

Modernização das Usinas Hidrelétricas e Seus Impactos na Estabilidade Angular Transitória do Sistema

Bruno Raffael Almeida de Ávila*. Ivan Paulo de Faria*

* Instituto de Ciências Tecnológicas
Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira
Rua Irmã Ivone Drumond, 200, Distrito Industrial II - 35903-087
Itabira, Minas Gerais, Brasil

brunoavila@unifei.edu.br, ivan.faria@unifei.edu.br.

Abstract: This paper presents a comparative analysis of the transient angular stability of the main hydroelectric power plants of the southern Brazilian equivalent electric system (STB33), considering two scenarios: pre and post modernizations of automation systems. The data were obtained directly from ONS Sintegra database. The implementation was made in Cepel ANATEM and ANAREDE softwares, with the dynamic description of the regulators. The results showed an improvement of the angular stability of these plants, translated by the reduction of the generators load angle excursion and the power oscillations in the south equivalent system.

Resumo: Esse artigo apresenta uma análise comparativa da estabilidade angular transitória das principais usinas hidrelétricas do sistema elétrico equivalente sul brasileiro (STB33), considerando dois cenários, pré e pós modernizações dos sistemas de automação. Os dados foram obtidos diretamente do banco de dados Sintegra do ONS. A implementação se deu por meio dos softwares do Cepel ANATEM e ANAREDE, com a descrição dinâmica dos reguladores. Os resultados mostram uma melhoria da estabilidade angular dessas usinas, traduzidas pela redução da excursão do ângulo de carga máquinas e oscilações de potência no sistema equivalente sul analisado.

Keywords: ANATEM, Transient Angular Stability, Modernizations, STB33 System.

Palavras-chaves: ANATEM, Estabilidade Angular Transitória, Modernizações, Sistema STB33.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da complexidade do sistema interligado, bem como o desenvolvimento tecnológico da automação nos últimos anos provocou uma alteração gradual dos requisitos de operação das unidades geradoras de forma a conferir maior confiabilidade no fornecimento da energia elétrica, o que consequentemente acabou instituindo novos padrões – em sua maioria mais rígidos - para a qualidade do serviço prestado, seja em aspectos ambientais (proteção e monitoramento de barragens), técnicos (qualidade da energia, proteção, controle e estabilidade) e regulatórios (custo da energia).

Assim como boa parte dos mercados, as concessionárias de energia – tidas historicamente como empresas de gestões tradicionais/convencionais – vêm passando por uma série de transformações que não visam somente a redução dos custos operacionais e de manutenção, como também o aumento da eficiência de seus ativos, a fim de se manterem competitivas no cenário econômico atual.

O mercado dos ativos de hidrogeradores, denominados segmento *hydro* pode ser dividido basicamente em dois: *green field* e *brown field*, cada qual com suas particularidades, que somados correspondem a cerca de 67%

da energia elétrica gerada no país (Ministério de Minas e Energia, 2019a). As usinas *green field* são empreendimentos novos e tem apresentado uma diminuição na participação do volume de mercado hydro, sobretudo devido à redução considerável dos custos que envolvem a viabilidade de instalação de parques eólicos e solares nos últimos anos, dificuldades na obtenção das licenciamento ambiental, instabilidade econômica atual, dentre outros fatores (Scalon, 2017).

As usinas *brown field* por sua vez, são usinas mais antigas e constituem a maior parte da capacidade de energia hidrelétrica instalada no Brasil. Boa parte dos ativos e instalações dessas usinas estão em funcionamento há mais de 30 anos da mesma forma que foram concebidos – sendo, portanto obsoletos em relação a tecnologia atual – de forma a ser possível inferir que fatalmente será necessário realizar, em algum momento próximo, o *retrofit* dos equipamentos existentes e, até mesmo, aplicação de mudanças nas filosofias de operação de seus sistemas (Mendes, 2010 e Okawa, 2019). Segundo Mendes (2010), a aceitação das novas tecnologias por parte dos agentes foi, por muito tempo, um processo lento, visto que havia uma certa relutância por partes de alguns setores do sistema elétrico em aceitar novas tecnologias (Hohlbaum et al., 2004), (Kezunovic, 2002) e (Senfter, 2007). Contudo, o mercado tem sinalizado

O modelo de máquina síncrona adotado foi o modelo MD02 da biblioteca do ANATEM, cuja representação se trata do modelo subtransiente das máquinas síncronas. Os valores cadastrados foram obtidos mediante dados reunidos por Alves (2007), extraídos da base de dados dinâmicos do ONS.

4.2 Modelagem das usinas STB33 cenário do ano de 2006

Para a modelagem das usinas do sistema STB-33 - cenário pré-modernizações, foram considerados os reguladores da base de dados dinâmicos do ONS referentes ao período de maio/2006.

Tendo em posse todos os arquivos CDU, foi criada uma rotina em código estruturado no ANATEM que realiza a leitura de todos os reguladores, verifica o fluxo de potência do sistema ANAREDE proposto por Alves (2007), aplica distúrbios no sistema proposto e exporta os dados em formato de imagem.

4.3 Modelagem das usinas STB33 panorama 2020

Conforme apresentado na Seção 3, 05 (cinco) das 07 (sete) UHEs presentes no sistema teste foram modernizadas desde o ano de 2006, horizonte escolhido para realização da análise, conforme o trabalho realizado por Alves (2007).

A última atualização dos modelos de reguladores publicadas pelo ONS estão presentes na base de dados referente ao período de março/2020 com a modelagem atualizada das usinas de G. B. Munhoz, Itá, Machadinho, Salto Santiago e Salto Osório (Operador Nacional do Sistema, 2020).

4.4 Aplicação de perturbações ao sistema teste

Para avaliação da estabilidade transitória das unidades geradoras em estudo, foi considerada a aplicação de defeitos de alta criticidade sistêmica, sendo estes:

- Caso A: Aplicação e remoção de curto-circuito na barra próxima ao terminal de alta tensão do transformador elevador de Itá;
- Caso B: Aplicação e remoção de curto-circuito com abertura de linha de transmissão que interconecta as usinas de Itá e Machadinho;
- Caso C: Desconexão de uma unidade geradora em região de alto carregamento - UHE Salto Caxias;
- Caso D: Aplicação de curto-circuito em linha de transmissão com alto carregamento (Segredo – Areia);

A análise foi feita mediante comparação de gráficos e valores de pico dos sinais de ângulo de carga, potência elétrica e tensão terminal das máquinas do sistema teste. Os resultados dessa comparação são apresentados na seção subsequente.

4. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para investigar a capacidade de restabelecimento das usinas presentes no STB-33 foram simulados defeitos com alto potencial de instabilização sistêmica. O objetivo desses testes foi o de verificar se houve melhoria na resposta dinâmica do sistema.

5.1 Caso A: Aplicação e remoção de curto-circuito em barra de Itá

A aplicação desse caso tem como objetivo emular uma perturbação simples e avaliar a excursão do ângulo delta das máquinas do sistema, bem como a variação da potência elétrica. O curto-circuito inicial aplicado teve duração de 30 ms e localização escolhida foi a barra conectada aos terminais de alta tensão do transformador elevador da usina de Itá (Barra 955).

As simulações foram realizadas considerando os seguintes cenários:

- Sistema antes da modernização com PSS
- Sistema Modernizado com PSS

A Figura. 2 apresenta a excursão do ângulo delta das máquinas do sistema para as condições pré e pós modernização, a fim de mostrar o comportamento dinâmico dos demais controladores/limitadores.

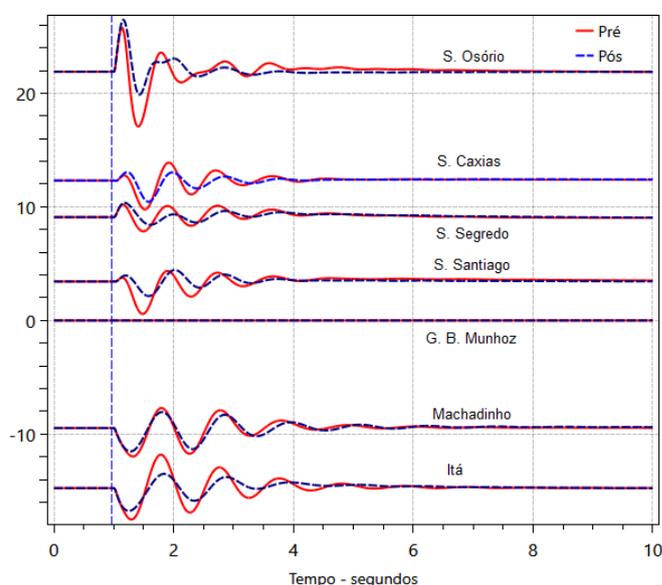


Fig. 2. Caso A – Excursão do ângulo delta para defeito na barra 955 com atuação de PSS.

É possível verificar pela Figura. 2, que os ângulos delta do cenário após as modernizações apresentam uma resposta mais amortecida do que o cenário pré, indicando uma melhor atuação dos sistemas de controle modernizados para o mesmo defeito aplicado.

As oscilações de potência observadas na Figura. 2 podem provocar torques pulsantes contrários ao movimento do conjunto gerador, que dependendo da intensidade podem resultar na diminuição da vida útil da máquina. Sendo assim, é interessante do ponto de vista mecânico que essas oscilações tenham o menor valor possível (Chapman, 2013).

Para avaliação do sinal de potência foi realizada a tabulação da amplitude pico a pico das oscilações de potência dos primeiros ciclos (Pré - Pós) das usinas modernizadas com PSS ativo e o resultado é apresentado na Tabela 2.

Mediante os resultados da Tabela 2 é possível verificar que todas as usinas modernizadas foram submetidas a uma menor

oscilação de potência para o mesmo defeito aplicado, sobretudo no primeiro ciclo (primeira excursão de oscilação de potência), onde essa redução é mais evidente. Tal resultado sugere que para o defeito em questão, a máquina sofrerá menor impacto, o que a longo prazo pode conferir aumento da vida útil do sistema.

Tabela 2. Avaliação do sinal de potência sem PSS - caso A

UHE	Ciclo 1 (MW)	Ciclo 2 (MW)	Ciclo 3 (MW)
Cenário Pré-Modernizações			
Itá	124	70	32
Machadinho	17	46	23
G. B. Munhoz	29.0	104	70
S. Santiago	94	18	7
S. Osório	124	26	14
Cenário pós-modernizações			
Itá	112	29	6
Machadinho	20	45	22
G. B. Munhoz	17	45	42
S. Santiago	78	23	6
S. Osório	105	24	4

A perda de estabilidade de uma unidade geradora é observada quando o ângulo de carga da máquina não consegue se reestabelecer em torno de um valor de referência. Ao repetir o procedimento anterior para aumentos graduais do tempo de defeito foi possível verificar o ponto em que o sistema perderia a estabilidade. Após a realização de várias simulações com aumento gradativo do tempo de defeito, verificou-se que a usina de Machadinho se torna instável para uma condição de defeito de 903 ms (cenário pré-modernização). O ângulo delta da máquina passa a aumentar progressivamente. A Figura. 3 apresenta a sobreposição da excursão do ângulo delta dos cenários pré e pós submetidos a mesma condição de defeito.

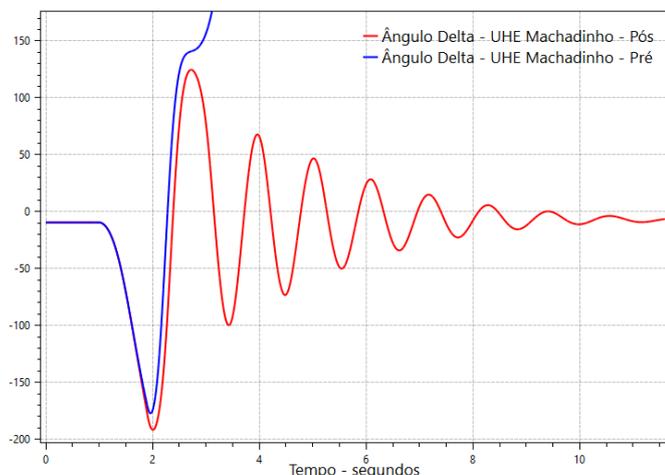


Fig. 3. Caso A – Excursão do ângulo delta para defeito limite na barra 955 com atuação de PSS, cenários pré e pós para a UHE Machadinho.

Diferentemente do cenário pré, a usina de Machadinho na condição pós ainda consegue se recuperar do mesmo defeito aplicado na condição pré (tempo crítico pós foi igual a 950 ms). Esse resultado aponta que houve uma melhoria da estabilidade dessa usina, visto que para a mesma condição de defeito, o sistema foi capaz de se restabelecer.

5.2 Caso B: Aplicação de curto-circuito em barra com abertura de linha de transmissão entre Itá e Machadinho

Aplicando novamente o mesmo defeito apresentado no caso A com tempo de duração de 100 ms e abertura total das linhas que interligam as barras 955 e 1030 (linhas de transmissão que interliga as usinas de Itá e Machadinho) é possível verificar o estabelecimento de um novo ponto de operação das máquinas e a consequência desse defeito para a estabilidade do sistema.

A Figuras 4, 5 e 6 apresentam os resultados obtidos para essa simulação, sendo estes referentes ao ângulo delta das duas usinas, potência elétrica de Itá e potência elétrica de Machadinho, nesta ordem.

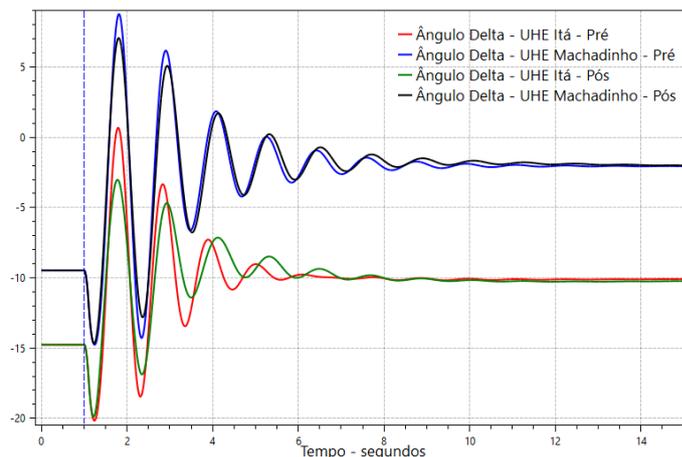


Fig. 4. Caso B – Excursão do ângulo delta para defeito com abertura de linha de transmissão entre usinas Itá e Machadinho.

Conforme apresentado pela Figura. 4, o ângulo delta das máquinas de Itá e Machadinho sofreram uma maior influência do defeito de abertura da linha para o cenário pré-modernização, visto que houve uma maior excursão em amplitude do ângulo delta.

Em relação aos sinais de potências das Figuras 5 e 6 é possível verificar a diferença entre os valores de oscilação de potência para os cenários pré e pós modernizações, indicando uma melhora da estabilidade do sistema para as duas usinas analisadas, sobretudo Itá, que apresentou um tempo de estabilização em torno do novo de ponto de operação menor para o cenário pós (ao menos 2 segundos a menos do que o cenário pré), além do amortecimento do sinal de potência. A diferença de oscilação de potência da usina de Itá, observada na Figura 14 foi de 50 MW para o primeiro ciclo, enquanto que para Machadinho a redução foi de 20 MW.

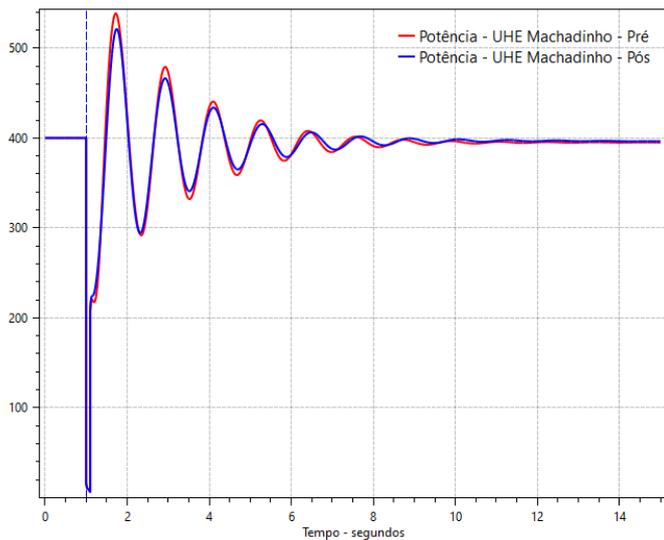


Fig. 5. Caso B – Oscilação de potência da UHE Machadinho.

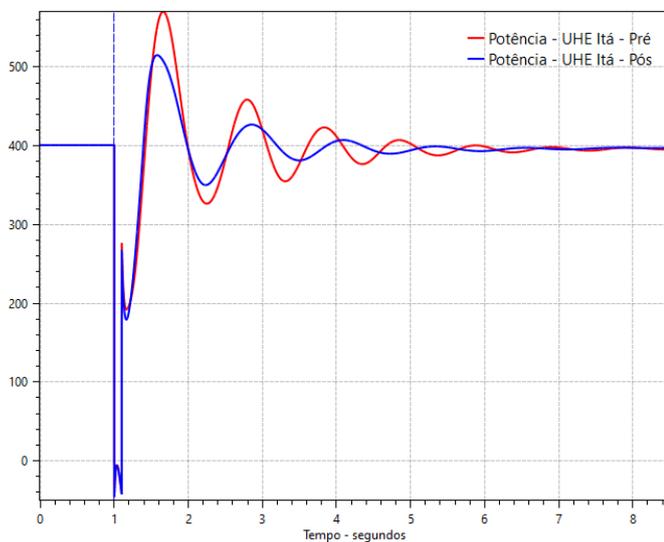


Fig. 6. Caso B – Oscilação de potência da UHE Itá.

5.3 Caso C: Desconexão de máquina do sistema em região de alto carregamento (UHE Salto Segredo)

A aplicação desse evento tem por objetivo verificar o comportamento das máquinas do sistema em uma região de alto carregamento frente a saída de uma unidade geradora do sistema (defeito interno). A área escolhida para essa análise foi a região próxima da usina de Salto Segredo, visto que no caso base a potência dessa usina está próxima de seu fornecimento de potência nominal, além de estar localizada em uma região de um alto intercâmbio (da Área B para a área A).

Sendo assim foi feita a desconexão de uma unidade geradora da UHE Salto Segredo e observado o comportamento da variação dos ângulos delta e potência das máquinas do sistema respectivamente representados nas Figuras 7 e 8.

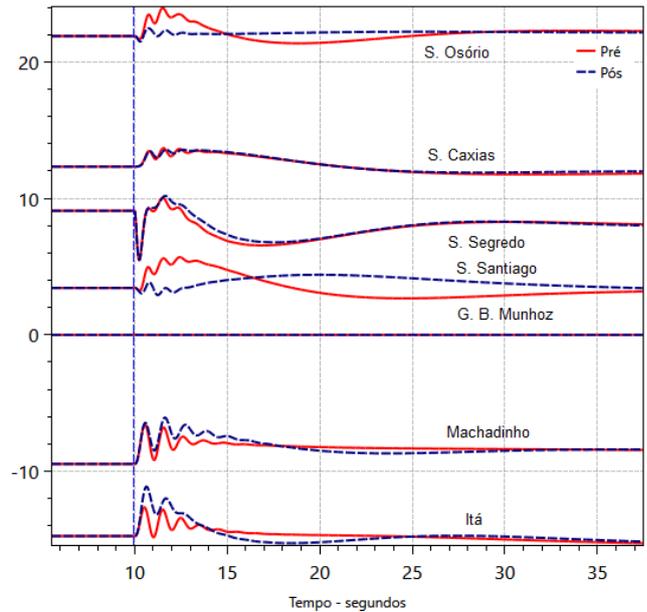


Fig. 7. Caso C – Excursão do ângulo delta com a saída de unidade geradora em região de alto carregamento.

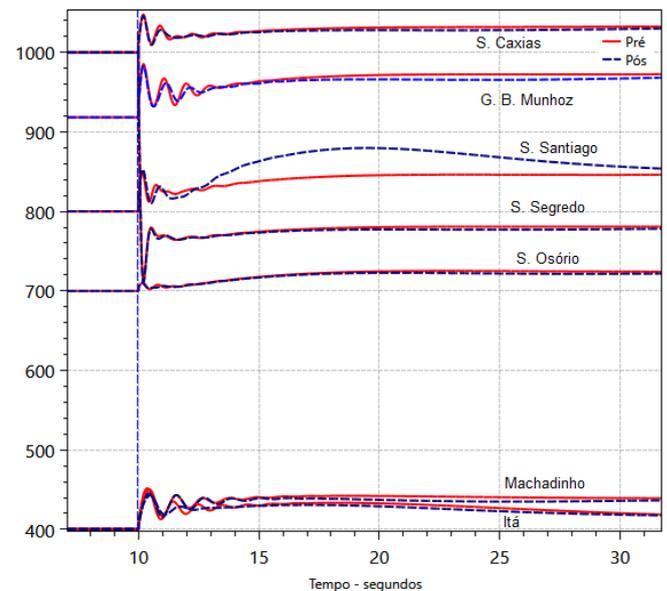


Fig. 8. Caso C – Excursão da potência com a saída de unidade geradora em região de alto carregamento.

As Figuras 7 e 8 apontam que ao perder uma máquina, o sistema tende a um novo ponto de operação de modo a atender a carga. Também é possível observar que apenas as usinas de G. B. Munhoz e Salto Santiago que apresentaram um amortecimento considerável no ângulo de carga para os cenários pré e pós-modernizações, indicando que para o defeito aplicado, essas usinas apresentaram uma melhora na resposta dinâmica. Por se tratar de um ponto de defeito localizado em uma região central é possível verificar que a compensação de potência ficou distribuída entre as usinas do sistema STB33, sem sobrecarga efetiva das mesmas.

5.4 Caso D: Defeito em linha de transmissão com alto carregamento (Barra Segredo – Barra Areia)

O objetivo desse evento foi o de avaliar o comportamento do sistema frente a ocorrência de abertura de linha com alto carregamento em falta trifásica. Para tal, foi realizada a simulação de um curto-circuito trifásico na linha que conecta as barras de Segredo (856) e Areia (933), com 100 ms de duração. A escolha desse ponto se deu devido ao carregamento da linha em questão ser o maior dos presentes no sistema STB33.

O defeito em questão provoca uma grande variação do ângulo delta das máquinas do sistema, como é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Oscilação do ângulo de carga para caso D

UHE	Ciclo 1 (Δ°)	Tempo de amortecimento (s)
Cenário pré-modernizações		
Itá	44.0	≈ 9.0
Machadinho	30.0	≈ 10.5
S. Santiago	63	≈ 10.0
S. Osório	47	≈ 11.0
S. Segredo	72.0	≈ 10.0
S. Caxias	66.0	≈ 10.0
Cenário pós-modernizações		
Itá	42.0	≈ 10.0
Machadinho	30.0	≈ 10.0
S. Santiago	55.0	≈ 10.0
S. Osório	32.0	≈ 10.0
S. Segredo	61.0	≈ 10.0
S. Caxias	62.0	≈ 10.0

Obs: A usina G. B. Munhoz é a usina de referência.

A partir dos dados da Tabela 3 é possível inferir que todas as usinas tiveram uma melhora na resposta dinâmica ao defeito em questão, sendo as usinas S. Segredo, S. Caxias e S. Santiago, consideravelmente mais afetadas.

Tamanha criticidade se deve ao grande intercâmbio de potência entre as áreas A e B do sistema, que antes do defeito fluía pela linha de transmissão que conecta as barras de Segredo (856) e Areia (933).

6. CONCLUSÕES

A análise da estabilidade angular das unidades geradoras constitui uma importante ferramenta para avaliação da capacidade de restabelecimento do sistema. A partir da simulação de defeitos e eventos de alta criticidade é possível verificar se modificações sistêmicas como as que são implementadas durante as modernizações podem ou não causar instabilidades.

Os estudos e casos de simulações realizados buscaram contemplar particularidades críticas do sistema STB33, comparando dois cenários distintos: pré e pós modernizações dos sistemas de automação. Foi constatado que para todos os casos aqui apresentados, obteve-se uma melhora da resposta dinâmica das unidades geradoras, traduzidas pela redução da excursão dos sinais de ângulo de carga e potência.

A diminuição da excursão do ângulo delta favorece o aumento do tempo crítico de atuação da proteção, observado principalmente pelo caso A, em que a modernização resultou numa melhoria da suportabilidade ao defeito aplicado a usina de Machadinho. Esse resultado indica que na ocorrência de um defeito mais crítico, a usina não necessariamente precisará ser desconectada do sistema, o que sugere menor impacto aos ativos vizinhos, evitando ilhamentos e outras perturbações dessa natureza.

As oscilações de potência podem provocar uma redução da vida útil dos ativos da unidade geradora, visto que submete a máquina a torções e torques indesejáveis. Apesar desses componentes serem fabricados para suportar tais esforços, é desejável que o sistema de controle tenha capacidade de amenizá-los, de forma a contribuir para o aumento da vida útil dos mesmos, diminuindo custos de manutenção e paradas não programadas.

Sendo assim, conclui-se que os resultados obtidos reforçam a importância das reformas das usinas hidrelétricas e os ganhos técnicos que podem ser obtidos com elas.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira, seu corpo docente que dedicou tempo e atenção para sanar dúvidas e sugerir melhorias no trabalho. A todos os amigos próximos pelo incentivo.

REFERÊNCIAS

- Alves, W. F. (2007). Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência, Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Chapman, S. J. (2013). *Fundamentos de máquinas elétricas*, AMGH, Tradução: A. Laschuk, Nova York.
- Hohlbaum, F. Hossenlopp, L. Wong, G. (2004). Concept and first implementation of IEC 61850, *40^a Biennial CIGRÉ Session 2004 – B5-110*, Paris.
- Kezunovic, M. (2002). Future trends in protective relaying, substation automation testing and related standardization, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002*, Yokohama.
- Mendes, P. P. C. (2010). Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. (2019a). *Balanco Energético Nacional*. (online).
- Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. (2019b). Repotenciação e Modernização de Usinas Hidrelétricas: Ganhos de eficiência, energia e capacidade instalada.

- Okawa, J. (2019). A tendência de modernização de usinas no Brasil.
- Operador Nacional do Sistema. (2019a). Submódulo 3.6, Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.
- Operador Nacional do Sistema. (2019b). Portal Sintegre. Visto em 25 Março 2020 <<https://sintegre.ons.org.br/sites/8/32/87/Produtos/211/BDadosMarco2020.zip>>.
- Scalon, T. F. O. (2017). Estudo de caso: Modernização e otimização de pequenas centrais hidrelétricas visando diminuição de custos. Monografia. Universidade Estadual Paulista, Sorocaba.
- Senfter, G. (2007). IEC 61850 – is it worth the trouble?, CIRED 2007 – 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna.