

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC

DESEMPENHO DAS PROTEÇÕES DOS COMPENSADORES SÍNCRONOS DA ARGO DURANTE OS FENÔMENOS SISTÊMICOS DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA NO CORREDOR DE TRANSMISSÃO ACRE- RONDÔNIA

**RAFAEL DE OLIVEIRA FERNANDES*(1); BEATRIZ DE LIMA TAVARES(1); CAIO FERNANDO
ELEUTÉRIO(1); MARCOS AURÉLIO DA COSTA BARBOSA(1)
ARGO ENERGIA(1)**

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é mostrar o desempenho das proteções elétricas e mecânicas dos Compensadores Síncronos (CS) de Ji-Paraná (JP) e de Ariquemes (AQ), de concessão da Argo Energia, durante os fenômenos sistêmicos de Oscilação de Potência (OP) no corredor de transmissão Acre-Rondônia (ACRO). Diante de uma perturbação real, crítica, no sistema ACRO, com Formação de Centro Elétrico (FCE) no trecho de Linha de Transmissão (LT) entre Ji-Paraná (JP) e Pimenta Bueno (PB), com distância elétrica muito próxima dos CS da Argo, verificou-se o impacto na operação e na atuação das proteções dos CS durante a presença de tal fenômeno.

PALAVRAS-CHAVE

Compensadores Síncronos, Oscilação de Potência, Centro Elétrico, Monitoramento.

1.0 INTRODUÇÃO

Os fenômenos de oscilação de potência surgem quando ocorrem eventos transitórios no Sistema Elétrico de Energia (SEE), tais como: contingências, curto-circuitos, chaveamentos, perda de carga, entre outros [1], [2]. Nestes casos, podem ocorrer oscilações de potência ativa e reativa, queda de tensão, instabilidade de tensão e/ou angular, seja entre uma máquina e o restante do sistema ou mesmo entre máquinas equivalentes de uma mesma região [3].

Dado que a FCE em uma LT durante uma Oscilação de Potência por Perda de Sincronismo (OPPS) tende a levar o sistema envolvido a um ponto de operação instável, com um afundamento de tensão, torna-se, então, necessário que a Proteção por Perda de Sincronismo (PPS) opere de modo adequado e, desta forma, espera-se que o relé de proteção tenha as condições necessárias para o envio de um sinal de disparo para os disjuntores associados ao evento, eliminando-se, assim, o problema de operação instável, bem como possíveis *blackouts* na área geoeletrica analisada [1-5].

Devido à proximidade dos CS da Argo com ponto elétrico de FCE do sistema ACRO, notadamente, com o FCE estando na LT entre Ji-Paraná e Pimenta Bueno [1], verifica-se uma influência muito significativa no comportamento destes equipamentos durante tais fenômenos sistêmicos, principalmente em relação ao desempenho das proteções de sobrefrequência, a qual será abordada em uma das duas perturbações reais analisadas neste trabalho. Vale notar que a impedância aparente "vista" pelo relé de proteção em um dos terminais da LT depende diretamente da impedância entre as fontes equivalentes, assim como da topologia, onde, então, pode-se ter alteração do deslocamento da velocidade do vetor de impedância, podendo-se ter o deslocamento do centro elétrico da oscilação caso haja alterações de topologia, reforços na transmissão e na geração e, assim, se aproximar dos pontos elétricos de instalação dos CS da Argo e, com isso, evitar que tais equipamentos não operem fora das suas faixas de segurança, seja de frequência, de vibração mecânica, aquecimento, etc.

Em [1] é proposto um monitoramento da OP, em tempo real, baseado em medição sincronizada de fasores, seja por déficit de torque sincronizante, seja por déficit de torque de amortecimento. Já em [3] é analisado o desempenho de funções de proteção de máquinas síncronas quando a FCE ocorre na usina geradora. Ainda neste trabalho, reporta-se que as funções de proteção que sofreram mais influência em termos de operação correta, durante uma OPPS, foram: proteção de sobrefrequência (81), proteção de perda de excitação (40), proteção de sobretensão (59), proteção de potência reversa (32), proteção de distância (21) e proteção de sobrecorrente com restrição de tensão (51V). Neste mesmo trabalho, sugere-se a habilitação da PPS (78) nos relés de proteção de máquinas quando da presença de OPPS.

Este trabalho abordará, ainda, o uso da Transformada de *Wavelet* para o cálculo da pseudo-energia do sinal de interesse a ser analisado, a fim de verificar-se o impacto da OP em relação ao monitoramento mecânico dos CS, assim como das proteções de sobrefrequência.

2.0 O COMPENSADOR SÍNCRONO

Os CS rotativos são especificamente desenvolvidos para disponibilizarem potência reativa, inércia, potência de curto-circuito e, assim, contribuir com a estabilidade dinâmica da rede, com o processo de recomposição do sistema e a regulação de tensão. Ele pode não ser considerado um motor, dado que nada é acionado, bem como um gerador. Dentre as várias vantagens de se utilizar um CS no Sistema Elétrico de Energia (SEE), tem-se, por exemplo, a flexibilidade de operação em todas as condições de carga do sistema elétrico, fornecendo potência reativa para a rede nas condições de queda de tensão devido ao aumento de carga e também pode operar absorvendo potência reativa da rede nas situações de aumento de tensão devido à redução da carga, de modo contínuo, dinamicamente ou com variações suaves.

2.1 Vantagens de se Utilizar um Compensador Síncrono no SEE

De acordo com [6], destacam-se alguns pontos referentes à utilização de um CS no SEE, sendo elas:

- Flexibilidade de operação em todas as condições de carga do sistema elétrico, fornecendo potência reativa para a rede nas condições de queda de tensão devido ao aumento de carga, bem como absorvendo potência reativa da rede nas situações de aumento da tensão devido à redução da carga, de uma maneira contínua, dinâmica ou com variações suaves;
- Estabilização da tensão de maneira suave, sem necessidade de chaveamentos;
- Aumento da inércia do sistema, uma necessidade em demanda crescente devido à baixa inércia e estabilidade dos sistemas alimentados com fontes não-convencionais de energia (energias renováveis);
- Possibilidade de ajuste do nível de tensão em pontos do sistema elétrico otimizando a capacidade de transmissão e o fluxo de potência;
- Compensação de reativos sem a introdução de harmônicos significativos;
- Otimização do espaço físico de instalação para aplicações de grande porte;
- Evitar que geradores conectados ao sistema elétrico trabalhem com tensão de geração próxima de seus valores limites;
- Evitar variação constante nos *taps* dos transformadores elevadores;
- Redução no número de manobras com reatores ou manobras de linhas de transmissão quando estas são necessárias para corrigir o valor da tensão do sistema elétrico;
- Facilidade de ajuste de tensão através do ajuste da corrente de excitação com uma atuação bastante simples e rápida, evitando-se uma série de outras manobras que seriam necessárias para se conseguir o mesmo efeito e que envolveriam mais equipamentos com maior comunicação entre unidades, mais tempo e, conseqüentemente, maior probabilidade de falhas.

2.2 Monitoramento do Compensador Síncrono

Os CS de Ariquemes e de Ji-Paraná possuem os seguintes dados técnicos principais, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Dados Técnicos dos CS e Funções de Proteção Habilitadas

Grandezas Elétricas	Parâmetros
Potência Nominal (Sobre/Subexcitado)	150 MVar / -90 MVar
Tensão Nominal	13800 V
Corrente Nominal (Sobre/Subexcitado)	6276 A / -3765 A
Fator de Potência Nominal	0
Frequência Nominal	60 Hz
Rotação Nominal	900 rpm
Rotação Máxima para Teste	1080 rpm
Quantidade de Polos	8
Tensão de Excitação (Sobre/Subexcitado)	211 V / 26 V
Corrente de Excitação (Sobre/Subexcitado)	1657 A / 216 A
Funções de Proteção Habilitadas	ANSI 46, 87G, 21, 40, 50/27, 64R, 51V, 24, 50/62BF, 74TC, 51T, 87N, 49, 81, 64S (95% e 100% - 3° Harm), 60, 59N

Em relação ao monitoramento do CS, a Argo possui um sistema que avalia, em tempo real, as principais variáveis mecânicas. Na Figura 1, é possível verificar as medidas de entreferro do estator em diferentes posições angulares, bem como as medidas de vibração relativa de mancal, seja do lado excitado (variáveis MLE), seja do lado oposto ao excitado (variáveis MLOE), como também a vibração absoluta de mancal em posições angulares à 0° e 90° do CS.

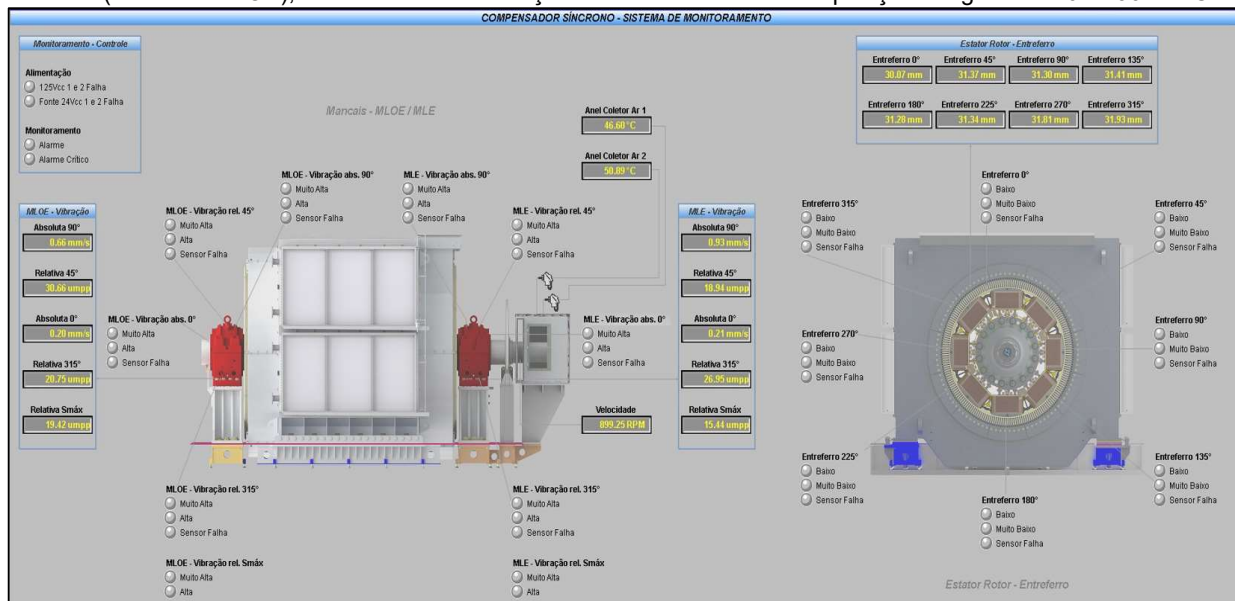


Figura 1 – Tela do Sistema de Monitoramento de Variáveis Mecânicas do CS em Operação Normal. Fonte: Argo

Além das variáveis monitoradas em ambiente de tempo real, indicadas na Figura 1, há também o monitoramento de outras variáveis, como a temperatura do casquilho do mancal, temperatura do metal, pressão de injeção de óleo dos mancais, velocidade, vazão do óleo e nível do óleo do reservatório, por exemplo.

3.0 O SISTEMA ACRE-RONDÔNIA

Na Figura 2, apresenta-se a configuração do sistema ACRO, de extrema importância para a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), onde conecta-se também o complexo do Rio Madeira. Na mesma Figura 2, é possível verificar as usinas de Jirau e de Santo Antônio, o Bipolo do Madeira, e as concessões do circuito C4 da Argo, LT230 kV de Samuel para Ariquemes (LT SM-AQ C4) e LT 230 kV de Ariquemes para Ji-Paraná (LT AQ-JP C4), incluindo-se os dois CS.

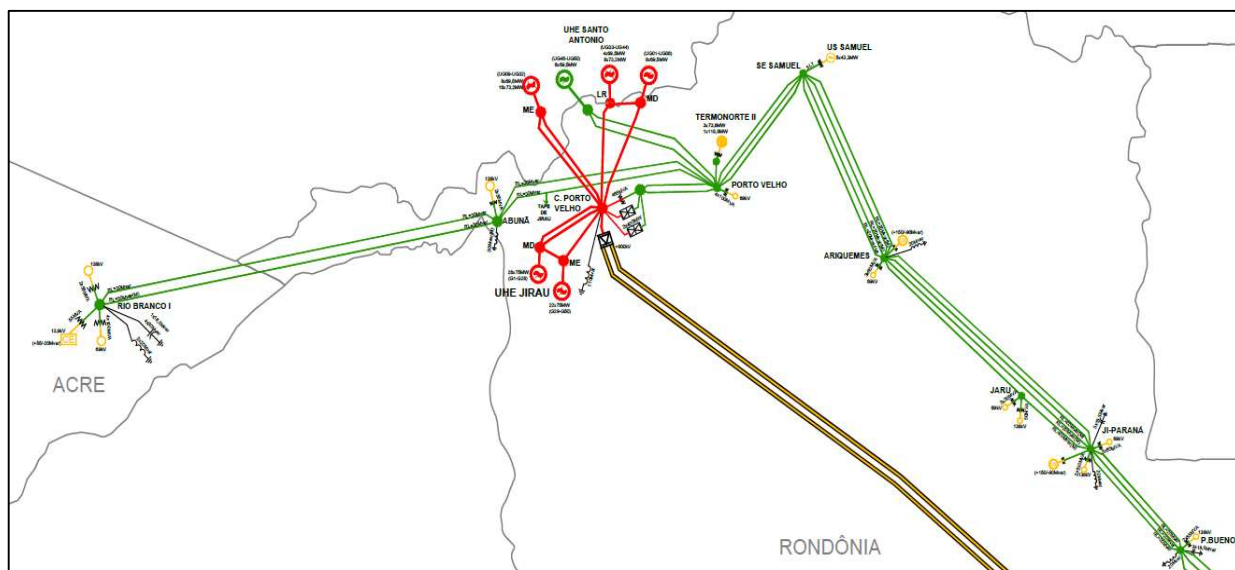


Figura 2 – Sistema Geoeletrico Acre-Rondônia. Fonte: ONS

4.0 EVENTOS NO SISTEMA ACRE-RONDÔNIA OCORRIDOS EM 02/10/2020 E 21/11/2020

4.1 Breve Descrição do Primeiro Evento

O primeiro evento de OP, sem a FCE, analisado no sistema ACRO, ocorreu no dia 02/10/2020, às 15:19:08.547h, devido a um aumento de carga [7]. Após transcorridos aproximadamente 2s do início do processo de OP, ocorre um curto-circuito fase-terra na LT AQ-JP C4, com atuação correta das proteções de distância e abertura do referido disjuntor da LT. Como observado na Figura 3, a OP permaneceu por 1,3 s.

4.1.1 Análise do Comportamento Elétrico – Registro de Oscilografias

Como não houve partida de função de proteção dos CS, não houve o registro de oscilografia. Assim, na Figura 3 tem-se a oscilografia do trecho de LT AQ-JP C4. Já na Figura 4, tem-se a variável de corrente chamada “Delta First”, de acordo com o disponibilizado pela ferramenta Sigra, da Siemens. Esta variável é obtida descontando-se o primeiro ciclo do registro dos demais ciclos subsequentes e, assim, tendo-se uma análise de sensibilidade durante a OP.

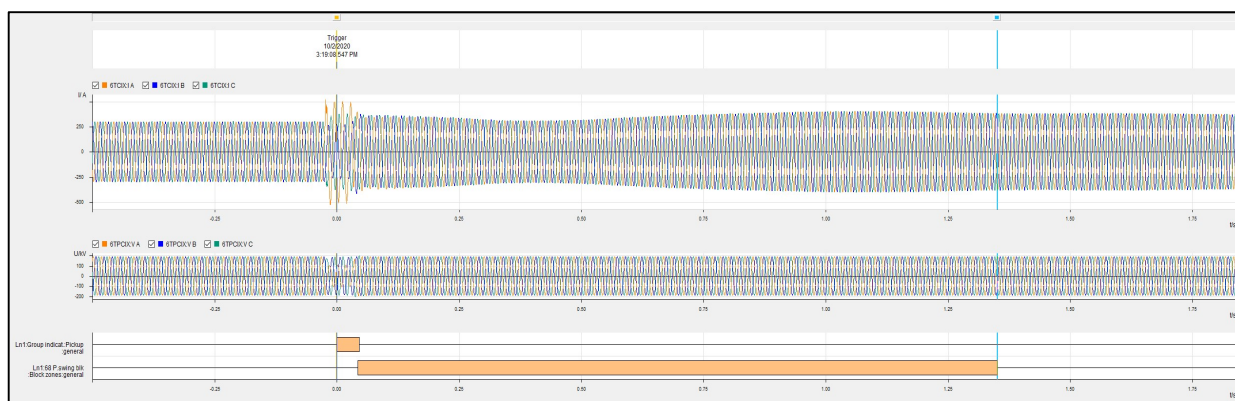


Figura 3 – Sinais de Tensão e de Corrente e Início da Oscilação de Potência em Ariquemes

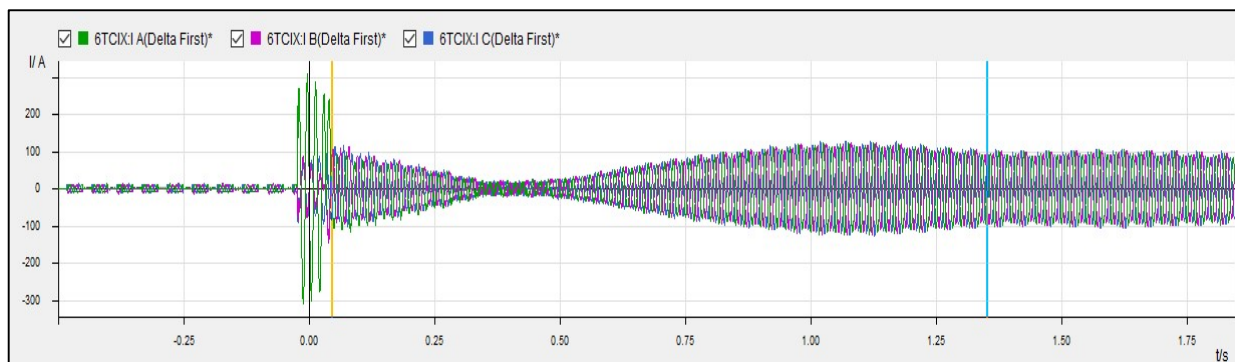


Figura 4 – Sinais de Corrente “Delta First” em Ariquemes. Software Sigra

4.1.2 Análise do Comportamento Mecânico

Na Figura 5, tem-se os registros referentes ao monitoramento da vibração de mancal, tanto absoluta como relativa, em diferentes posições angulares de monitoramento, onde pode-se verificar tais pontos de monitoramento de acordo com o apresentado na Figura 1. Interessante notar que no início do processo de OP – vide Figura 3, há um aumento da vibração de mancal do CS de Ariquemes. Vale destacar que, como mencionado no item 4.1.1, após transcorridos aproximadamente 2,5s do início da OP, ocorre um curto-circuito fase-terra (fase B). No entanto, é possível verificar que já no início da OP ocorre uma variação (aumento) das variáveis de vibração de mancal do CS.

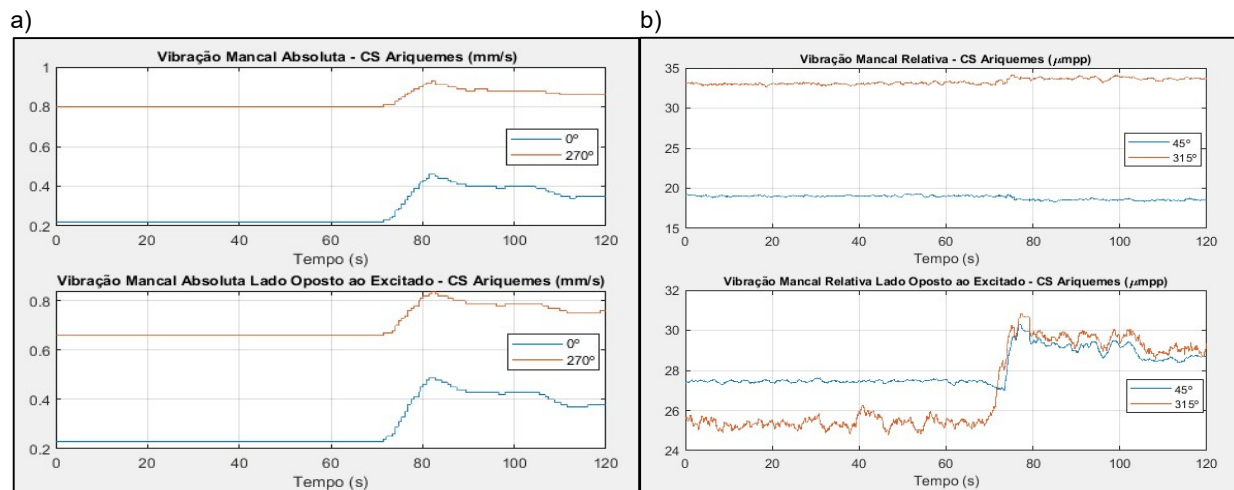


Figura 5 – Monitoramento CS Ariquemes, a) Vibração Mancal Absoluta, b) Vibração Mancal Relativa

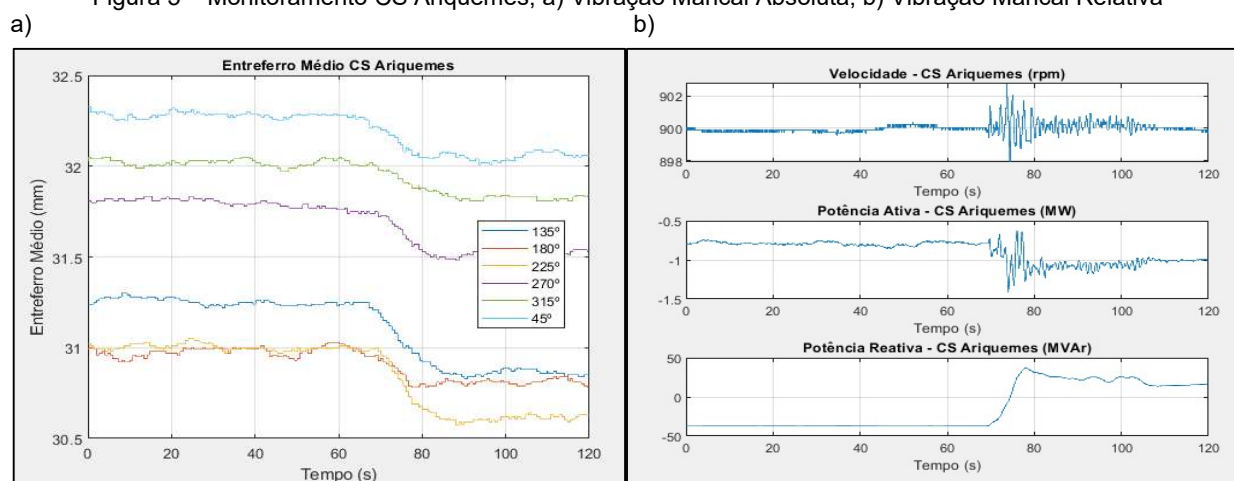


Figura 6 – Monitoramento CS Ariquemes, a) Entreferro Médio, b) Velocidade, Potências Ativa e Reativa

Na Figura 6, verifica-se a diminuição do entreferro do CS, contudo foi uma variação não tão significativa. Interessante notar que a velocidade do CS, praticamente, não apresentou variação, enquanto observa-se a variação das potências ativas e reativas, devido ao evento de curto-circuito na LT, após transcorridos 2,5 s do início da OP.

4.2 Breve Descrição do Segundo Evento

O segundo evento de OP analisado no sistema ACRO ocorreu no dia 21/11/2020, às 10:57:07.703h, e apresentou a FCE entre a LT de JP e PB C2. A causa raiz do início da OP foi uma injeção de potência no sistema ACRO pelo complexo do Madeira via o TF13 (que conecta de modo síncrono o sistema do Madeira ao SIN) [8]. Este evento culminou com o desligamento dos CS de AQ e JP, após a atuação das proteções de sobrefrequência. Na Figura 7, tem-se o início da FCE, com a atuação da PPS e na Figura 8 tem-se o sinal de corrente "Delta First". Já na Figura 9, tem-se o diagrama R-X com a tendência de centro elétrico e atuação da PPS. Por fim, na Figura 10, tem-se a oscilografia do CS de Ariquemes, onde é possível verificar a oscilação de potência do CS, a significativa variação de potência ativa e a sobrefrequência atingindo o valor de 65,88 Hz. Interessante notar que o ajuste de disparo instantâneo do segundo estágio de sobrefrequência da proteção do CS está ajustado em 66 Hz / 0s.

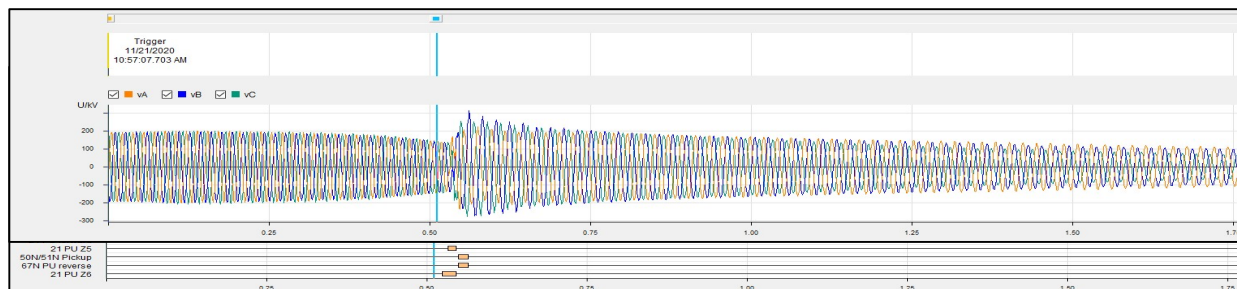


Figura 7 Oscilação de Potência com Formação de Centro Elétrico – LT JP – PB

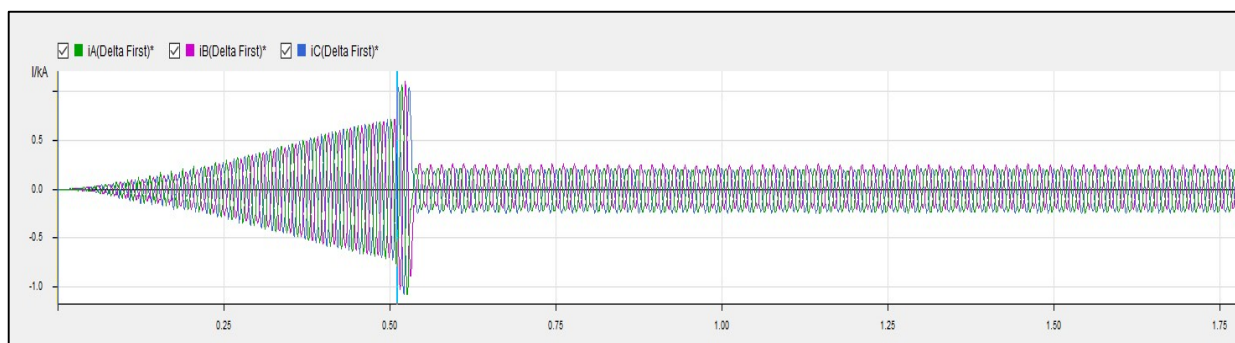


Figura 8 – Sinais de Corrente “Delta First” em Ariqueles. Software Siga

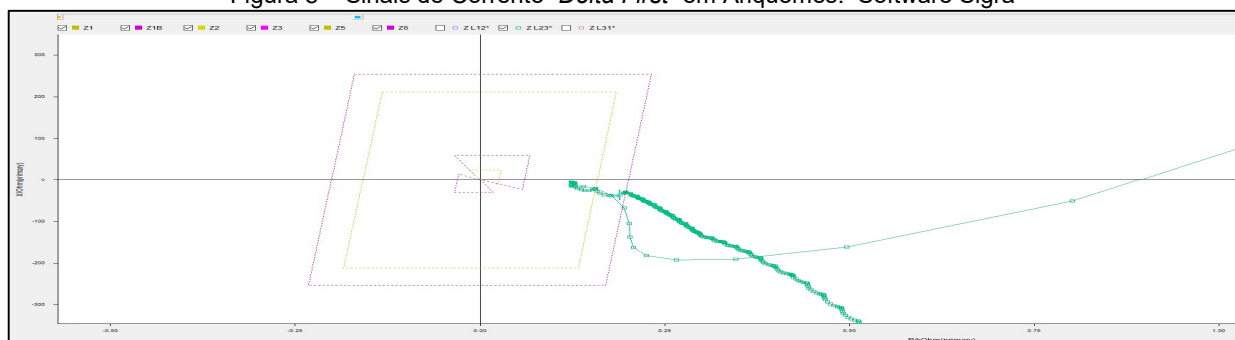


Figura 9 – Oscilação de Potência com Perda de Sincronismo – Formação de Centro Elétrico entre JP – PB

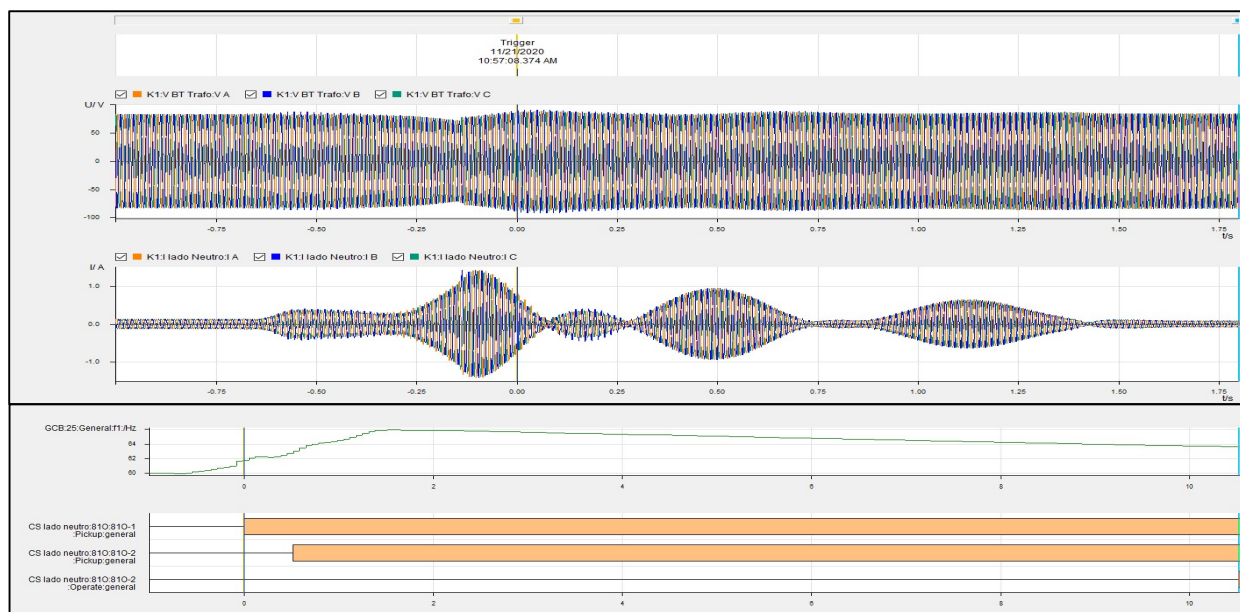


Figura 10 – Oscilografia Relé 7UM do CS de Ariqueles durante a Perturbação

4.2.1 Análise do Comportamento Mecânico

Na Figura 11, tem-se o monitoramento das variáveis de vibração de mancal, tanto absoluta como relativa do CS de Ariqueles. Neste caso, nota-se uma variação nas vibrações de mancal durante todo o processo de OS.

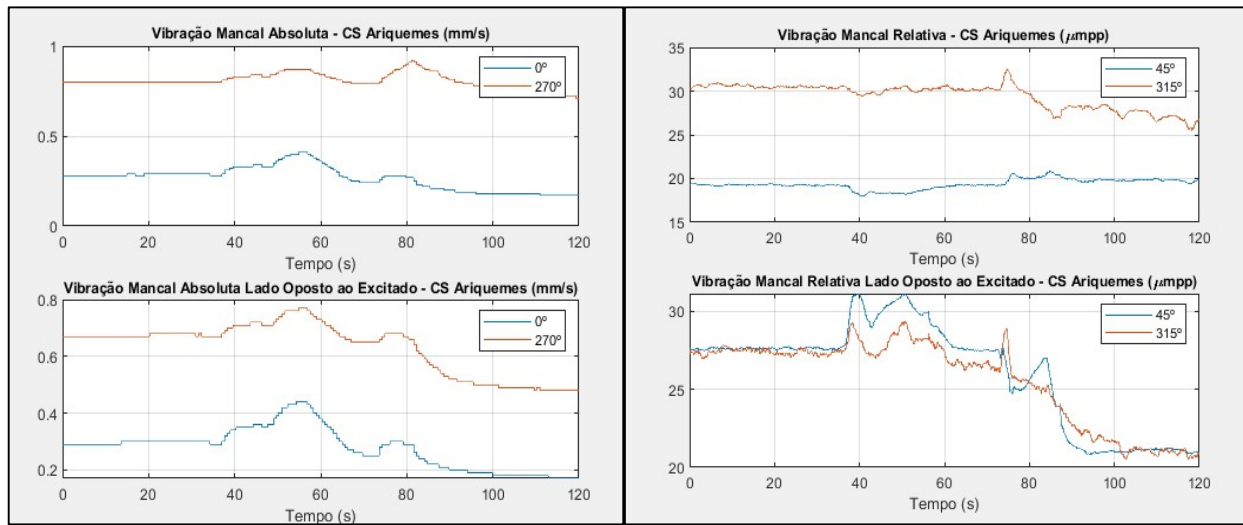


Figura 11 – Monitoramento Variáveis Mecânicas de Vibração do CS de Ariquemes

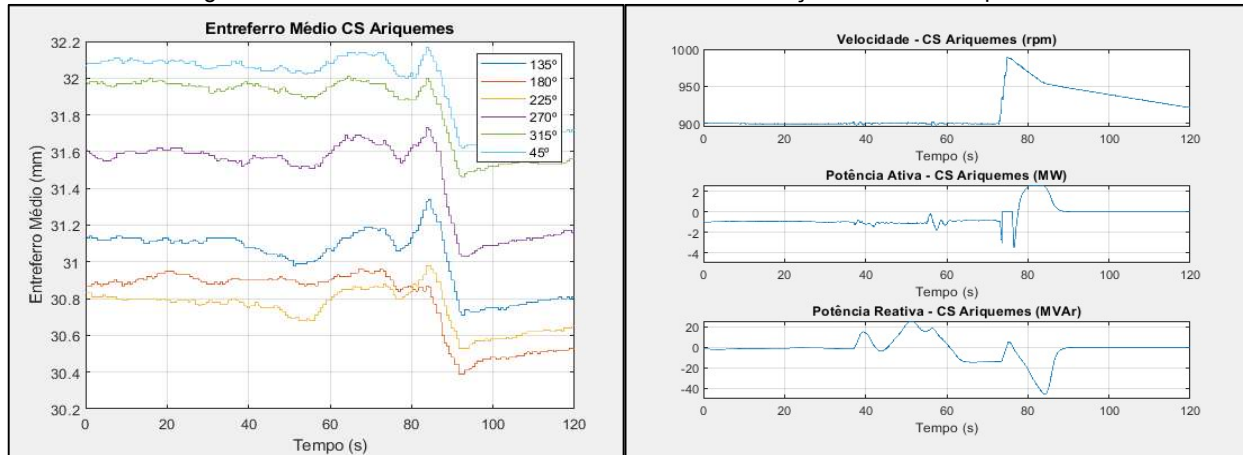


Figura 12 – Monitoramento Variáveis Mecânicas Entreferro, Velocidade e Potência

Já na Figura 12, tem-se o monitoramento do entreferro médio, velocidade e potências ativa e reativa. Nota-se uma variação significativa do entreferro médio do CS, e a velocidade atingindo o valor aproximado de 990 rpm (10% acima da velocidade nominal).

5.0 O USO DA TRANSFORMADA DE WAVELET

Com o intuito de se realizar uma comparação quantitativa do fenômeno de oscilação de potência das duas perturbações analisadas, utilizou-se a Transformada de *Wavelet* (TW), considerando-se os sinais como sendo não-estacionários, para a decomposição do sinal em níveis de aproximação e de detalhe, via a análise de multiresolução, com a decimação do sinal (divisão do sinal analisado pelo fator 2). Utilizou-se a *Wavelet* “mãe” *Dalbechies*, 4ª ordem, com 6 níveis de decomposição. Após isso, computou-se a “pseudo-energia” de Frobenius [1], como sendo:

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N [d(i)]^2}, \text{ onde 'd' representa o nível de detalhe do sinal de corrente "Delta First" da fase A.}$$

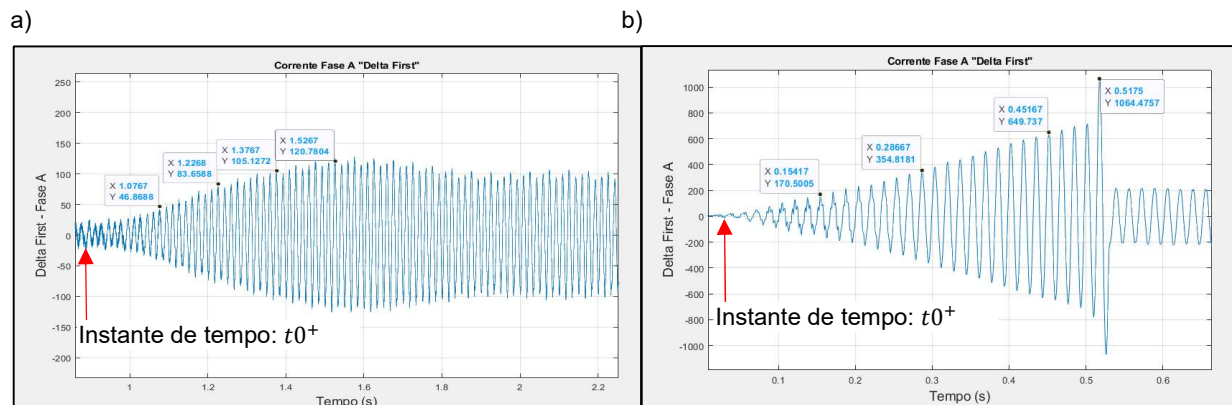


Figura 13 - Sinal Corrente Fase A “Delta First” Perturbações: a) 02/10/2020, b) 21/11/2020

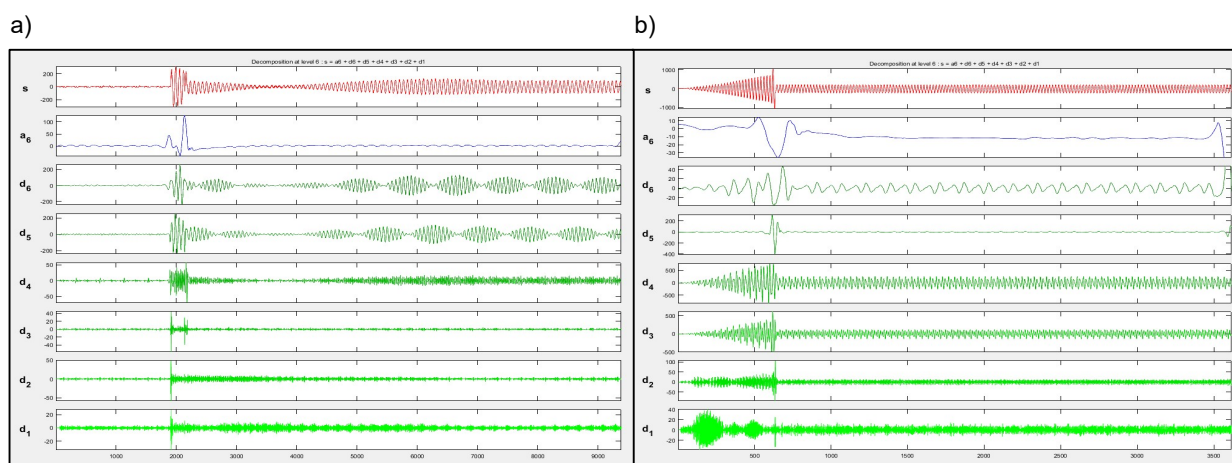


Figura 14 – Decomposição Sinal “Delta First” Níveis de Detalhe das Perturbações: a) 02/10/20, b) 21/11/2020
Na Figura 13, tem-se o sinal de corrente “Delta First” da fase A, o instante de tempo do início da OP, indicado por t_0^+ , e os respectivos intervalos de tempo analisados. Estes sinais foram utilizados para a análise com a TW.

Já na Figura 14, tem-se a decomposição do sinal “Delta First” em 6 níveis de detalhe de ambas as perturbações. O intervalo de tempo analisado para cada nível de detalhe foi de 150 ms.

Nas Tabelas 2 e 3, tem-se os valores encontrados de “pseudo-energia” obtidos pela norma de *Frobenius*, para ambas as perturbações. O sinal analisado foi o “Delta First” da corrente da fase A. Como era de se esperar, o sinal analisado referente à perturbação do dia 02/10/2020, apresentou valores de “pseudo-energia”, dos sinais de detalhe, bem menores do que os encontrados em relação à perturbação do dia 21/11/2020.

Vale destacar que, via a análise de multiresolução do sinal, a frequência de oscilação da primeira perturbação encontrou-se entre as decimações referentes aos níveis de detalhe **d5** e **d6**, portanto entre 1,88 Hz e 0,94 Hz. Já para a segunda perturbação, a frequência de oscilação se encontrou entre os níveis de detalhe **d3** e **d4**, portanto, entre 7,5 Hz e 3,75 Hz.

Tabela 2 – Pseudo-Energia de Frobenius ‘D’ – Perturbação 02/10/2020

Nível de Detalhe	Pseudo-Energia de Frobenius ‘D’			
	$t_0^+ + 150\text{ms}$	$t_0^+ + 300\text{ms}$	$t_0^+ + 450\text{ms}$	$t_0^+ + 500\text{ms}$
d1	33,31	47,10	57,60	113,53
d2	28,22	41,97	51,48	172,63
d3	20,27	30,38	38,19	170,63
d4	41,53	64,29	75,98	442,01
d5	85,65	122,97	149,53	2415,60
d6	61,34	92,31	131,75	1986,30

Tabela 3 – Pseudo-Energia de Frobenius ‘D’ – Perturbação 21/11/2020

Nível de Detalhe	Pseudo-Energia de Frobenius 'D'			
	$t0^+ + 150ms$	$t0^+ + 300ms$	$t0^+ + 450ms$	$t0^+ + 500ms$
d1	200,63	305,81	330,61	332,99
d2	122,29	230,64	327,12	374,10
d3	273,90	1051,10	2494,30	2985,30
d4	560,51	2164,50	4764,20	6074,80
d5	22,18	42,63	80,01	215,75
d6	25,36	92,15	210,49	253,39

6.0 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a importância da verificação dos fenômenos sistêmicos de oscilação de potência em linhas de transmissão eletricamente próximas à operação de compensadores síncronos e, em casos mais críticos, considerando-se a formação de centro-elétrico nas suas proximidades. Através do sistema de monitoramento das variáveis mecânicas do compensador, foi possível ter-se uma análise pormenorizada das principais grandezas, como vibração de mancal, entreferro, velocidade, etc.

Com a análise de duas perturbações no sistema Acre-Rondônia foi possível verificar o comportamento dos compensadores diante de tais cenários avaliados.

Utilizando-se a Transformada de *Wavelet* e computando-se a “pseudo-energia” do sinal “*Delta First*” da corrente da fase A de ambas as perturbações foi possível verificar que a oscilação de potência referente à segunda perturbação apresentou uma “pseudo-energia” mais significativa, onde era de se esperar devido ao comportamento apresentado tanto das variáveis mecânicas quanto da variável elétrica de sobrefrequência, a qual mostrou uma significativa aceleração do compensador.

Por fim, observa-se que a habilitação de uma possível proteção de oscilação de potência para o compensador síncrono, referente à segunda perturbação, por exemplo, poderia ter emitido um sinal disparo para o disjuntor antes dos 10s, que foi o tempo de atuação da proteção de sobrefrequência, minimizando-se os esforços mecânicos do compensador.

No entanto, deve-se avaliar tal proposta com cautela, uma vez que se trata de um fenômeno sistêmico e, portanto, deve-se realizar uma análise mais abrangente, considerando-se, por exemplo, a realização e análise de estudos de simulação eletromecânica para a verificação da estabilidade dinâmica, quando da simulação de diversos cenários e de contingências na área geoeletrica de interesse.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.Fernandes, M.Muniz, D.Dotta, D.Gonçalves, “Novas Técnicas de Oscilação de Potência Baseadas em Medição Sincronizada de Fasores e Transformada de Wavelet”, XXV SNPTTE, 2019.
- [2] R.Fernandes, B.Isolani, S.Souza, “Meios e Métodos de Detecção de Oscilação de Potência para a prevenção de Blackouts”, XI STPC, 2012.
- [3] T.Alves, A.Duarte, D.Oliveira, A.Castro, I.Cardoso, A.Coelho, “Avaliação das Funções de Proteção de Unidades Geradoras Frente ao Fenômeno de Oscilação de Potência Através de Teste no Simulador Digital em Tempo Real – RTDS”, XXV SNPTTE, 2019.
- [4] NERC - North American Electric Reliability Corporation "Protection System Response to Power Swing" System Protection and Control Subcommittee, August 2013.
- [5] IEEE PSRC WG D6, “Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines”, July. 2005.
- [6] Material de Treinamento Compensadores Síncronos de Ji-Paraná e Ariquemes, Voith, 2020.
- [7] Síntese Gerencial ONS – Perturbações Ocorridas no Sistema Interligado Nacional. Período: 28/19/2020 a 04/10/2020.
- [8] Síntese Gerencial ONS – Perturbações Ocorridas no Sistema Interligado Nacional. Período: 16/11/2020 a 22/11/2020.

DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Oliveira Fernandes, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) no ano de 2001, com mestrado na área de Estabilidade Transitória com PMU pela Unicamp no ano de 2019. Atualmente é doutorando na Unicamp na área de Transitórios Eletromagnéticos. É Engenheiro de Proteção e Controle na Argo Energia. Membro Individual do Cigré-B5 e Membro Correspondente do WGB5.62, WGC2.18 e WGC4.62 do Cigre. É Coordenador no Brasil do Cobei junto à IEC – CE03.TC95-MT04 (Funções de Proteção e Guias de Aplicação).

(2) Beatriz de Lima Tavares, graduada em Engenharia Elétrica pela PUC Minas, possui Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela PUC Minas, Mestre em Sistemas de Potência pela UNICAMP e Doutoranda na mesma área pela USP São Carlos. Atua há 13 anos no setor de energia, com experiência em planejamento da expansão, regulação, operação e manutenção. Ocupa atualmente o cargo de Gerente de Expansão na Argo Energia.

(3) Caio Fernando Eleutério, Engenheiro Civil graduado pela Universidade Cruzeiro do Sul, com Especialização em Engenharia de Automação e Controle pela Universidade Católica de Petrópolis. Atualmente é Engenheiro Especialista em Máquinas Síncronas responsável pela área dos Compensadores Síncronos na Argo Energia.

(4) Marcos Barbosa, Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Possui experiência nas áreas de Proteção e Controle de Subestações e Linhas de Transmissão 500kV, 230kV, 138kV e 69kV. Atualmente é Engenheiro Especialista SPCS na Argo Energia.