

Análise da Operação e Eventos Transitórios em Sistema de Geração Hidroelétrica Considerando Resultados de Medições e Simulações

Nelson Clodoaldo de Jesus
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
nelson@gsiconsultoria.com.br

Jesus Daniel Oliveira
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
jesus.oliveira@gsiconsultoria.com.br

Patrick Roberto de Almeida
BREE - Brazilian Energy Efficiency
Quatro Barras (PR), Brasil
patrick.almeida@bree.com.br

Flávio Resende Garcia
BREE - Brazilian Energy Efficiency
Quatro Barras (PR), Brasil
flavio@bree.com.br

Luiz Fernando Soares de Souza
BREE - Brazilian Energy Efficiency
Quatro Barras (PR), Brasil
luiz.souza@bree.com.br

Lucas Yuji Tamashiro
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
lucas.tamashiro@gsiconsultoria.com.br

Resume—Este artigo tem por objetivo apresentar os principais resultados obtidos durante a análise do desempenho de um sistema de geração em uma Pequena Central Hidroelétrica (PCH), em função da ocorrência de falha do gerador. Foram considerados resultados de medições e simulações, verificando-se os indicadores de Qualidade de Energia, bem como eventos transitórios, relacionados as VTCDs e manobras do disjuntor responsável pela conexão da geração ao sistema de distribuição. Finalmente, serão apresentadas as alternativas técnicas recomendadas para a redução das sobretensões transitórias.

Keywords—Pequena Central Hidroelétrica (PCH), Qualidade de Energia, Harmônicos, Transitórios, Medições, Simulações.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos apresentam diversas características específicas em termos de sua configuração e operação, envolvendo as áreas de geração, transmissão e distribuição.

O presente caso trata da avaliação das condições operacionais de uma Pequena Central Hidroelétrica (PCH) de geração de energia elétrica. De acordo com o agente responsável pelo referido sistema, ocorreu uma falha no estator do gerador do sistema elétrico. Para essa análise foram inicialmente realizadas medições para a verificação do sistema de geração, considerando a detecção de perturbações, referentes às manobras do disjuntor associado ao gerador elétrico, análises das grandezas elétricas, tais como potências, fator de potência, tensões, correntes, distorções harmônicas totais de tensão e corrente, nos pontos onde foram realizadas as medições, bem como análises dos transitórios de baixa e alta frequência, referente as manobras de abertura e fechamento do disjuntor do gerador elétrico, incluindo também a modelagem detalhada do sistema, com base nas simulações de diversos casos, fornecendo subsídios técnicos para a investigação detalhada do referido caso.

II. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico em análise está associado ao sistema de geração de energia elétrica a partir de uma Central de Geração Hidroelétrica (CGH), sendo composta por um gerador síncrono com potência nominal de 1100 [kVA], um transformador elevador de 1200 [kVA], com tensões de operação de 0,69 e 13,8 [kV], conectado através do cubículo

de saída de linha de média tensão ao sistema de distribuição do concessionário local. Para essa análise específica, serão considerados os parâmetros de qualidade de energia [1], [2], as solicitações de transitórios eletromagnéticos, envolvendo principalmente as manobras do disjuntor em relação a rejeição do sistema de geração e durante a ocorrência de perturbações e incidências de descargas atmosféricas [3], [4], [5], [6].

Para a realização e análise do sistema estudado, a fim de verificar as solicitações impostas aos equipamentos do sistema, foram considerados os resultados das medições e simulações, envolvendo manobras de disjuntores, sendo realizadas análises comparativas para validação da modelagem do sistema [7], bem como casos de descargas atmosféricas e aplicação de protetores de surto [8]. Nessa análise avaliou-se o desempenho do sistema e possíveis correlações com a falha do gerador, verificando seus desligamentos e rejeição e correlacionando-os com as manobras dos disjuntores. A Fig. 1 apresenta o diagrama unifilar base do sistema elétrico em análise, que foi utilizado na obtenção dos resultados de medições e simulações.

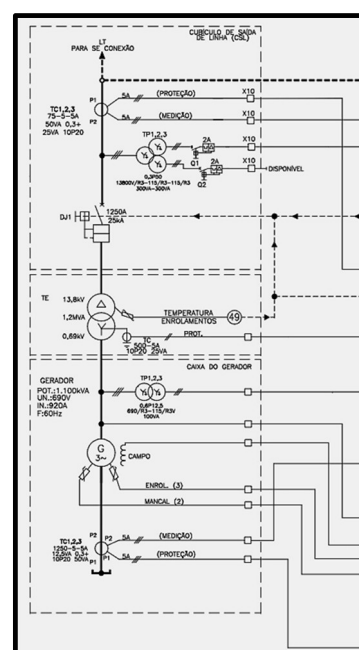


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema de geração hidroelétrica.

III. RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES NO SISTEMA

Para a verificação das condições operacionais do sistema, foram propostas atividades envolvendo medições para caracterizar o comportamento do sistema de geração, por meio da instalação simultânea de dois medidores de qualidade de energia, junto aos terminais do gerador síncrono, avaliando os principais parâmetros e indicadores de desempenho, bem como o comportamento frente a perturbações e eventos transitórios [1]. A Fig. 1 ilustra o comportamento da medição da potência aparente registrada por um intervalo de aproximadamente 2 meses de medições consecutivas.

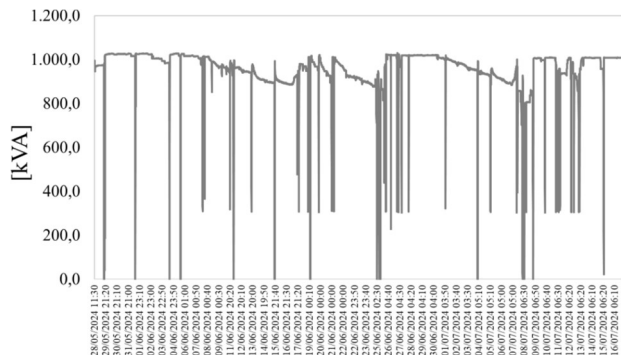


Fig. 2 Diagrama unifilar do sistema de geração hidroelétrica.

As respectivas tensões de linha no lado do gerador, com tensão nominal de 0,69 kV, podem ser verificadas na Fig. 2, onde foram registradas diversas perturbações, resultando em interrupções do sistema de geração.

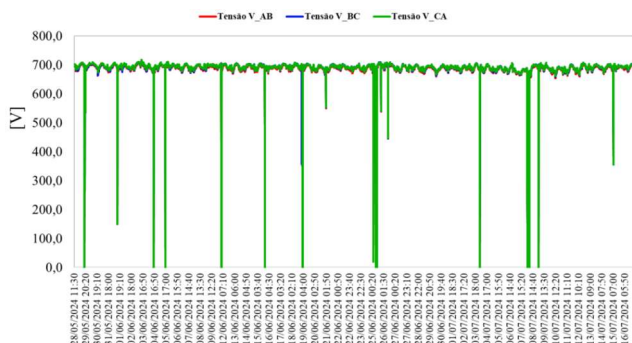


Fig. 3 Comportamento das tensões eficazes de linha nos terminais do gerador síncrono.

As correntes do gerador podem ser verificadas na Fig. 4, indicando também um número elevado de perturbações.

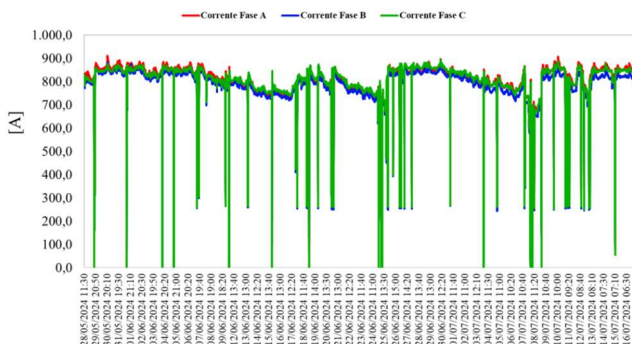


Fig. 4 Comportamento das correntes eficazes do gerador síncrono.

As distorções percentuais obtidas de modo estatístico para as tensões de fase estão apresentadas na Fig. 5, com valores máximos próximos a 4,5%, sendo que os principais componentes se referem aos harmônicos de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

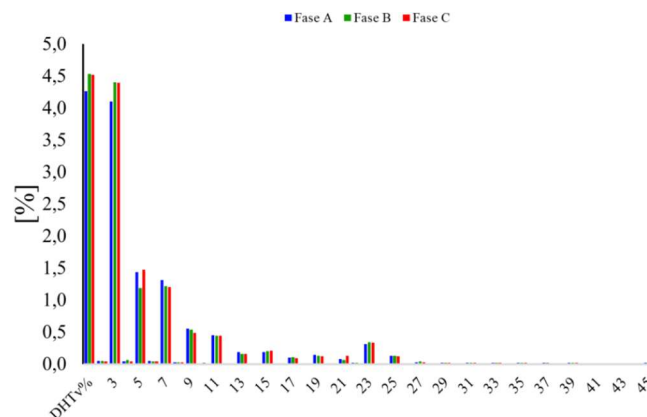


Fig. 5 Comportamento dos espectros harmônicos das tensões de fase do gerador síncrono.

As distorções percentuais obtidas de modo estatístico para as correntes de operação do gerador estão destacadas na Fig. 6, com valores máximos próximos a 1,6 %, sendo que nesse caso, os principais componentes referem-se aos harmônicos de 5ª, 7ª e 11ª ordens.

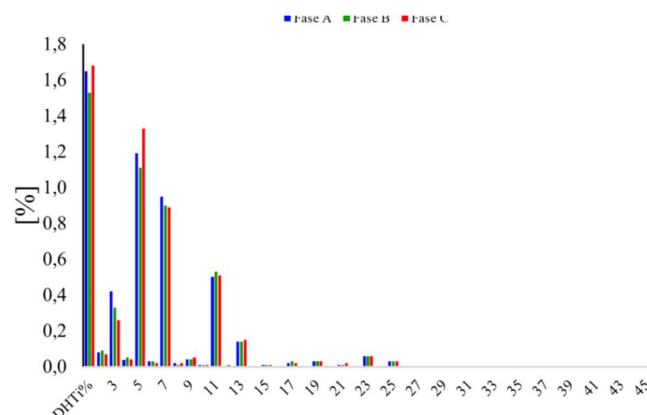


Fig. 6 Comportamento das correntes eficazes do gerador síncrono.

Diante os resultados apresentados anteriormente, existem correlações positivas principalmente entre os componentes de 5ª e 7ª ordens. Deve-se destacar que naturalmente as tensões de linha tendem a não apresentarem componentes de terceira ordem, as quais normalmente estão relacionadas as distorções entre fase e neutro, mas são significativamente reduzidos em relação as tensões de linha.

De qualquer modo, pode-se considerar que os resultados apresentados anteriormente em relação as distorções estão dentro da faixa adequada de operação, pois os mesmos são inferiores aos valores de referência, considerando o PRODIST da ANEEL [1] e as recomendações do guia IEEE-519 [2].

Portanto, os indicadores em regime permanente analisados, além das distorções, não indicam violações, sejam também em termos de desequilíbrios ou flutuações de tensão. Sendo assim, a seguir apresentam-se resultados relacionados aos VTCDs e transitórios [6], [7], os quais tendem a afetar mais significativamente as condições operacionais do sistema, com uma tendência maior a serem responsáveis pela falha do estator do gerador, citada anteriormente.

As Tabelas I e II a seguir apresentam as relações dos eventos de VTCD's, respectivamente relacionados aos afundamentos de tensão (AMT) e as elevações de tensão (EMT) [1].

TABELA I - Relação dos Eventos de Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMT)

Nº do Evento	Data	Horário	Fase	Tipo	Magnitude	Duração [s]
15	17/06/2024	15:39:11.707	B	AMT*	89,81%	0,0027
		08:52:58.602	A	AMT	80,42%	0,1262
17	21/06/2024	08:52:58.611	B	AMT	85,11%	0,1096
		08:52:58.597	C	AMT	22,41%	0,1330
32	04/07/2024	13:06:01.626	C	AMT	89,95%	0,0906
33	04/07/2024	13:06:06.806	B	AMT	78,24%	0,1583
34	06/07/2024	02:18:05.838	C	AMT	81,07%	0,1431
35	07/07/2024	00:47:47.789	A	AMT	74,89%	0,0271
		00:47:47.793	B	AMT	87,30%	0,0222
36	07/07/2024	00:47:48.316	A	AMT	73,33%	0,0234
		00:47:48.320	B	AMT*	8820%	0,0114
37	07/07/2024	00:47:48.523	A	AMT*	75,56%	0,0100
		00:47:48.527	B	AMT*	86,44%	0,0051
		18:19:57.878	A	AMT	87,45%	0,3297
44	09/07/2024	18:19:57.896	B	AMT	87,27%	0,3176
		18:19:57.897	C	AMT	87,86%	0,3150
45	10/07/2024	10:28:48.713	C	AMT	82,44%	0,0435
		08:53:09.497	A	AMT	79,80%	0,1539
46	12/07/2024	08:53:09.500	B	AMT	69,54%	0,1572
		08:53:09.503	C	AMT	74,57%	0,1515
		08:53:19.058	B	AMT	67,89%	0,1586
47	12/07/2024	08:53:19.067	C	AMT	88,10%	0,1454
48	12/07/2024	20:02:23.772	B	AMT*	86,19%	0,0077

NOTA: *O evento registrado provavelmente tem uma duração menor que um (01) ciclo, ou seja, menor que 16,67ms

TABELA II - Relação dos Eventos de Elevações Momentâneas de Tensão (EMT)

Nº do Evento	Data	Horário	Fase	Tipo	Magnitude	Duração [s]
2	29/05/2024	15:50:23.504	A	EMT*	120,44%	0,0040
		15:50:23.559	A	EMT	145,93%	0,5138
3	29/05/2024	15:50:23.556	B	EMT	145,91%	0,5140
		15:50:23.554	C	EMT	145,72%	0,5141
		16:11:51.394	A	EMT	151,23%	0,6249
6	29/05/2024	16:11:51.392	B	EMT	151,31%	0,6251
		16:11:51.390	C	EMT	151,19%	0,6315
8	29/05/2024	16:51:08.550	A	EMT*	121,85%	0,0042
		11:49:26.268	A	EMT	119,42%	0,2241
18	24/06/2024	11:49:26.271	B	EMT	119,83%	0,2244
		11:49:26.270	C	EMT	119,30%	0,2239
		04:15:51.388	A	EMT	118,14%	0,1504
25	25/06/2024	04:15:51.385	B	EMT	116,29%	0,1506
		04:15:51.390	C	EMT	120,87%	0,1431
27	25/06/2024	18:12:18.473	B	EMT*	119,79%	0,0038
		18:12:18.521	A	EMT	124,78%	0,2321
28	25/06/2024	18:12:18.525	B	EMT	124,82%	0,2251
		18:12:18.523	C	EMT	124,79%	0,2251
41	07/07/2024	13:34:10.718	B	EMT	112,08%	0,1472
	03/07/2024	13:34:10.724	C	EMT	110,41%	0,1389

NOTA: *O evento registrado provavelmente tem uma duração menor que um (01) ciclo, ou seja, menor que 16,67ms

Pode-se inferir que os diversos eventos classificados como AMT estão correlacionados a perturbações no sistema de distribuição onde a PCH está conectada, enquanto os eventos associados as EMT, são decorrentes da própria reação da armadura dos geradores, quando ocorre a sua desconexão do sistema.

A sequência entre a Fig. 7 e 12 a seguir, ilustram respectivamente, alguns dos eventos de AMT e EMT, registrados durante o referido período de monitoramento, em termos dos valores eficazes e das tensões e correntes instantâneas. Portanto, verifica-se que durante os afundamentos ocorrem sobrecorrentes na operação do gerador e quando do desligamento e rejeição do sistema de geração, ocorrem sobretensões [3], [4], [6].



Fig. 7 Tensões e correntes eficazes durante AMT.

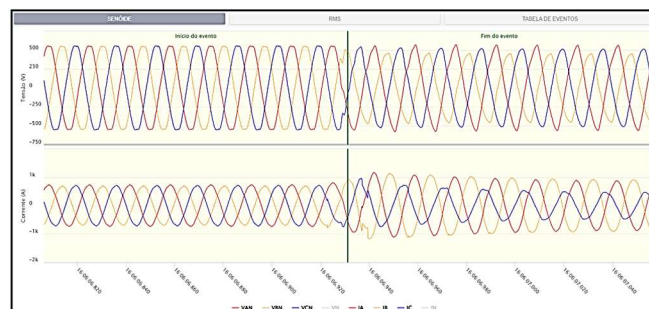


Fig. 8 Tensões e correntes instantâneas durante AMT.

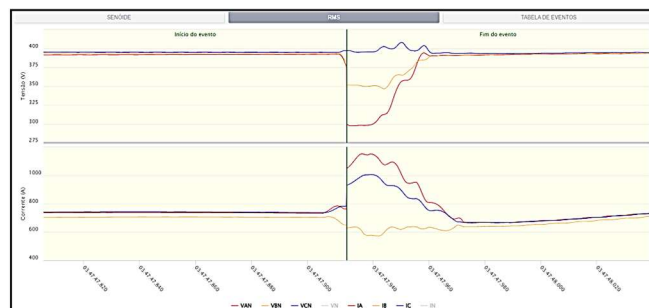


Fig. 9 Tensões e correntes eficazes durante EMT.

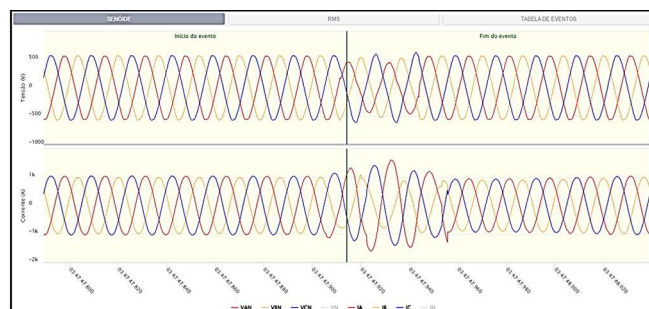


Fig. 10 Tensões e correntes instantâneas durante EMT.



Fig. 11 Tensões e correntes eficazes durante EMT.

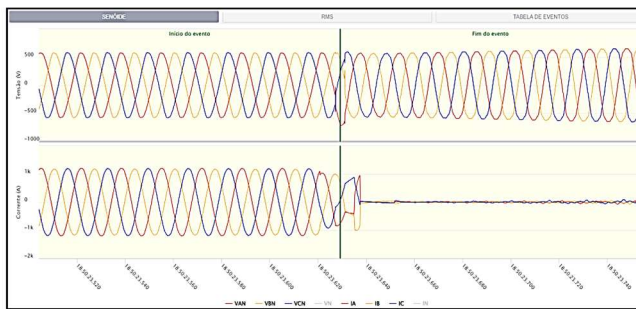


Fig. 12 Tensões e correntes instantâneas durante EMT.

IV. MODELAGEM E SIMULAÇÕES DO SISTEMA

Na Fig. 13 a seguir está apresentado o diagrama unifilar do sistema estudado que foi utilizado como base para a modelagem do modelo virtual do sistema no programa ATPDraw [7], conforme circuito equivalente da Fig. 14.

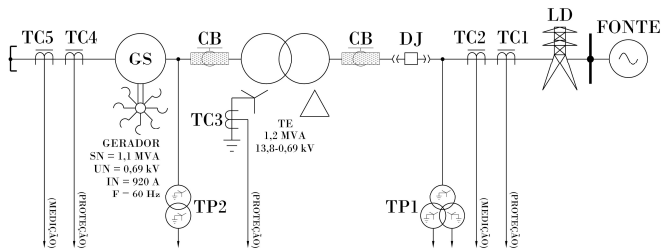


Fig. 13 Diagrama unifilar simplificado do sistema de geração síncrona.

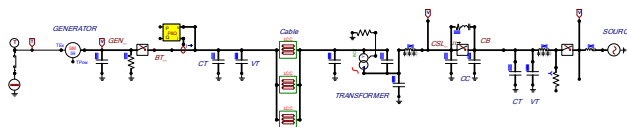


Fig. 14 Modelagem do sistema elétrico de geração síncrona.

Com base nos resultados das medições ilustrados nas Figs. 15 e 17, as quais demonstram o comportamento das tensões e correntes eficazes para as manobras de desligamento do disjuntor, localizado no lado de 13,8 kV, foram também realizadas as simulações desse evento específico no programa ATPDraw [7].

A partir das tensões eficazes da Fig. 15, que estão relacionadas a manobra de rejeição do sistema de geração, mas no qual se observa uma junção dos resultados pelo sistema de medição, destaca-se que nesse caso específico, a tendência é que o comportamento real seja mais próximo dos resultados obtidos por meio da simulação, conforme Fig. 16.

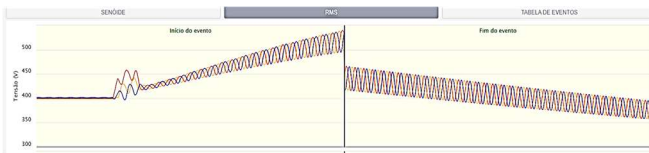


Fig. 15 Tensão eficaz do gerador durante manobra de desligamento (medição).

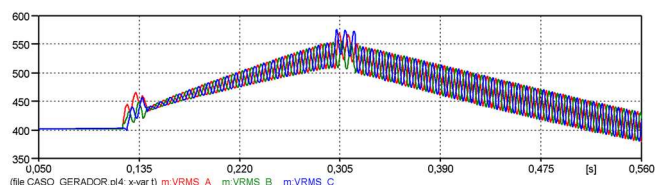


Fig. 16 Tensão eficaz do gerador durante manobra de desligamento (simulação).

A Fig. 17 mostra o comportamento das correntes eficazes, onde, comparando-se tais resultados com a Fig. 18, pode-se observar uma similaridade mais próxima entre os resultados das correntes eficazes.

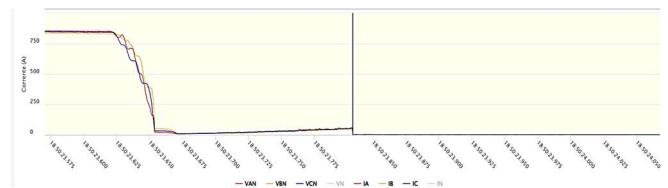


Fig. 17 Corrente eficaz do gerador durante manobra de desligamento (medição).

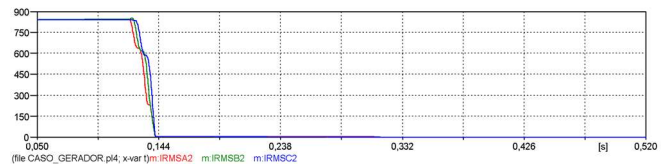


Fig. 18 Corrente eficaz do gerador durante manobra de desligamento (simulação).

Além das medições apresentadas anteriormente, foram também registradas sobretensões transitórias durante as medições com um segundo medidor, com capacidade de amostragem de até 1 [MHz], esse captou um evento a ser destacado.

Assim, a manobra de abertura do disjuntor do sistema de média tensão, o qual indica, além das sobretensões temporárias, tensões transitórias durante a operação do próprio disjuntor do sistema de geração, no qual observam-se tensões de pico próximas a 1 [kV], como ilustrado nas Fig. 19 e 20, a qual apresenta um desligamento típico do disjuntor.

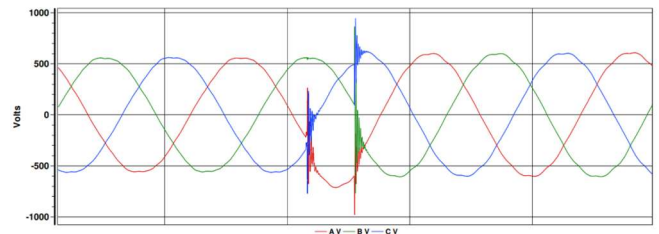


Fig. 19 Formas de onda das tensões do gerador durante manobra de desligamento (medição).

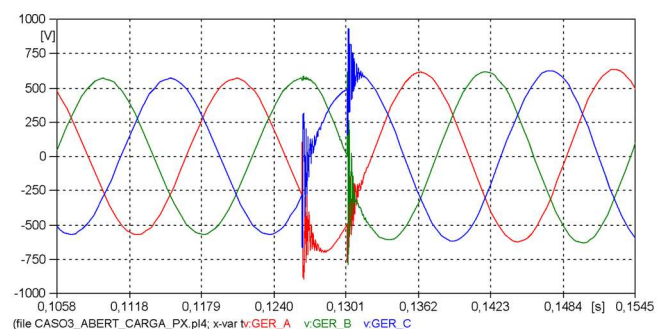


Fig. 20 Formas de onda das tensões do gerador durante manobra de desligamento (simulação).

Pode-se ainda verificar uma forte similaridade entre os resultados obtidos nas simulações também apresentadas nas Figs. 21 e 22, comprovando que se modelado de maneira adequada é possível obter resultados muito próximos aos reais.

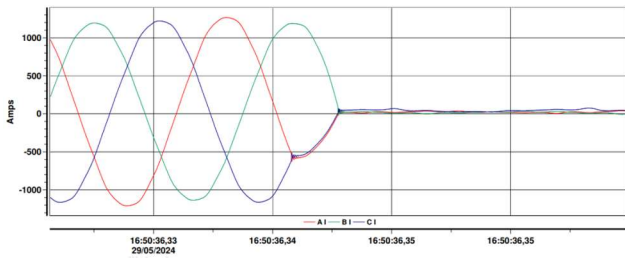


Fig. 21 Formas de onda das correntes do gerador durante manobra de desligamento (medição).

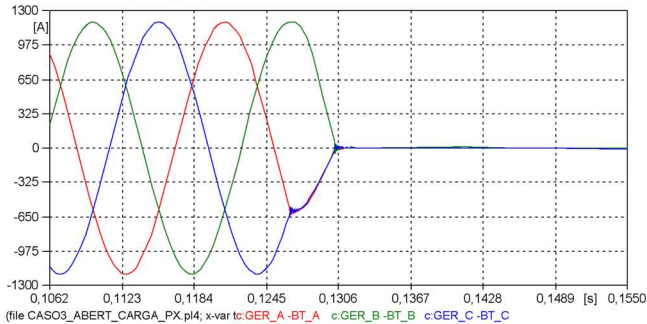


Fig. 22 Formas de onda das correntes do gerador durante manobra de desligamento (simulação).

V. SIMULAÇÕES ADICIONAIS

Além dos eventos mostrados anteriormente, também foram verificados, de forma complementar a influência de descargas atmosféricas no sistema de distribuição e seu possível impacto nos terminais gerador, ocorrências de reignições do disjuntor e, por fim, os resultados da aplicação de supressores de surto, do tipo RC, apresentados a seguir.

A - CASO 1 - Incidência de Descargas atmosféricas

Neste item, foi simulada a injeção de uma corrente de impulso atmosférico na Linha de Distribuição (LD), próxima ao ponto de conexão. A Fig. 23 mostra a corrente com um valor de pico de 5 kA, do tipo 2 x 50 μ s, injetada na rede de distribuição. De maneira proposital, inicialmente não foram incluídos os para-raios na entrada do sistema de média tensão (MT) em 13,8 kV, e os resultados para essa condição mostram as sobretensões resultantes na entrada do sistema de geração e nos terminais do gerador, conforme mostram as Figs. 24 e 25.

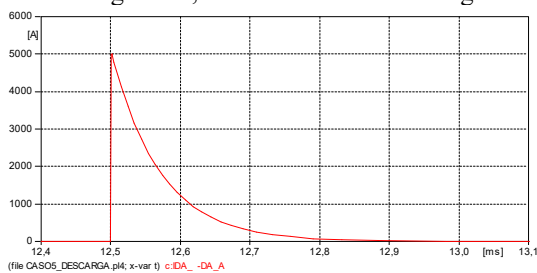


Fig. 23 Formas de onda das corrente injetada no sistema.

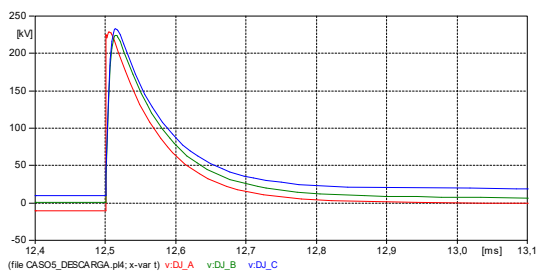


Fig. 24 Formas de onda das tensões resultantes no sistema de MT sem a presença de para-raios.

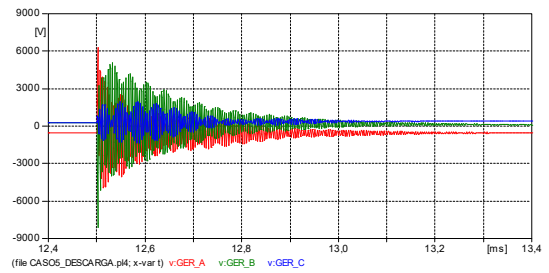


Fig. 25 Formas de onda das tensões resultantes nos terminais do gerador sem a presença de para-raios.

Com a inclusão dos para-raios com tensão nominal de 12 kV, as sobretensões na rede de MT e, principalmente nos terminais do gerador são fortemente atenuadas, permanecendo inferiores aos limites suportados pelo gerador no lado de 0,69 kV, o que diminui a probabilidade de causa por ocorrência de descarga atmosférica, como mostram os resultados das Figs. 26 e 27.

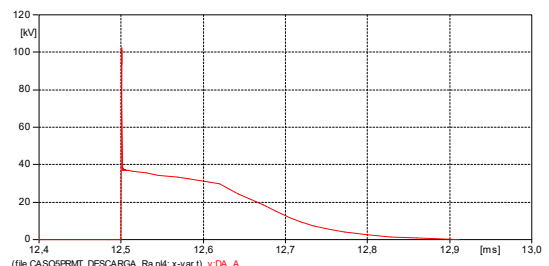


Fig. 26 Formas de onda das tensões resultantes no sistema de MT com a presença de para-raios.

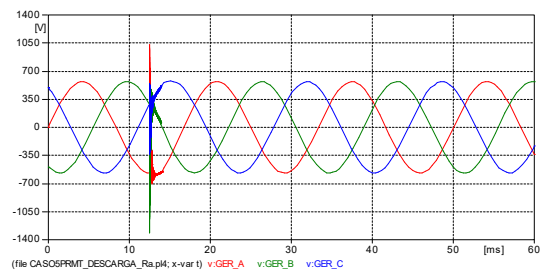


Fig. 27 Formas de onda das tensões resultantes nos terminais do gerador com a presença de para-raios

B - CASO 2 - Reignições do Disjuntor

Nessa análise, também foram verificados os eventos relacionados a reignições do disjuntor, conforme Fig. 28 e 29.

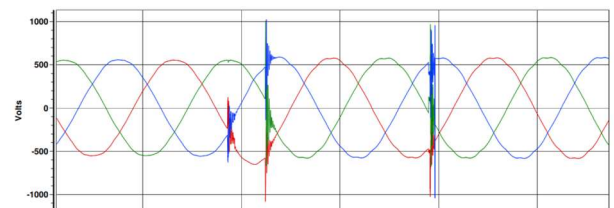


Fig. 28 Tensões do gerador com reignições (medição).

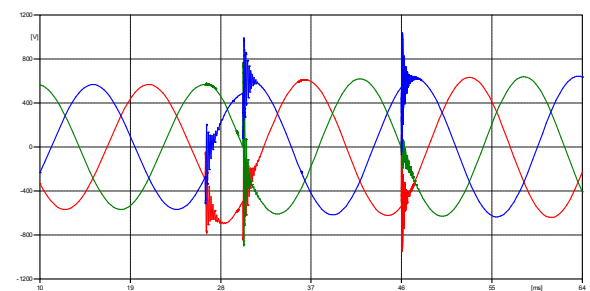


Fig. 29 Tensões do gerador com reignições (simulação).

Adicionalmente, foi verificado um outro caso com a possibilidade de ocorrência de múltiplas reignições do disjuntor, cujos resultados das sobretensões nos terminais do gerador (BT) estão apresentados na Fig. 30.

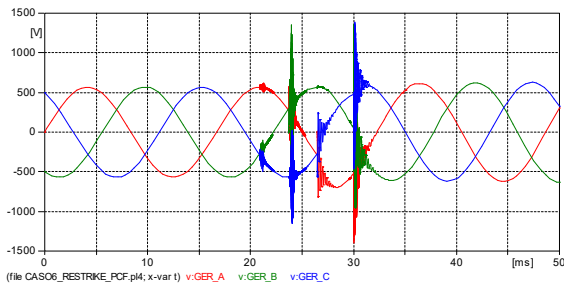


Fig. 30 Simulação das tensões do gerador com múltiplas reignições.

Os detalhes da simulação do evento transitório estão apresentados na Fig. 31, as quais indicam uma possível causa da falha, pois essas variações podem excitar pontos de ressonâncias internas aos enrolamentos do gerador.

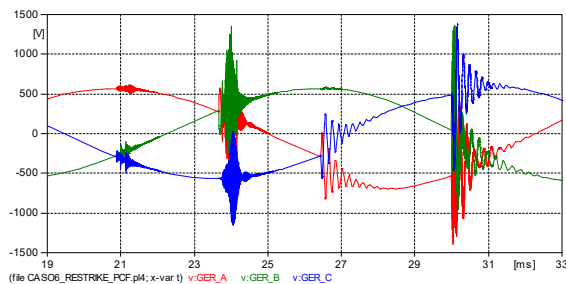


Fig. 31 Detalhes das tensões transitórias do gerador.

C - CASO 3 - Aplicação de Protetores de Surto

Para comparação de possíveis medidas mitigatórias, para o mesmo caso anterior de sobretensões, foram simulados dois casos, sendo o primeiro com a inclusão de capacitores de surto (CS) nos terminais do disjuntor de MT, com valor de $0,50 \mu\text{F}$, e o segundo com a inclusão de um supressor de surto do tipo (RC), com valores de $R = 120 \Omega$ e $C = 0,50 \mu\text{F}$.

Conforme se verificam pelos resultados desses novos casos, em comparação com a Fig. 31, tem-se na Fig. 32, as tensões nos terminais do gerador com a aplicação de capacitores de surto e, na Fig. 33, os mesmos resultados com a utilização de supressores de surto (RC).

As duas alternativas aplicadas no sistema de MT, onde foram a origem dos eventos transitórios resultaram em redução das variações transitórias, mas a utilização de supressores de surto do tipo RC é mais eficaz, resultando em um forte amortecimento das sobretensões transitórias.

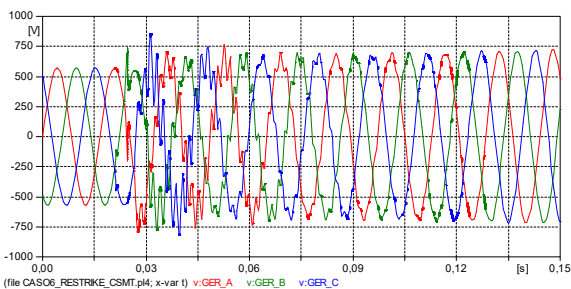


Fig. 32 Simulação das tensões do gerador com capacitor de surto (CS).

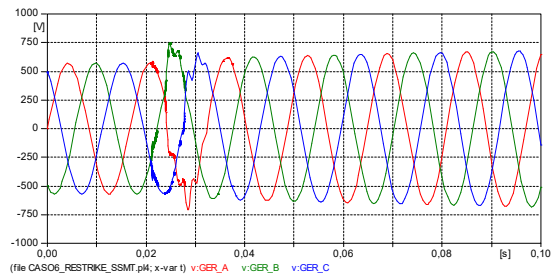


Fig. 33 Simulação das tensões do gerador com supressores de surto (RC).

VI. CONCLUSÕES

Este artigo teve por objetivo apresentar uma análise do desempenho de um sistema de geração de uma pequena central hidroelétrica (PCH), devido a ocorrência de falhas no estator do gerador de 1 MVA. Foram apresentados resultados de medições e simulações, fundamentais a verificação do sistema e possíveis correlações com as falhas. Os eventos que poderiam resultar em falhas foram em função de sobrecorrentes do gerador durante afundamentos de tensão, os quais tenderiam a resultar em falhas devido aos efeitos eletrodinâmicos. Entretanto, a causa mais provável foi devido as sobretensões transitórias e ressonâncias nos enrolamentos do estator, devido aos eventos transitórios de altas frequências, devido as múltiplas reignições do disjuntor.

Como modo alternativo para a redução dos possíveis impactos de sobretensões devido a possibilidade de múltiplas reconduções do disjuntor, foi recomendada a instalação de capacitores de surto (CS), ou, preferencialmente, supressores de surto (RC), de modo a atenuarem as sobretensões transitórias no sistema em análise. Finalmente, destaca-se a grande importância do uso simultâneo de resultados de medições e simulações na investigação, análise, diagnóstico e proposição de alternativas técnicas de mitigação de problemas de qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica, 2021.
- [2] IEEE Std. 519, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 2014.
- [3] Juan A. Martinez-Velasco, "Introduction to Electromagnetic Transient Analysis of Power Systems," in *Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications*, IEEE, 2015, pp.1-8, doi: 10.1002/9781118694190.ch1.
- [4] Dommel, H.W.; ElectroMagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book), Bonneville Power Administration, Portland, OR, USA, 1986.
- [5] GSI - Engenharia e Consultoria LTDA, Curso de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência, 2019.
- [6] Jesus, N. C.; Jesus, W.S.; Santos, G.R.; Franco, T.; Bronzeado, H. S.; Duarte, L. M.; "Análise Comparativa entre Resultados de Medições e Simulações Envolvendo Eventos de Manobras de Disjuntores em Sistemas Elétricos, XIV CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Online, 2021.
- [7] Høidalen H.K.; Prikler L.; Peñaloza F.; ATPDraw version 7.6 for Windows Users' Manual, Release No. 1.0, August 2024.
- [8] Jesus, N. C.; Cogo, J.R.; Duarte, L.M.; Ferreira, L.F.R.; Mendonça, E.J.; Fernandes, L.M.; "A Importância Atual de Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Definição de Sistemas de Proteção de Transformadores Contra Sobretensões e as Aplicações Recentes de Supressores de Surto", XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 2017.