

Análise do Melhoramento da Estabilidade do Sistema Elétrico Isolado de Roraima após a Introdução de uma Nova Matriz Geradora

Marcos Fellipe de Souza Ribeiro*. Geraldo Caixeta Guimarães*.
Thales Lima Oliveira*. Samuel Souto de Oliveira*

*Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica,
Brasil, (email:marcos.fellipe@ufu.br, gcaixeta@ufu.br, thales@ufu.br, samuel.souto@ufu.br)

Abstract: The stability of an electrical system guarantees the quality in which electrical energy will be supplied to the final consumer in an uninterrupted manner. Stability studies and analyzes must be carried out on a steady-state and transient-state basis in order to promote mitigating solutions for existing risks. This article aims to analyze the stability of the isolated electrical system in Roraima, which since 2019 has started an energy transition process from a diesel-fuel generation matrix to a diversified generator park using biomass and natural gas. Several transient stability studies were carried out to perform comparisons between the current and former generation facilities. The results obtained have shown that the frequency stability of the isolated electrical system in Roraima, after the energy transition, is now much more stable and reliable.

Resumo: A estabilidade de um sistema elétrico garante a qualidade em que a energia elétrica será fornecida ao consumidor final de modo ininterrupto. Estudos e análises de estabilidade devem ser realizados em regimes permanente e transitório com a finalidade de promover soluções mitigatórias de riscos existentes. Este artigo visa analisar a estabilidade do sistema elétrico isolado de Roraima, que desde 2019 iniciou um processo de transição energética de uma matriz geradora com combustível a óleo diesel para um parque gerador diversificado utilizando biomassa e gás natural. Vários estudos de estabilidade transitória foram realizados para efetuar comparações de desempenho entre o parque gerador atual e antigo. Os resultados obtidos mostraram que a estabilidade de frequência do sistema elétrico isolado de Roraima, após a transição energética, é agora muito mais estável e confiável.

Keywords: Transient stability analysis; Energy transition; Isolated electrical system; Electrical Reliability, Power flow simulation

Palavras-chaves: Análise de estabilidade transitória; Transição energética; Sistema elétrico isolado; Confiabilidade elétrica; Simulação de fluxo de potência

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, existem 212 localidades isoladas no Brasil. A maior parte está na região Norte, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. Entre as capitais, Boa Vista (RR) é a única que ainda é atendida por um sistema isolado. (Operador Nacional Do Sistema Elétrico 2019).

De acordo com plano anual da operação elétrica dos sistemas de transmissão localizados nos sistemas isolados de 2020 (PEL SISOL 2020), elaborado pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, de 2001 até março de 2019, o suprimento de energia elétrica ao Estado de Roraima foi realizado predominantemente pela Interligação em 230 kV Brasil com o sistema de potência da Venezuela e complementado por meio da geração térmica local, movida a óleo diesel, com a demanda máxima verificada em abril de 2019 de 206,6 MW. Ressalta-se que em 2017 e 2018, aproximadamente 85% do consumo de Roraima foi suprido pela energia advinda do sistema

elétrico Venezuelano (Operador Nacional Do Sistema Elétrico 2019).

De Castro (2020) em seu estudo sobre o caso Roraima, afirma que a crescente precariedade do fornecimento venezuelano, derivada da instabilidade política, impôs à população de Roraima a convivência com uma alta frequência de interrupções e instabilidade no fornecimento de eletricidade (De Castro, Moszkowicz, Alves 2020).

Em março de 2019 houve o interrompimento definitivo do fornecimento da Venezuela, levando o acionamento de usinas termoeletricas à óleo diesel, com custo muito elevado e altos níveis de emissões de gás carbônico. Frente a este cenário crítico de insegurança energética, alto custo de geração de energia e níveis altos de poluição, o governo brasileiro, por meio da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, realizou em 2019 um leilão emergencial de contratação de energia nova com intuito de realizar uma transição energética no parque gerador do Estado, levando assim a um aumento da

segurança e da independência energética. Com o resultado do leilão, nove projetos foram contratados para substituição da matriz energética vigente em 2019.

Com a saída da interligação em 230 kV Brasil-Venezuela e a substituição do parque gerador no Estado de Roraima, desde então se faz necessário estudos e análises de estabilidade do parque gerador considerando as novas instalações e possíveis cenários de perturbações no sistema.

Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo avaliar a estabilidade transitória do sistema isolado de Roraima (SISOL-RR) e verificar o tempo de resposta para estabilização após uma perturbação. Segundo Oliveira (2019, p.35), o estudo de estabilidade transitória busca analisar a resposta de recuperação de uma rápida e brusca perturbação sob o domínio no tempo.

Os estudos são realizados através de dois casos, conforme os parágrafos a seguir.

O primeiro estudo de caso será análise de estabilidade de frequência em regime transitório considerando o parque gerador de 2020 logo após a interrupção definitiva da interligação em 230 kV Brasil-Venezuela com cenários de corte de carga e perda de geração a fim de verificar a confiabilidade do Sistema Isolado de Roraima (SISOL-RR) da época.

O segundo estudo de caso consiste em analisar a estabilidade em regime transitório do parque gerador projetado após a substituição da matriz energética considerando as novas instalações no SISOL-RR. Serão verificados cenários similares de corte de carga e perda de geração do primeiro caso.

Para as simulações dos casos se utilizou dados públicos dos agentes de geração, distribuição e transmissão do SISOL-RR disponibilizados pelo ONS.

2. ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Cada vez mais a sociedade tem demandado o uso de energia elétrica em suas atividades diárias. Sistemas elétricos de potência tem sido forçado a trabalhar com confiabilidade na entrega de energia para seus consumidores, operando em seus limites de estabilidade. Isto ocorre em razão do crescimento contínuo da demanda e de dificuldades de instalação de novas linhas de transmissão e unidades geradoras.

A confiabilidade de um sistema elétrico é medida pela capacidade do sistema funcionar numa situação de equilíbrio em condições normais e de perturbação. O sistema é dito estável se após a ocorrência destas perturbações continuar a funcionar em sincronismo.(Barbosa 2013)

O estudo sobre estabilidade de potência pode ser realizado em regime permanente de estabilidade onde o sistema responde a pequenas oscilações por um longo período, no qual é avaliado a frequência no domínio do tempo ($\Delta f/\Delta t$), ou em regime transitório onde o sistema responde a grandes perturbações em

um curto período e até a sua recuperação para o estado permanente.

O estudo de estabilidade em sistemas elétricos de potência se divide em: estabilidade angular, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão (Kundur et al. 2004).

2.1 Estabilidade de frequência

A estabilidade de frequência refere-se à capacidade de um sistema elétrico de potência manter a frequência após a ocorrência de uma grande perturbação, resultando num desequilíbrio entre a geração e a carga. Dependerá da capacidade do sistema para restaurar o equilíbrio entre a produção e a geração, com o mínimo de perdas de cargas (Kundur et al. 2004).

Em situação de subfrequência, em alguns sistemas, é adotado relés de proteção para corte de carga em valores pré-estabelecidos visando minimizar os efeitos de baixa frequência nos geradores.

No Sistema Interligado Nacional (SIN) nomeia-se essa proteção com a sigla ERAC, que significa “Esquema Regional de Alívio de Carga”.

O ERAC efetua o corte automático de cargas por meio de atuadores, como relés. Quando é detectada uma taxa de variação de frequência no tempo ($\Delta f/\Delta t$), desliga-se, assim, cargas previamente estabelecidas (sendo que em cada estágio a porcentagem de corte segue um determinado valor de subfrequência) conforme o quadro abaixo (Operador Nacional Do Sistema Elétrico 2019):

Tabela 1. Estágio de ERAC SISOL RR

Estágio	Frequência Hz	Corte de Carga (%)
1º	59,2	9
2º	58,9	9
3º	58,6	11
4º	58,2	11

“Geralmente, problemas de estabilidade de frequência estão associados a inadequações nas respostas dos equipamentos, má coordenação dos equipamentos de controle e de proteção ou reserva de geração insuficiente.”(Kundur et al. 2004, p.6, tradução nossa).

A observação do comportamento da frequência permite inferir sobre o modo de funcionamento das máquinas de um sistema elétrico. Nos estudos e na operação dos sistemas essa grandeza elétrica varia numa estreita faixa cujos limites não devem ser violados para não acarretar a perda de sincronismo de algumas máquinas.(Siqueira 2016)

3. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE ESTABILIDADE

3.1 Coleta de dados históricos de geração SISOL RR

Desde 2017 o ONS assumiu o planejamento de operações dos sistemas isolados do Brasil, inclusive o de Roraima (Operador Nacional Do Sistema Elétrico 2019) . Desde então são

coletados dados históricos de operação do SISOL RR em todos os patamares de carga para estudos de estabilidade do sistema, bem como para o planejamento energético.

As bases de dados para este estudo foram coletadas no portal SINtegre, que é um portal público do ONS, disponível para sociedade e agentes do setor elétrico. As bases são de eventos históricos e estão no formato do software desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) para análise de fluxo de potência (via o *software* Anarede) e para análise não linear de transitórios eletromagnéticos (via o *software* Anatem).

3.2 Configuração do SISOL RR 2020

Após o interrompimento do fornecimento pela interligação em 230 kV Brasil -Venezuela em 2019, o suprimento de energia elétrica foi acionado, de forma emergencial, as usinas termoeletricas (UTE) a óleo diesel até então desativadas. O parque gerador de Roraima ficou com a seguinte Configuração de potência instalada:

Tabela 2. Potência instalada SISOL RR 2020

Usina	Potência Instalada	Combustível
UTE Monte Cristo	125,1 MW	Óleo Diesel
UTE Monte Cristo II	28,5 MW	Óleo Diesel
UTE Floresta	40 MW	Óleo Diesel
UTE Distrito	40 MW	Óleo Diesel
UTE Novo Paraíso	12 MW	Óleo Diesel
Total	245,6 MW	-

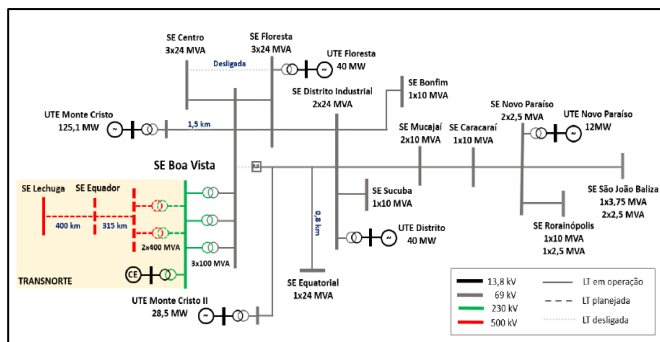


Figura 1 Diagrama Unifilar SISOL 2020

Nesta Configuração, o controle de frequência é realizado por todas as usinas em conjunto com a regulação isócrona da UTE Monte Cristo que detém a maior potência instalada do Estado. (Operador Nacional Do Sistema Elétrico 2022).

Para melhorar a confiabilidade do SISOL RR e melhorar o desempenho dinâmico das perturbações de perda de bloco de geração, foi implementado o ERAC conforme Tabela 1.

Conforme estudos de planejamento do ONS, a carga projetada para o ano de 2020 no patamar de carga pesada é de 224,3 MW tendo 20 MW de reserva girante. Abaixo podemos verificar o planejamento em outros patamares de carga:

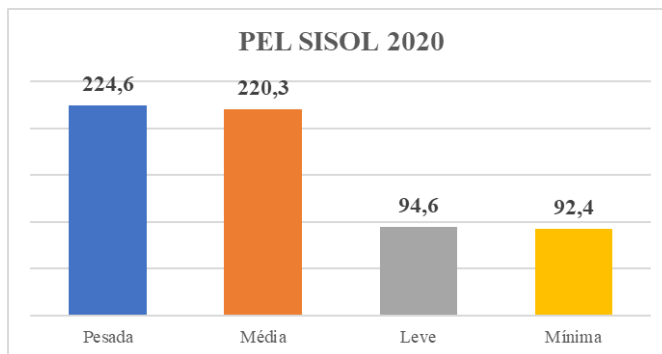


Figura 2 Planejamento de Carga do Sistema Elétrico de Roraima 2020

3.3 Configuração do SISOL RR 2023

Em 31 de maio de 2019, ocorreu o Leilão de Geração nº 01/2019-ANEEL para o SISOL RR. Neste leilão foram vencedores nove empreendimentos para a substituição da matriz energética do Estado.

De acordo com plano anual da operação elétrica dos sistemas de transmissão localizados nos sistemas isolados de 2023 (PEL SISOL 2023), o sistema de Roraima se encontra em um processo de transição do parque gerador, com a seguinte Configuração de potência instalada:

Tabela 3. Potência instalada SISOL RR 2023

Usina	Potência Instalada	Combustível
UTE Monte Cristo	125,1 MW	Óleo Diesel
UTE Monte Cristo II	28,5 MW	Óleo Diesel
UTE Floresta	40,0 MW	Óleo Diesel
UTE Distrito	40,0 MW	Óleo Diesel
UTE Novo Paraíso	12,0 MW	Óleo Diesel
UTE Jaguarica II	140,0 MW	Gás Natural
UTE Bonfim	8,1 MW	Biomassa
UTE Cantá	8,1 MW	Biomassa
UTE Pau Rainha	8,1 MW	Biomassa
UTE Santa Luz	8,1 MW	Biomassa
PCH Jatapu	5,0 MW	Hidroelétrica
UTE Palmaplan Energia 2	11,5 MW	Bio Massa
UTE Monte Cristo Sucuba	42,3 MW	Óleo Diesel
Total	476,8 MW	-

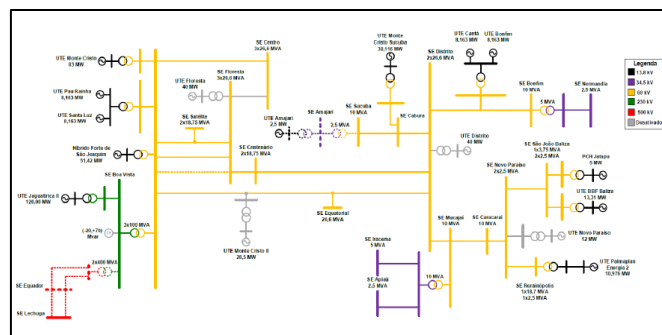


Figura 3 Diagrama Unifilar SISOL 2023

Atualmente, a regulação secundária de frequência no Sistema Roraima é realizada pela UTE Monte Cristo, que opera com modo de controle isócrono, por meio de seu regulador de velocidade utilizando um estatismo nulo.

Para a operação do Sistema Roraima em 2023, por recomendação do ONS, o controle de frequência em regime normal de operação fique sob responsabilidade da UTE Jaguatirica II, usina de menor custo operativo e maior capacidade do novo parque gerador.

Conforme estudos de planejamento do ONS, a carga projetada para o ano de 2023 no patamar de carga pesada é de 219,7 MW tendo 20 MW de reserva girante. Abaixo podemos verificar o planejamento em outros patamares de carga:



Figura 4 Planejamento de Carga do Sistema Elétrico de Roraima 2023

4. ESTUDO DE CASO: ESTABILIDADE TRANSITÓRIA SISOL RR

4.1 Caso 1: SISOL RR 2020 - Perda de geração da UTE Floresta 40 MW

Para este caso de referência considera-se o patamar de carga pesado do SISOL RR 2020 com a Configuração do parque gerador da Tabela 2. Antes da perturbação o sistema está em equilíbrio com geração total em 216 MW e a UTE Floresta com geração de 40 MW.

Adotou-se o instante de 1 segundo como sendo o marco inicial para ocorrência da perda de geração da UTE Floresta.

De acordo com a simulação realizada, obtém-se os seguintes eventos após a perda de geração de 40 MW da UTE Floresta:

- i) em $t = 1,211$ segundos, atuação do ERAC estágio 1 por subfrequência absoluta do sistema de 59,22 Hz,
- ii) em $t = 1,332$ segundos, atuação do ERAC estágio 2 por subfrequência absoluta do sistema de 58,92 Hz,
- iii) em $t = 1,361$ segundos, rejeição de carga de 9% ou 18,9 MW do sistema,
- iv) em $t = 1,482$ segundos, rejeição de carga de 9% ou 18,9 MW do sistema.

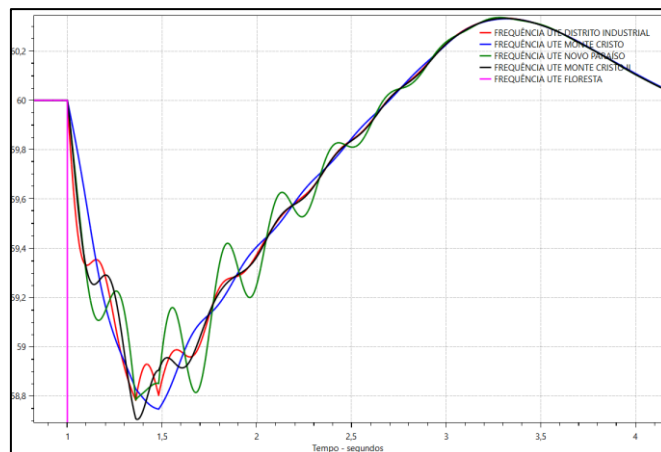


Figura 5 Frequência das UTE do SISOL RR 2020 após perda de geração da UTE Floresta

Nota-se que no instante 1 segundo houve uma queda súbita da frequência dos geradores remanescentes no sistema devido ao desequilíbrio entre o torque mecânico da carga do sistema e o torque elétrico dos geradores ($T_m > T_e$) causando desaceleração das máquinas. Somente após a segunda rejeição de carga no instante 1,482s, a frequência do sistema retornou à estabilização próximo dos 60 Hz iniciais com a atuação dos reguladores de velocidades dos geradores sincronizados.

Na Fig. 4, observa-se no instante 1s, os geradores remanescentes se sensibilizam com a perda de geração da UTE Floresta realizando um controle primário de geração nos primeiros segundos após a perturbação.

Após a atuação do ERAC estágio 2, as UTE Novo Paraíso, Monte Cristo II, e Distrito Industrial retornam aos seus patamares de carga inicial e a UTE Monte Cristo realiza o controle secundário do sistema, elevando sua geração de 100MW iniciais para 108MW, contribuindo para o restabelecimento do sistema em 60Hz.

Na Fig. 5 evidencia-se o afundamento de tensão no instante da perda de geração da UTE Floresta. Esse afundamento de tensão é esperado pois o sistema se encontra em sobrecarga logo após a perda de geração.

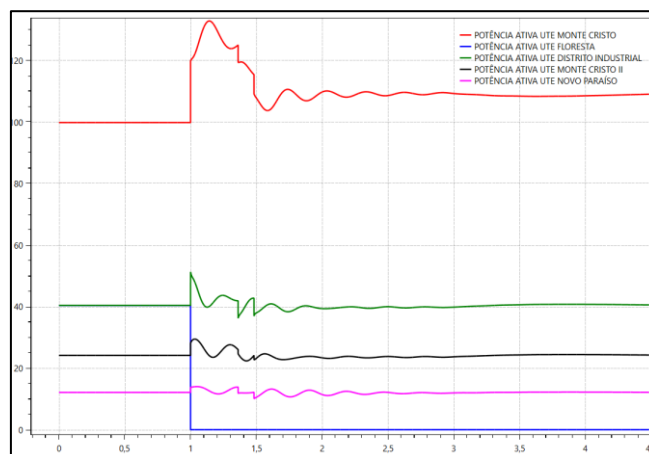


Figura 6 Potência ativa das UTE do SISOL RR 2020 após perda de geração da UTE Floresta.

A atuação correta do regulador de tensão nos geradores remanescentes foi fundamental para retornar a sua estabilidade. Nos instantes 1,361s e 1,482s observa-se o amortecimento da tensão após os alívios de carga pelo ERAC até sua estabilização. A tensão mais baixa cai pra menos de 0,95 p.u.

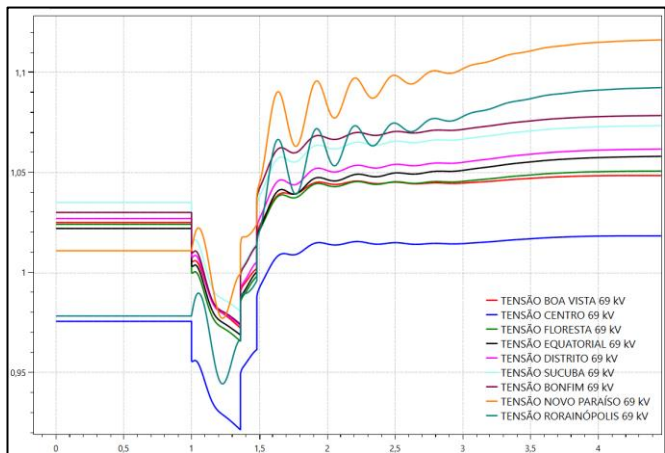


Figura 7 Tensão nos barramentos do SISOL RR 2020 após perda de geração da UTE Floresta.

Quando analisamos a linearidade do sistema nos primeiros segundos após a perturbação, nota-se que há grande variação de amplitude dos ângulos δ , em que δ é o ângulo de carga dos geradores.

Na Fig. 6 podemos observar grandes variações do ângulo δ dos geradores remanescentes no sistema evidenciando a dificuldade do sistema retornar à estabilidade. Somente após a atuação do ERAC o ângulo δ tende a estabilizar.

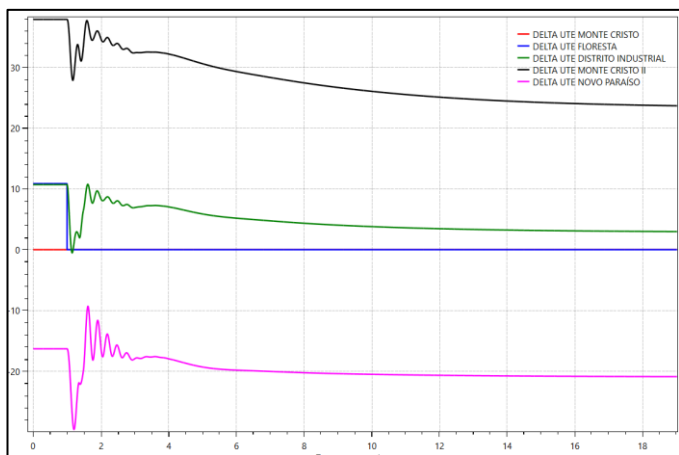


Figura 8 Ângulo dos geradores remanescentes SISOL RR 2020 após perda de geração da UTE Floresta.

4.2 Caso 2: SISOL RR 2023 - Perda de geração da UTE Monte Cristo Sucuba 40 MW

Para este caso de referência consideramos o patamar de carga pesado do SISOL RR 2023 com a Configuração do parque gerador da Tabela 3. Antes da perturbação o sistema está em equilíbrio com geração total em 206 MW. Para fins de análise comparativa com o Caso 1, iremos rejeitar geração da UTE Monte Cristo Sucuba de 40 MW do sistema.

Neste cenário, as UTE Monte Cristo II, UTE Novo Paraíso, UTE Distrito e UTE Floresta não estão despachadas, atendendo o plano de transição da matriz geradora proposta no leilão de 2019.

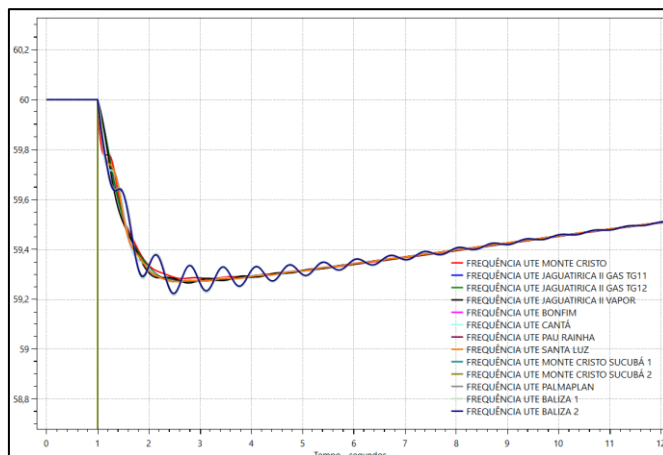


Fig. 9 Frequência das UTE do SISOL RR 2023 após perda de geração da UTE Monte Cristo Sucuba

A subfrequência no instante 1s é bem similar com o primeiro caso no momento da rejeição de geração da UTE Monte Cristo Sucuba (Fig. 7). No instante 2,5s a frequência atinge seu menor valor após a perturbação em valor absoluto de 59,22Hz.

De acordo com o relatório de simulação do software não foi atuado o ERAC em nenhum momento. Evidencia-se na Fig. 7 que a frequência chega próximo ao nível de atuação do 1º estágio do ERAC (59,2Hz) e logo se restabelece retornando para sua estabilidade.

Nos primeiros 2 segundos da perturbação, usinas remanescentes no sistema colaboração com regulação primária da geração enquanto a as unidades UG11 e UG12 da UTE Jaguatirica II realizam o controle secundário com tendência de elevação de potência ativa até a estabilização da frequência em 60Hz (Fig. 8).

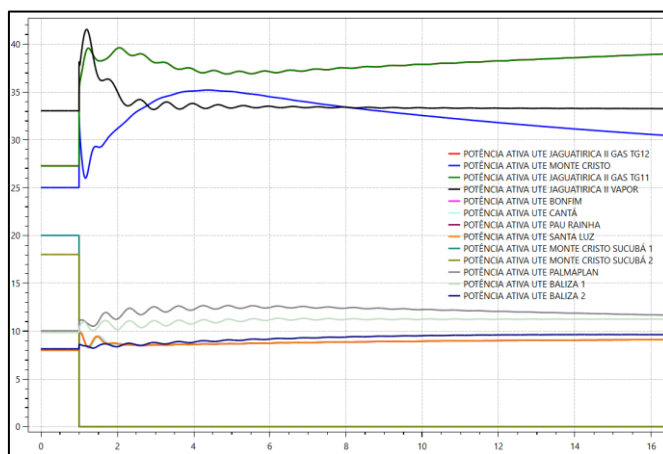


Figura 10 Potência ativa das UTE do SISOL RR 2023 após perda de geração da UTE Monte Cristo Sucuba

Na Fig. 9, nota-se afundamento de tensão muito similar ao Caso 1, porém com amplitudes de variação baixas,

evidenciando um amortecimento no afundamento de tensão logo após a regulação do sistema. A tensão de barramento acima de 0,95.

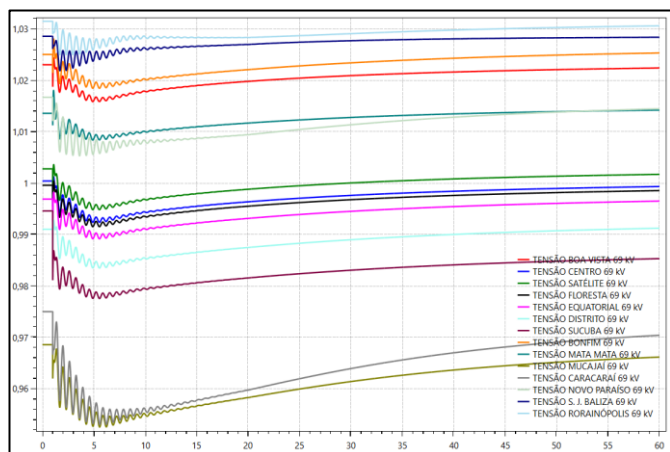


Figura 11 Tensão nos barramentos do SISOL RR 2023 após perda de geração da UTE Monte Cristo Sucuba.

Analisando a estabilidade angular dos SISOL RR 2023, conforme já definido no tópico 2, podemos observar na Fig. 10 que ocorre menos variação do ângulo δ logo após a perturbação do sistema, e logo retornando para estabilidade do sistema, sem atuação de alívio de carga, evidenciando que o sistema é muito mais confiável para grandes perturbações e tem capacidade de manter as máquinas sincronizadas durante transitórios.

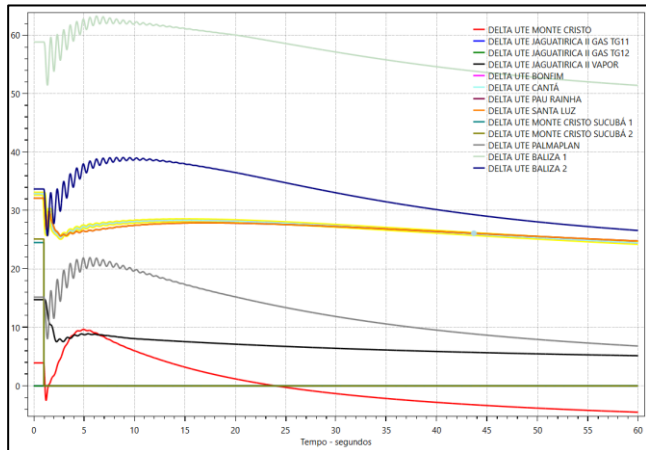


Figura 12 Ângulo dos geradores remanescentes SISOL RR 2023 após perda de geração da UTE Monte Cristo Sucuba

6. CONCLUSÕES

Nos dois casos apresentados foram realizados rejeição de carga de 40MW de usinas térmicas similares e no mesmo patamar de carga do sistema com a finalidade de criar cenários de grandes perturbações no SISOL RR e avaliar o comportamento da estabilidade no parque gerador antigo de 2020 e no parque gerador atual 2023. O parque de geração antigo em face de perturbação apresentou frequência 58,92Hz, tensões abaixo de barramento abaixo de 0,95 p.u., variações bruscas no ângulo delta. Este necessitou da atuação de dois estágios do ERAC. O parque de geração novo diante da mesma

perturbação apresentou frequência mínima de 59,22Hz, tensões acima de 0,95 p.u. e variações menos bruscas do ângulo δ mesmo com sobrecarga após a perturbação levemente maior que no Caso 1. Baseados nas análises dos dois casos, evidencia-se que a transição energética proposta no Leilão ocorrido em 2019, proporcionou a adição de usinas ao sistema com controle de velocidade e tensão muito mais eficientes que o parque gerador anterior gerando mais confiabilidade ao sistema e diminuindo os riscos de interrupção no fornecimento de energia elétrica ao Estado de Roraima. Para estudos futuros, o tema ainda poderá ser amplamente abordado, principalmente no âmbito do controle de geração automático, uma vez que não há implementação do mesmo no SISOL RR. Estudos e modelagem para otimização do sistema isolado considerando outros barramentos de referência cabem mais análises.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, F. Maciel. (2013). Estabilidade De Sistemas Elétricos De Energia.
- De Castro, Nivalde; Moszkowicz, Mauricio; Alves, André. (2020). Transição Energética Em Sistemas Isolados: O Caso De Roraima.
- Kundur, Prabha Et Al. Definition And Classification Of Power System Stability. Ieee Transactions On Power Systems, V. 19, N. 3, P. 1387–1401, Ago. 2004.
- Oliveira, Thales. (2019). Desenvolvimento De Um Programa Computacional Livre, Gráfico, E Multiplataforma Para Analisar Sistemas Elétricos De Potência Em Regime Permanente E Dinâmico. Universidade Federal De Uberlândia. Disponível Em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27257>.
- Operador Nacional Do Sistema. (2009). Submódulo 11.4 - Sistemas Especiais De Proteção. [S.L.: S.N.]. Disponível Em: <http://www.ons.org.br>.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico (2020). Plano Anual Da Operação Elétrica Dos Sistemas De Transmissão Localizados Nos Sistemas Isolados – PEL SISOL 2020. Disponível Em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/8/41/91/Produtos/503/Ons%20-%20dpl-Rel-0270-2019%20-%20pel%20isol%202020.pdf>. Acesso Em: 5 Jun. 2023.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico. (2023). Plano Anual Da Operação Elétrica Dos Sistemas De Transmissão Localizados Nos Sistemas Isolados - Pel Sisol 2023. Disponível Em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/8/41/91/Produtos/503/Ons%20-%20dpl-Rel-0270-2019%20-%20pel%20isol%202020.pdf>. Acesso Em: 5 Jun. 2023.
- Operador Nacional Do Sistema Elétrico. (2023). Sobre O Sin - Sistemas Isolados. Disponível Em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso Em: 5 Jun. 2023b.
- Siqueira, Vinicius. (2016). Análise Da Estabilidade Dinâmica Em Sistemas Elétricos Por Meio De Interface Gráfica.
- Van Cutsem, Thierry. (2000). Voltage Instability: Phenomena, Countermeasures, And Analysis Methods.