha de transmissão são avaliadas com especial atenção e rigor, principalmente se o tempo previsto para retorno em emergência da LT é longo, sendo comum a necessidade de minimizar o seu período ou modificar a forma de realização da intervenção.

A alternativa avaliada para este caso é a utilização de linhas que interligam as subestações de Emborcação e São Gotardo 2 passando pela SE Nova Ponte. A partir da SE São Gotardo 2 é mantido o mesmo caminho elétrico até a SE Neves 1. A Figura 6 ilustra o caminho da alternativa.



Figura 6 – Alternativa à indisponibilidade da LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2.

Os recursos adicionalmente previstos para esta alternativa são:

- LT1 500 kV Emborcação – Nova Ponte disponível;
- SE Nova Ponte: Reator S4, de barra, disponível;
- LT 500 kV Nova Ponte – São Gotardo 2 disponível.

Da SE São Gotardo 2 em diante os recursos utilizados são os mesmos do procedimento prioritário, onde se restringiu o uso de equipamentos definidos como preferenciais pelo fato de já se tratar de uma alternativa perante uma indisponibilidade, evitando-se múltiplas combinações que poderiam tornar excessivamente complexo o procedimento. Neste ponto, buscou-se simplificar o procedimento para ganho de agilidade nas ações.

A

Figura 7 apresenta tensões (em pu) durante energização aplicada em um instante qualquer adotado  $t=10s$  na SE Emborcação da LT1 500 kV Emborcação – Nova Ponte, do reator S4 da SE Nova Ponte, da LT 500 kV Nova Ponte – São Gotardo 2 e do reator S6 da São Gotardo 2, estando a SE Nova Ponte e SE São Gotardo 2 previamente preparadas para este procedimento. Foi verificado nesta simulação que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados nos procedimentos de rede [4].

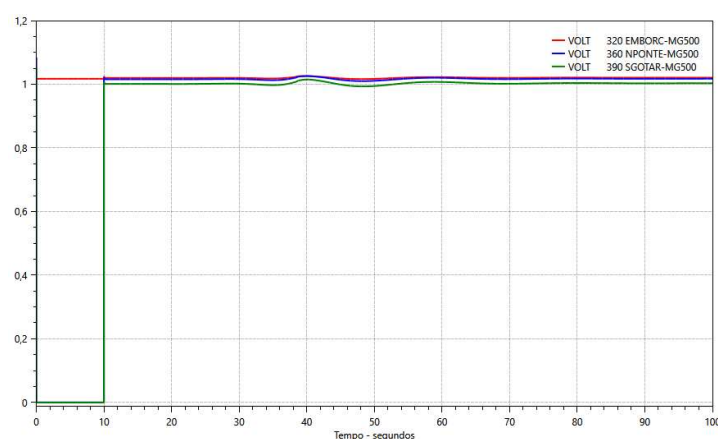


Figura 7- Tensões durante energização do tronco Emborcação / Nova Ponte / São Gotardo 2 a partir da SE Emborcação em caminho alternativo.

Após a SE São Gotardo 2 receber tensão em seu barramento de 500 kV, é realizada energização do reator S15 da SE São Gotardo 2, da LT1 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2, do reator S18 ou S19 da SE Bom Despacho 3, da LT 500 kV Bom Despacho 3 – São Gonçalo do Pará e da LT2 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1 com reator

S12, estando a SE Bom Despacho 3 previamente preparada para este procedimento. A Figura 8 apresenta tensões (em pu) durante a energização aplicada no instante de simulação  $t=10s$ . Foi verificado nesta simulação que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados nos procedimentos de rede.

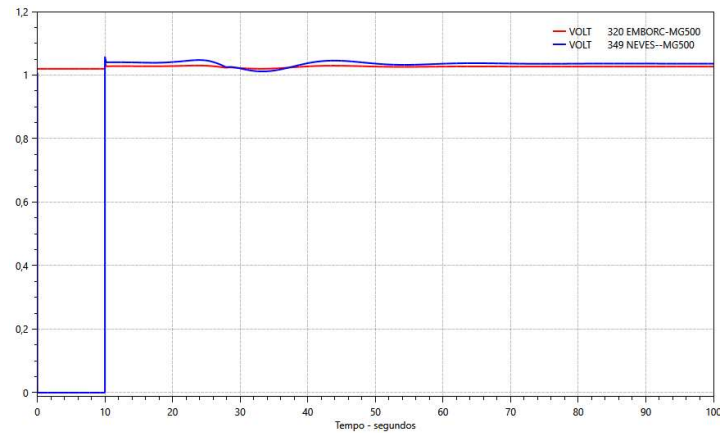


Figura 8 - Tensões durante energização das LT 500 kV a partir da SE São Gotardo 2, até Neves e S. G. do Pará em caminho alternativo.

Após a SE Neves 1 receber tensão em seu barramento de 500 kV, é realizada energização de um transformador 500-138 kV com tomada simultânea do primeiro e maior bloco de carga da Malha Metropolitana. A Figura 9 apresenta tensões (em pu) durante a energização aplicada no instante de simulação  $t=10s$ . Foi verificado nesta simulação que as tensões permaneceram dentro dos limites recomendados nos procedimentos de rede.

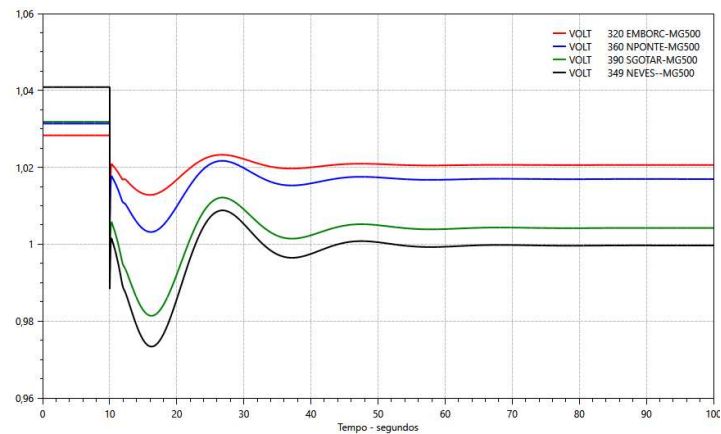


Figura 9 - Tensões durante tomada de carga na SE Neves 1 em caminho alternativo.

A Figura 10 apresenta a variação de frequência da área Emborcação durante a mesma tomada de carga.

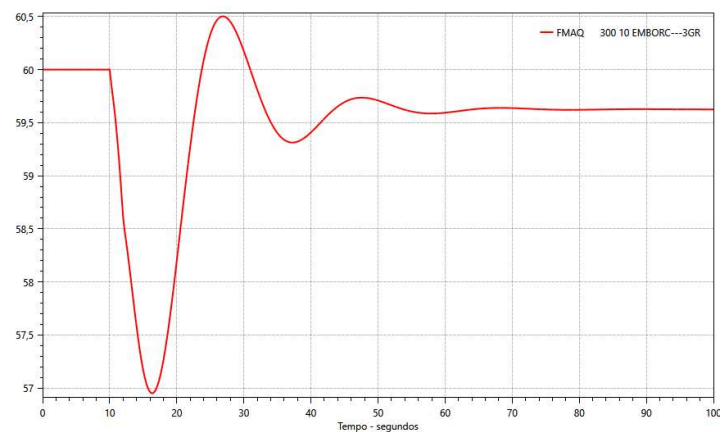


Figura 10 – Frequência durante tomada de carga na SE Neves 1 em caminho alternativo.

As simulações realizadas confirmaram ser viável a adoção de um caminho alternativo utilizando-se linhas de transmissão que interligam a SE Emborcação à SE São Gotardo 2 passando pela SE Nova Ponte. A inclusão da alternativa no procedimento vigente de recomposição retira o caráter essencial de disponibilidade da LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2.

#### 4.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de alterações na fase fluente da área Emborcação, com inclusão de redundâncias de equipamentos e alternativas utilizando um novo conjunto de recursos com o objetivo de agregar flexibilidade a todo o processo. O estudo de tais alternativas foi possível devido à entrada em operação de um novo equipamento de controle de tensão nesta área - o reator S6 da SE São Gotardo 2. Foram apresentados resultados e análises realizadas pela Cemig GT em conjunto com o ONS a fim de verificar o atendimento aos critérios de recomposição definidos nos procedimentos de rede [4].

As principais alterações em relação ao procedimento vigente podem ser listadas a seguir: i) No corredor prioritário apresentado o uso do reator S12 da SE Neves 1 deixa de ser obrigatório. ii) Nos circuitos duplos foi incluída a possibilidade de se utilizar tanto o circuito 2 como o circuito 1 da LT 500 kV Bom Despacho 3 – Neves 1, da mesma forma que o circuito 1 ou o circuito 2 da LT 500 kV Bom Despacho 3 – São Gotardo 2. iii) A impossibilidade de realizar a recomposição estando a LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2 indisponível foi discutida, sendo apresentado um estudo de caminho alternativo pela SE Nova Ponte, retirando com isso a obrigatoriedade da LT 500 kV Emborcação – São Gotardo 2.

A definição prévia de redundância ou alternativas que torne possível a recomposição, mesmo diante da eventual indisponibilidade de uma função transmissão é uma questão relevante para os agentes, pois pode viabilizar a realização de intervenções necessárias a implantação de ampliações, reforços e melhorias ou manutenção de equipamentos. Além disso, agrega maior flexibilidade e confiabilidade à operação.

#### 4.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Indicadores Intervenções - Ano 2020 - Sintegre.
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.
- [3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Submódulo 5.12 – Instruções de Operação.
- [4] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos (Critérios). Revisão 2021.06.
- [5] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, Submódulo 5.8 – Recomposição da Rede de Operação. Revisão 2020.12.
- [6] SITE: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Sistema-Eletrico-Brasileiro.aspx>
- [7] ANAREDE - Programa de Análise de Redes (de propriedade do CEPEL-RJ)
- [8] ANATEM - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (de propriedade do CEPEL-RJ)



## DADOS BIOGRÁFICOS



RAFAEL MONTES FONTOURA é natural de Muriaé-MG, nascido em 1979, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2003 tendo concluído o mestrado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição em 2006. Trabalha na Cemig Geração e Transmissão SA desde 2006, atuando na área de Planejamento Elétrico. Atuou ou tem experiência nas áreas de Geração e Planejamento Elétrico da Transmissão.

## (2) GABRIELA RODRIGUES DA SILVA

GABRIELA RODRIGUES DA SILVA é natural de Belo Horizonte/MG, nascida em 1994, graduada em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 2017 e Pós Graduada em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais em 2021. Trabalha na empresa Brasil Serviços de Telecomunicações SA a serviço da Cemig Geração e Transmissão SA desde 2020, onde atua na área de Planejamento Elétrico da Operação e tem experiência nesta área desde 2019.

## (3) RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA

RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA é natural de Belo Horizonte, nascido em 1987, graduado em Engenharia Industrial Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 2010, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2017. Trabalha na Cemig Geração e Transmissão SA desde 2014, onde atuou na área de Regulação Econômica e Financeira por mais de 3 anos e na área de Planejamento Elétrico desde 2017.

## (4) DANIELE DE VASCONCELOS PEREIRA DA MOTTA

Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ (1999), Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (2005), e possui os seguintes cursos de pós-graduação: Proteção de Sistemas Elétricos pela Escola Politécnica da UFRJ (2007) e IAG Master em Desenvolvimento Gerencial - ONS pelo IAG PUC-Rio (2013). Desde 1999 trabalha no ONS, na Gerência de Estudos Especiais, desenvolvendo principalmente estudos elétricos relacionados a análises pré-operacionais, recomposição do SIN, SEPs, dentre outros.

## (5) RAQUEL ALVES FERREIRA

RAQUEL ALVES FERREIRA, brasileira, nascida no ES em 1994, engenheira eletricista pelo CEFET/RJ (2019) e mestranda em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia, pela COPPE/UFRJ. Trabalha no ONS desde 2019 na Gerência de Estudos Especiais. Área de atuação: análise de sistemas de potência.

## (6) SEBASTIÃO OTÁVIO MOREIRA

SEBASTIÃO OTÁVIO MOREIRA, graduado em Engenharia Elétrica pela PUC/MG de Belo Horizonte em 2000 e pós-graduação em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência pela UFMG em 2005. Trabalha na CEMIG desde 1984 na operação de estações e sistema e desde 2002 como Engenheiro de Planejamento Elétrico na CEMIG Geração e Transmissão, atuando na realização de estudos de transitórios eletromagnéticos, para especificação de equipamentos de geração e transmissão, comissionamento, análise de eventos e definição de procedimentos na operação dos equipamentos e sistema elétrico.