



Grupo de Estudo de Proteção e Controle-GPC

NOVAS TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA BASEADAS EM MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES E TRANSFORMADA DE WAVELET

***RAFAEL DE OLIVEIRA FERNANDES(1); MAURO MUNIZ(2); DANIEL DOTTA(3); DAVID DO NASCIMENTO
GONÇALVES(4); ONS(1); ONS(2); UNICAMP(3); ONS(4);**

RESUMO

Esse trabalho abordará dois métodos diretos para a análise de estabilidade dinâmica durante condições de oscilação de potência no SIN (Sistema Interligado Nacional), com somente o uso de medições sincrofásoriais. O primeiro método abordará a dinâmica do vetor de impedância em relação ao seu escorregamento e a sua aceleração, propondo-se um novo ajuste, e o segundo método utilizará a Transformada de *Wavelet* (TW) aplicada no sincrofasor de diferença angular de uma importante Linha de Transmissão (LT) do SIN, determinando-se a energia crítica, a fim de que seja possível estimar o tempo crítico da oscilação de potência instável.

PALAVRAS-CHAVE

Oscilação de Potência, PMU, Escorregamento, Aceleração, Transformada de *Wavelet*

1.0 - INTRODUÇÃO

A oscilação de potência é um evento transitório causado basicamente por fenômenos que ocorrem no sistema elétrico tais como: curto circuito, chaveamentos, desconexão de geradores, perda e/ou entrada de grandes blocos de carga, etc. Esses eventos causam grandes oscilações de potência ativa e reativa, queda de tensão, instabilidade de tensão e/ou ângulo entre geradores e consumidores (1). Dependendo da severidade da oscilação, pode ocorrer a migração da impedância para a região de operação da proteção de distância, com operação indevida e, eventualmente, evoluir para um efeito cascata, resultando, por exemplo, em um *blackout*. Assim, os relés de proteção devem ter meios de detecção seletiva e coordenada de oscilações estáveis (síncronas) e instáveis (assíncronas).

Quando houver a detecção de oscilações estáveis o relé deverá bloquear o sinal de disparo e, quando a oscilação não resultar em um novo ponto de operação aceitável será considerado um tipo de oscilação instável (2). Nesse caso, resultará em perda de sincronismo entre o sistema e o grupo de geradores e um sinal de disparo deverá ser emitido como ação corretiva, a fim de promover um ilhamento adequado no subsistema. Devido a importância das oscilações de potência em um sistema elétrico, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos últimos anos no intuito de garantir a correta diferenciação entre situações de curto circuito e aquelas típicas de oscilações de potência. Destacam-se os métodos convencionais, como características concêntricas e de duplo *blinder* (2-4).

Em (4), utiliza-se o critério da taxa de variação da impedância aparente como forma preditiva de detecção da oscilação. Outros métodos ditos "não-convencionais" foram desenvolvidos, como o método do cálculo contínuo da impedância e da taxa de variação da magnitude da tensão no centro elétrico (3). Devido ao crescimento do sistema elétrico e, com isso, o aumento da sua complexidade, deve-se analisar os casos críticos através de simulações eletromecânicas de acordo com os estudos pré-operacionais do ONS, analisando a viabilidade ou não do bloqueio por oscilação a fim de se coordenar com a função de proteção de distância. Esse trabalho traz uma nova abordagem utilizando somente medição sincronizada de fasores para o monitoramento contínuo do escorregamento e da aceleração do vetor de impedância, assim como a avaliação do tempo crítico da oscilação através do uso da TW.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Figura 1 ilustra o diagrama de tensão de uma linha de transmissão com carga. As redes conectadas são representadas por duas fontes equivalentes: E_1 e E_2 , respectivamente. As impedâncias das fontes: Z_{S1} e Z_{S2} correspondem à potência de curto-circuito dessas fontes. O ângulo δ representa o ângulo de transmissão de potência. Caso a potência ativa transferida aumente, este ângulo torna-se maior. Normalmente, a rede opera com ângulos de tensão menores que 60° , a fim de garantir a sua estabilidade. Se todas as tensões forem divididas pela corrente de carga, um diagrama de impedância da linha sob carga pode ser obtido. A representação no plano de impedância é realizada tal que o relé de distância considerado esteja localizado na origem do sistema de coordenadas R-X, de acordo com a Figura 2. Com esta representação, a impedância de carga medida pelo relé é obtida e a distância para a característica de partida do relé pode ser determinada. Quando há uma mudança da carga, a impedância de carga se move ao longo de uma trajetória circular. Se $E_1 = E_2$, o qual pode usado como uma primeira aproximação, a impedância segue a direção da linha, a qual é perpendicular ao somatório das impedâncias: $Z_{total} = Z_{S1} + Z_{S2} + Z_L$.

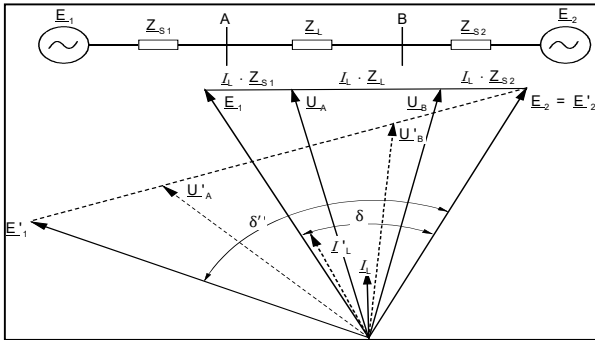


Figura 1 - Diagrama de Impedância

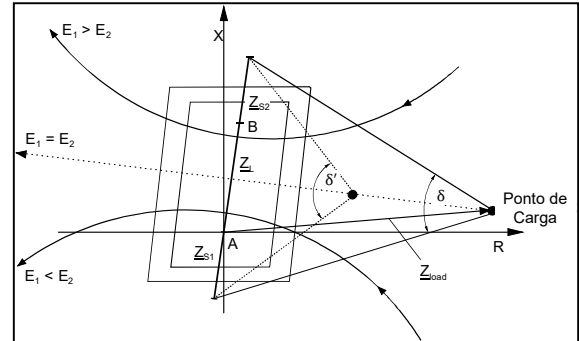


Figura 2 - Trajetória da Impedância

Como o fenômeno de oscilação afeta as três fases simultaneamente, considera-se somente o circuito de sequência positiva para a análise. De acordo com a Figura 1, tem-se:

$$-E_1 + Z_{S1}I_1 + Z_L I_1 + Z_{S2}I_1 + E_2 = 0, \quad I_1(Z_{S1} + Z_L + Z_{S2}) = E_1 - E_2, \quad I_1 = \frac{E_1 - E_2}{(Z_{S1} + Z_L + Z_{S2})}$$

$$V_1 = E_1 - I_1 Z_{S1} = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{(Z_{S1} + Z_L + Z_{S2})} Z_{S1}, \quad Z_{medido}^{relé} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{E_1 - \frac{E_1 - E_2}{(Z_{S1} + Z_L + Z_{S2})} Z_{S1}}{\frac{E_1 - E_2}{(Z_{S1} + Z_L + Z_{S2})}} = \frac{E_1}{E_1 - E_2} (Z_{S1} + Z_L +$$

$$Z_{S2}) - Z_{S1}. \text{ Considerando } \dot{n} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{E_1 \angle \alpha_1}{E_2 \angle \alpha_2} = \frac{|\dot{E}_1|}{|\dot{E}_2|} \angle (\alpha_1 - \alpha_2) = |\dot{n}| \angle (\delta)$$

$$Z_{medido}^{relé} = \frac{\dot{n}}{\dot{n} - 1} (Z_{S1} + Z_L + Z_{S2}) - Z_{S1} \quad (1)$$

3.0 METODOLOGIA DE CÁLCULO UTILIZADO PELOS RELÉS DE PROTEÇÃO PARA A DETECÇÃO DA OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA

Torna-se necessário um estudo sofisticado da rede elétrica a fim de se determinar os ajustes adequados para a característica concêntrica dos blinders (1-5). Os ajustes no relé são fixos e os mesmos não são alterados quando ocorre uma alteração na topologia do sistema. Caso o estudo não seja detalhado, tendo-se em vista a necessidade de se abranger as condições de contingência mais críticas, a presença de oscilação de potência ou da perda de sincronismo poderá levar o relé a atuar indevidamente.

A oscilação de potência é sempre um fenômeno simétrico e qualquer corrente ou tensão assimétrica pode ser usada para liberação da função de proteção de distância. Quando ocorre um disparo monopolar, considerando o religamento automático habilitado, a oscilação de potência provavelmente será sensibilizada durante o tempo morto monopolar. É muito importante que haja uma adequada detecção da oscilação neste caso. O método baseado no cálculo contínuo da impedância tem por finalidade resolver este problema.

De acordo com a Figura 2, quando o vetor de impedância apresentar uma trajetória com tendência a ultrapassar totalmente o plano de impedância delimitado pelo polígono, configura-se uma condição de oscilação instável. Quando o vetor de impedância apresenta uma característica com tendência a retornar ao ponto de operação estável, sem ultrapassar totalmente o blinder concêntrico, configura-se uma oscilação estável.

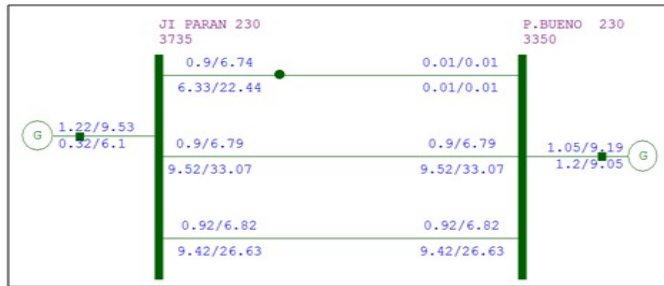


Figura 3 - Impedância Equivalente do Sistema

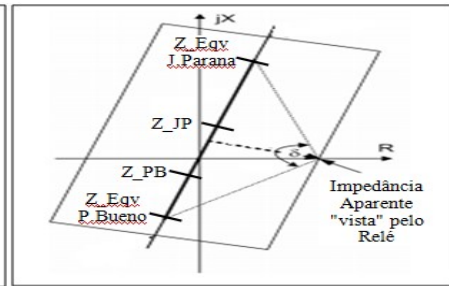


Figura 4 - Diagrama de Impedância

Para o sistema em estudo da Figura 3, a proteção de perda de sincronismo está inserida no relé de proteção instalado no circuito 3, entre as Subestações de Pimenta Bueno e de Ji-Paraná. Para esse relé, utilizando-se o fator de divisão de corrente, a impedância aparente "vista" pelo relé será: $Z_{total} = 341,41$ Ohms, em módulo. O ONS utiliza para o ajuste resistivo e reativo dos *blinders*, em valores primários, considerando como valores base: $V_{base} = 230kV$ e $MVA_{base} = 100$, os seguintes valores:

- 1) Blinder Externo: Parte Resistiva = 40% ou 212 Ohms e Parte Reativa = 50% ou 265 Ohms
- 2) Blinder Interno: Parte Resistiva = 30% ou 159 Ohms e Parte Reativa = 40% ou 212 Ohms

Com isso, o ajuste do ângulo que será "visto" pelo relé, para essas condições de ajuste, será: External Blinder = $\frac{|Z_T|}{\tan(\frac{\delta}{2})} \implies \delta = 87^\circ$. De acordo com [2], a taxa de variação da impedância pode ser calculada considerando uma frequência de oscilação típica e/ou determinada. Nesse exemplo, considerando-se uma frequência de 1 Hz tem-se:

- 1) Com 3 circuitos, $\left| \frac{dZ_p}{dt} \right| = \frac{|Z_t|}{2} \times \frac{|w|}{2} \times \frac{1}{\sin^2 \frac{\delta}{2}} \implies \left| \frac{dZ_p}{dt} \right| = \frac{|341|}{2} \times \frac{|2\pi \times 1|}{2} \times \frac{1}{\sin^2 \frac{87}{2}} = \mathbf{1139 \text{ Ohm/s}}$
- 2) Com 1 circuito, $\left| \frac{dZ_p}{dt} \right| = \frac{|Z_t|}{2} \times \frac{|w|}{2} \times \frac{1}{\sin^2 \frac{\delta}{2}} \implies \left| \frac{dZ_p}{dt} \right| = \frac{|138|}{2} \times \frac{|2\pi \times 1|}{2} \times \frac{1}{\sin^2 \frac{42}{2}} = \mathbf{1805 \text{ Ohm/s}}$

Observa-se que além de se ter alterações nos equivalentes, a alteração na topologia também afetará o valor da variação da impedância "vista" pelo relé de proteção. Dessa forma, como os relés de proteção atuais possuem ajustes fixos para a proteção de oscilação de potência (1-3), há um problema na discriminação correta desse evento devido, principalmente, às condições sistêmicas no SIN. Dessa forma, novas abordagens vêm contribuindo no tocante à aplicações com tendência à tomada de decisão em tempo real e, nesse trabalho, será abordado o uso da tecnologia de medição sincronizada de fasores, como forma preditiva (6).

2.1 PRIMEIRA OCORRÊNCIA REGISTRADA EM 29 DE AGOSTO DE 2017

Essa perturbação teve início às 15h48min25s63ms (horário de Brasília), com a incidência de um curto-circuito bifásico, envolvendo as fases A e B da LT Porto Velho - Abunã (C1), eliminado pela atuação de suas proteções em ambos os terminais. Após o desligamento da LT 230 kV Porto Velho - Abunã C1, seguiu-se um período de subtensão com recuperação lenta da tensão nas áreas de Rio Branco e Porto Velho, acarretando perda de carga em Porto Velho. Após 10 segundos, aproximadamente, ocorre uma nova perda de carga, agora na região de Rio Branco, provocando o início de uma oscilação de potência que culminou com os desligamentos das LTs de 230 kV Ji-Paraná – Pimenta Bueno (C1/C2/C3) por atuação da proteção de Perda de Sincronismo (ANSI 68) abrindo a interligação e provocando o ilhamento do sistema Acre (SE Rio Branco I) / Rondônia (SE P.Velho) com a UHE Samuel e o "Back-to-Back" do sistema HVDC do Rio Madeira. O montante de cargas interrompidas nos estados do Acre e Rondônia foi de 711 MW.

2.2 SEGUNDA OCORRÊNCIA REGISTRADA EM 31 DE MARÇO DE 2018

A segunda perturbação consistiu no desligamento das LTs 230 kV Ji-Paraná / Pimenta Bueno C1, C2 e C3 ao ligar o transformador TF13 (provisório) da SE Coletora Porto Velho para atendimento às condições para energização do transformador conversor do Polo 3 na SE Coletora Porto Velho. Após o fechamento do TF13, foram observadas oscilações não amortecidas, que culminaram com a perda de sincronismo do sistema Acre-Rondônia em relação ao restante do SIN, com abertura da interligação pela atuação das proteções de perda de sincronismo. Ocorreu o desligamento automático da LT 230 kV Pimenta Bueno - Ji-Paraná C3, com abertura dos disjuntores em ambos os terminais em função da atuação das proteções principal e alternada de linha sensibilizadas pela atuação da função de perda de sincronismo no terminal de Ji-Paraná e recepção de transferência direta de disparo (TDD) no terminal de Pimenta Bueno. Como consequência do desligamento supracitado, ocorreram também os desligamentos das LTs 230 kV Pimenta Bueno - Ji-Paraná C1 e C2 em ambos os terminais pela recepção de TDD (atuação da função de PPS da LT 230 kV Pimenta Bueno - Ji-Paraná C3). Não houve religamento automático das LTs 230 kV Pimenta Bueno - Ji-Paraná C1 e C2 e C3 pois a atuação da função PPS não ativa o esquema de RA. Houve desligamento das unidades geradoras 01 e 03 da UHE Rondon II pelas proteções de sobrevelocidade, em virtude de desligamento das LTs 230 kV Pimenta Bueno - Ji-Paraná, C1, C2 e C3.

2.3 SIMULAÇÃO OFFLINE

Na Figura 5, tem-se o resultado da simulação eletromecânica realizada através do *software* Anatem do Cepel, a base de dados utilizada foi a de 2016, com o mesmo ponto de operação pré-falta registrado pelo estimador de estados do ONS. Essa simulação mostrou que a oscilação de potência estava sendo amortecida e o sistema tenderia retornar a um ponto de operação estável, no entanto, não foi simulada a perda de carga real de 40 MW que aconteceu no sistema em Rio Branco, o que levou o sistema à instabilidade, como pode ser verificado na Figura 6, através dos registros reais obtidos pelas PMU.

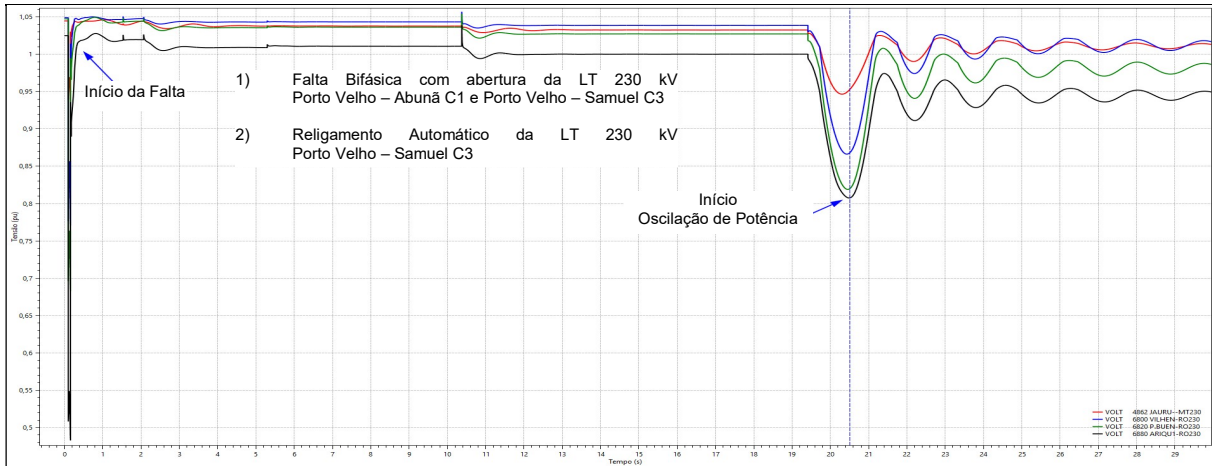


Figura 5 – Sistema Simulado sem Rejeição de Carga pós-falta (Oscilação de Potência Estável)

2.4 REGISTRO DA PERTURBAÇÃO PELAS PMU

Com o registro da PMU, a uma taxa de 60 frames/s, foram observados os fenômenos registrados na Figura 6, no entanto, observou-se que o sistema foi levado a um ponto de operação instável - formação de centro elétrico na linha de transmissão entre Ji Paraná e Pimenta Bueno, em 230 kV, devido à perda de carga em Rio Branco, o que culminou com a atuação da proteção de disparo por perda de sincronismo.

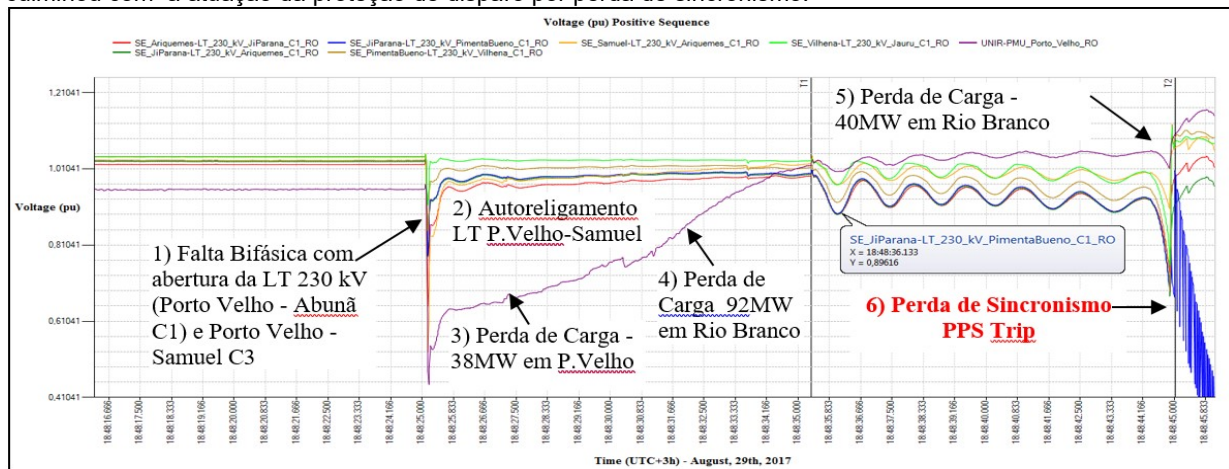


Figura 6 – Registro obtido pelas PMU

3.0 - O USO DE PMU PARA A DETECÇÃO DA OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA

De acordo com (7-11), há diversas possibilidades do uso da medição sincronizada de fasores para a verificação da oscilação de potência. Através dos resultados obtidos em (7), esse trabalho foi motivado a utilizar medições sincrofásoriais de modo a se obter uma proposta para a proteção preditiva de disparo por oscilação de potência, baseada somente em PMU.

3.1 RESULTADOS DE REGISTRO DE PMU - PRIMEIRA PERTURBAÇÃO ANALISADA

De acordo com a Figura 7, é possível observar o ponto de operação pré-falta, o instante do curto circuito ' t_0+ ', o equilíbrio entre a geração e a carga - após a eliminação do curto-circuito, o início da oscilação de potência devido a rejeição de carga e, finalmente, o instante de tempo em que o vetor de impedância incursiona para área de disparo.

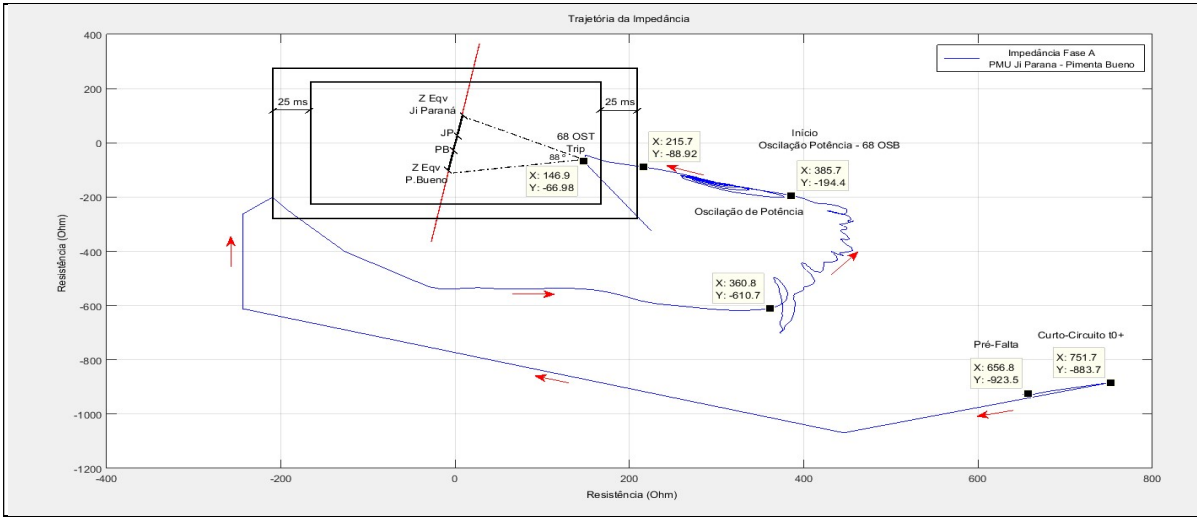


Figura 7 – Trajetória da Impedância - Plano RX

Na Figura 8, tem-se a trajetória da diferença angular durante a perturbação e também a diferença angular entre as fontes. Durante a abertura do disjuntor da referida LT, a diferença angular entre as fontes atingiu, aproximadamente, 98°.

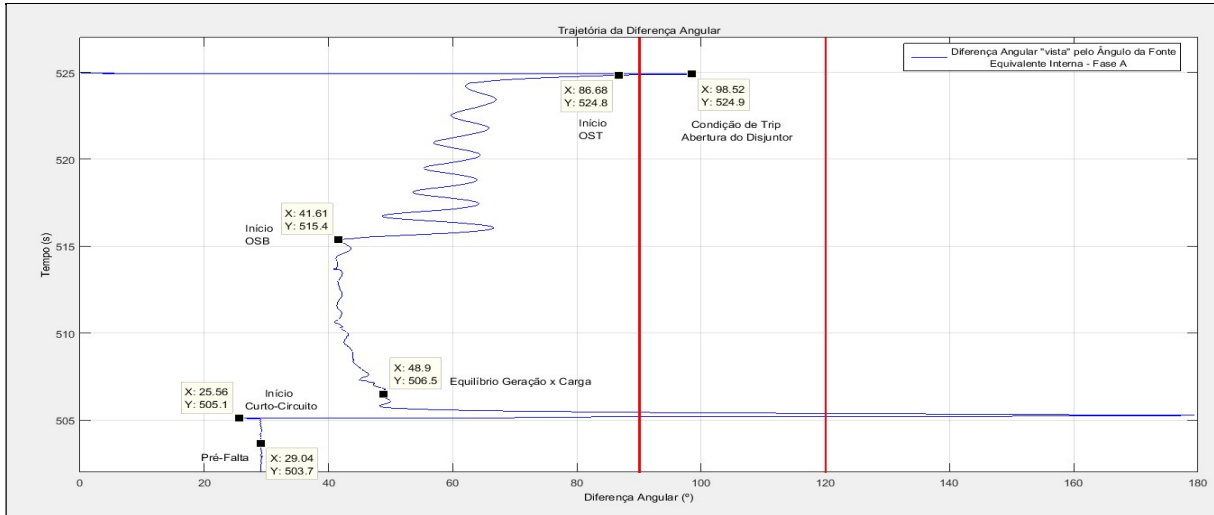


Figura 8 - Diferença Angular entre as Fontes Internas Equivalentes

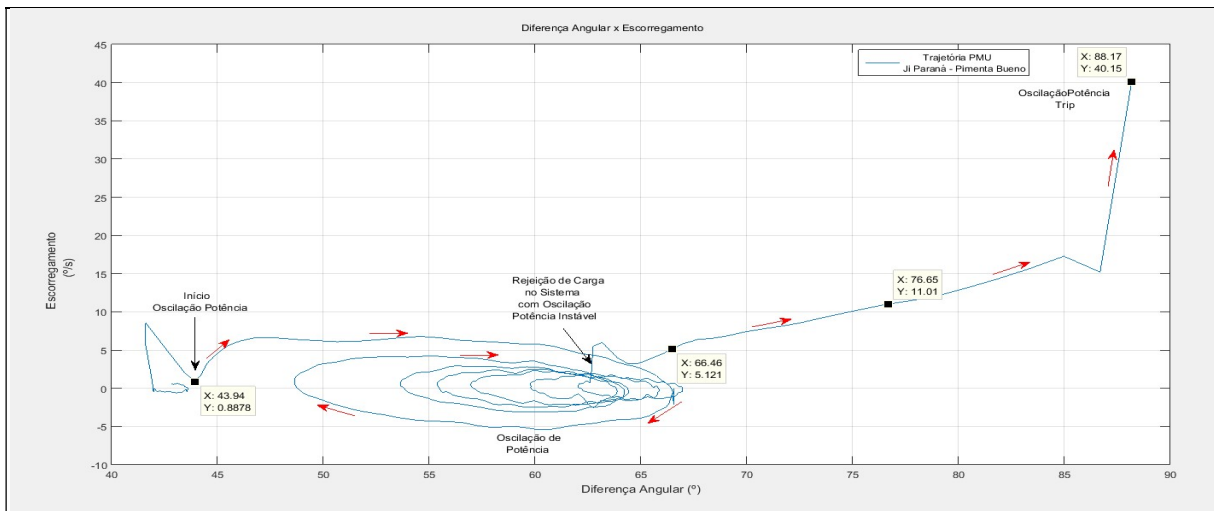


Figura 9 - Diferença Angular versus Escorregamento

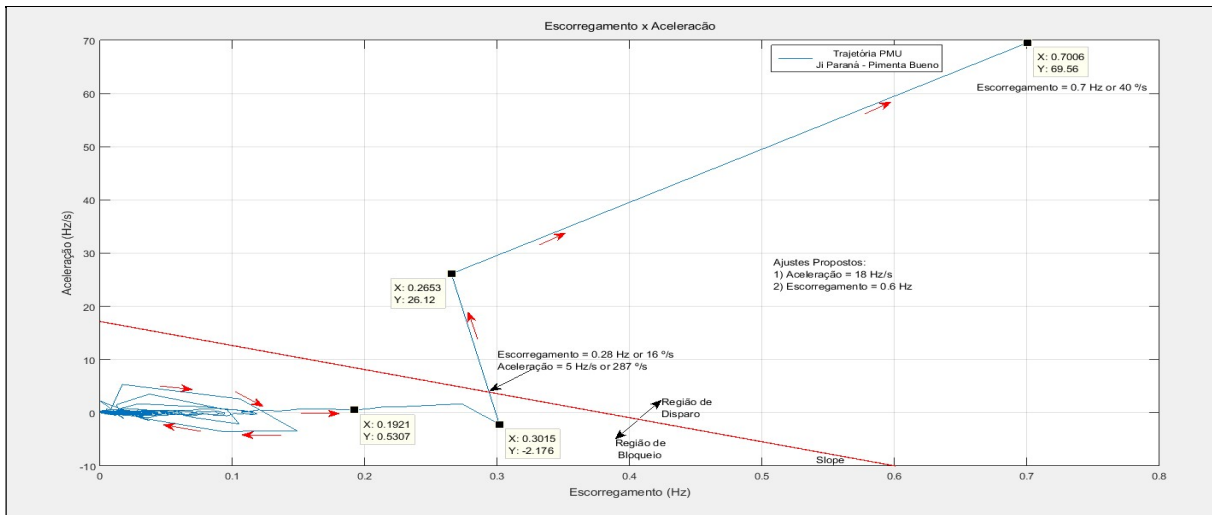


Figura 10 - Escorregamento versus Aceleração - Proposta de Ajuste baseada somente em PMU

Por fim, verifica-se nas Figuras 9 e 10, o escorregamento versus a diferença angular e também a aceleração versus escorregamento, respectivamente. Importante notar que durante o evento de rejeição de carga, que culminou num processo de oscilação de potência instável, o escorregamento estava próximo de zero, com diferença angular entre as fontes em torno de 62° , com tendência à atingir um ponto de operação estável. Após esse instante, a diferença angular entre as fontes aumentou significativamente, assim como o escorregamento. No instante do disparo por oscilação de potência, a diferença angular medida entre as fontes estava em torno de 88° , corroborando com a demonstração realizada no item 3 desse trabalho. Já o escorregamento atingiu 40 %.

3.2 RESULTADOS DE REGISTRO DE PMU - SEGUNDA PERTURBAÇÃO ANALISADA

Serão mostrados os resultados gráficos da diferença angular, trajetória da impedância e a proposta de ajuste da proteção baseada somente em PMU. Interessante notar que esse foi um caso de instabilidade dinâmica (falta de torque de amortecimento), ao contrário do caso anterior, que apresentou uma instabilidade transitória (falta de torque de sincronismo).

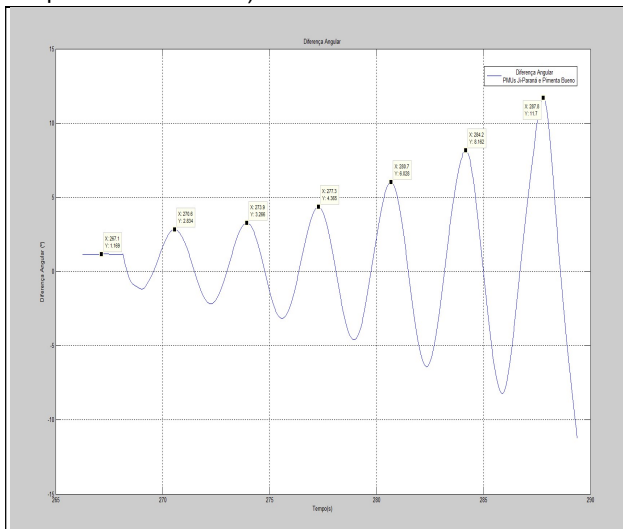


Figura 11 - Diferença Angular entre PMU

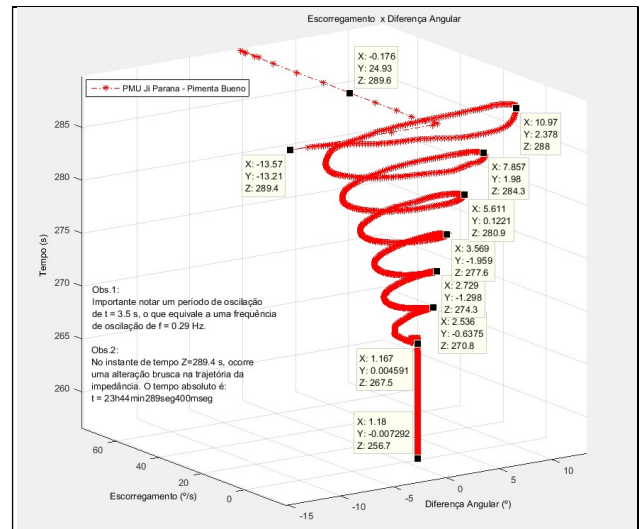


Figura 12 - Escorregamento x Diferença Angular

Na Figura 11 observa-se a diferença angular entre as PMU de Ji-Paraná e Pimenta Bueno, mostrando a instabilidade dinâmica. Já na Figura 12 é possível verificar o escorregamento versus a diferença angular. Na Figura 13 tem-se a trajetória do vetor de impedância e na Figura 14 tem-se a mesma trajetória, mas com o plano de impedância de ajuste do relé.

Nas Figuras 15 e 16 tem-se a evolução da trajetória do vetor de impedância com o tempo. Na Figura 17 tem-se o escorregamento versus a aceleração do vetor de impedância e na Figura 18 tem-se a proposta de proteção baseada somente em PMU. O ajuste de *slope* pode ser determinado de modo a manter uma seletividade e coordenação entre as regiões de bloqueio e de disparo de perda de sincronismo por oscilação.

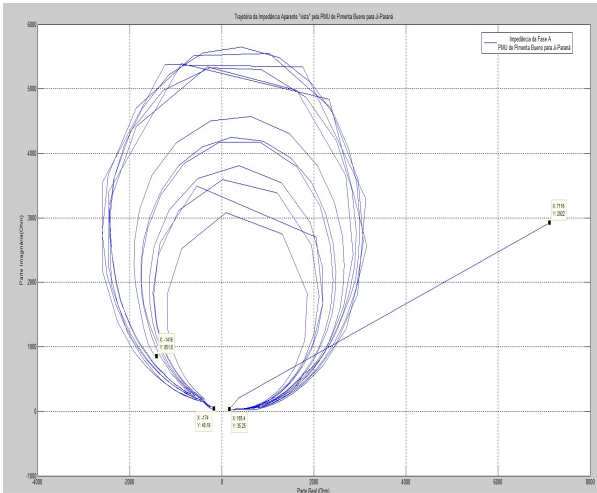


Figura 13 - Trajetória da Impedância

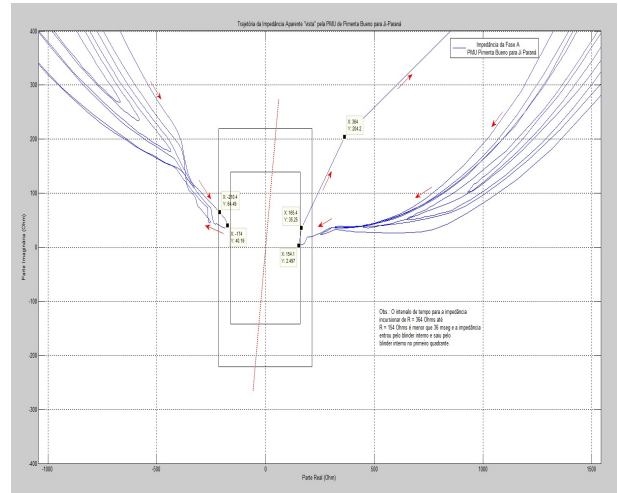


Figura 14 - Trajetória da Impedância - Plano RX

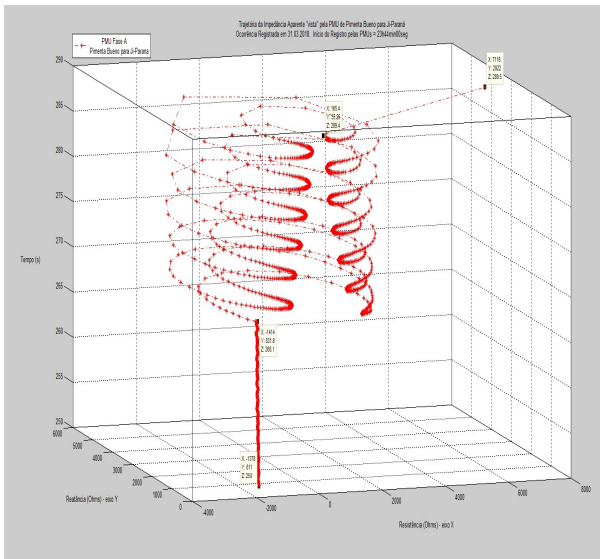


Figura 15 - Trajetória da Impedância com Evolução no Tempo "vista" pelo Terminal de PB

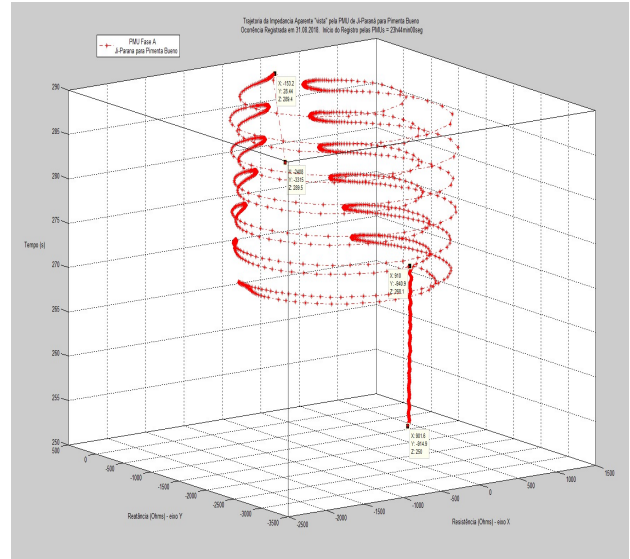


Figura 16 - Trajetória da Impedância com Evolução no Tempo "vista" pelo Terminal de JP

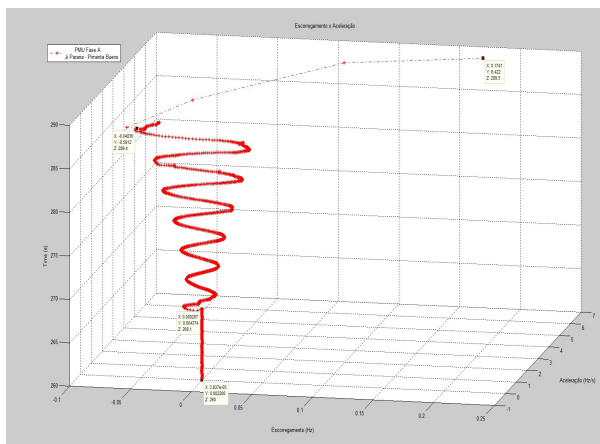


Figura 17 – Escorregamento versus Aceleração

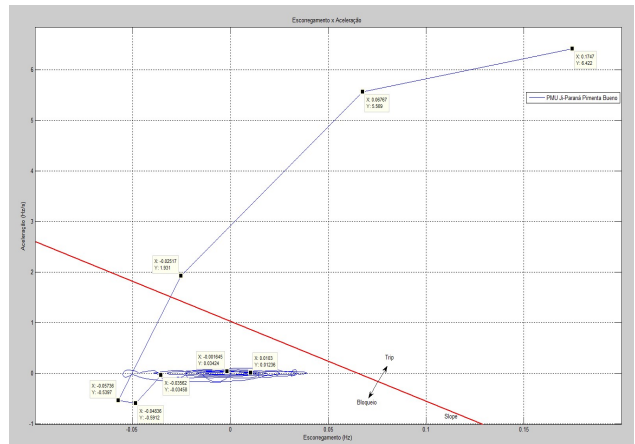


Figura 18 - Escorregamento versus Aceleração - Proposta de Ajuste baseada somente em PMU

3.3 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA OSCILAÇÃO DINÂMICA INSTÁVEL

Em (12), tem-se a representação da curva denominada hélice circular cônica. De acordo com a Figura 12, o sistema pode ser representado pelo sistema de equação diferencial ordinária de segunda ordem homogênea do tipo: $x'' = -x'$, aonde a primeira derivada, lado direito da equação, representa a variação da diferença angular no tempo, enquanto que a segunda derivada, lado esquerdo da equação, representa a variação do escorregamento com o tempo. Admite-se, por hipótese, que a solução da equação pode ser dada por: $x(t) = e^{\lambda t}$, com λ sendo o autovalor da equação $\lambda^2 e^{\lambda t} + \lambda e^{\lambda t} = 0$. A solução dessa equação terá como resultado um somatório de série de cosseno e seno, com uma determinada frequência angular. Na Figura 19, tem-se um exemplo de uma hélice natural, utilizada por uma videira. Por similaridade, a curva representada pela Figura 12 pode então ser aproximada de uma curva hélice circular cônica, e dessa forma, ela pode ser representada por: $alfa(t) = (acos(wt), bsen(wt), ct)$ sendo a,b,c números reais não nulos e $alfa: R \rightarrow R^3$. Na Figura 20, tem-se a curva hélice circular cônica obtida através da equação $f(x,y,z)$, apresentando resultados próximos aos obtidos através de PMU. Já na Figura 21, tem-se a representação do gradiente, assim como das curvas equipotenciais. Observa-se os pontos de "sela", sendo possível verificar a variação do escorregamento e da diferença angular ao longo do tempo.



Figura 19 – Hélice circular natural “Videira”

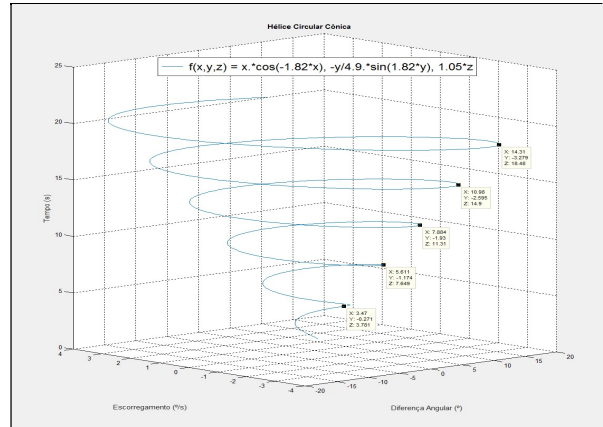


Figura 20 – Escorreg. x Acel. (modelo matemático)

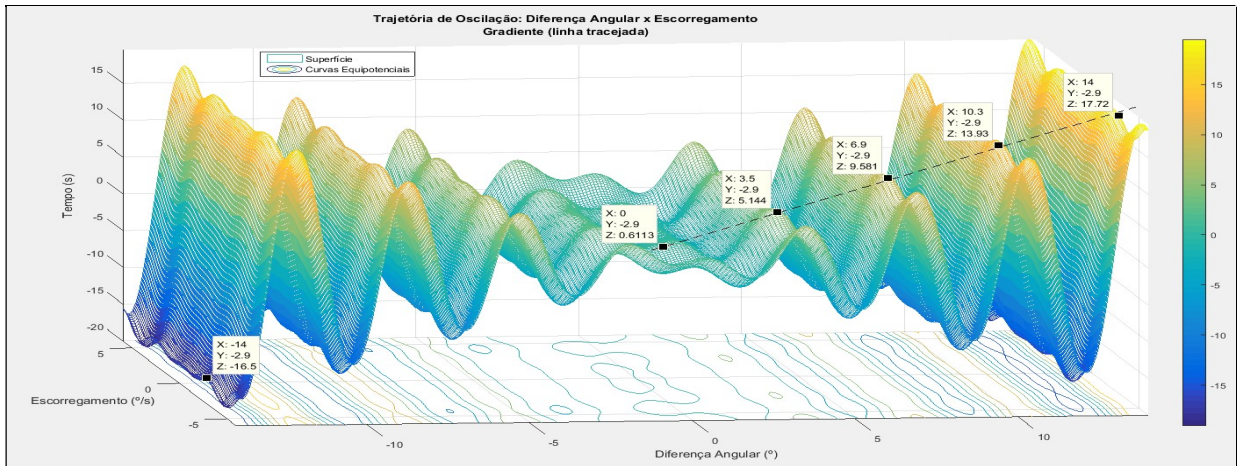


Figura 21 - Trajetória da Oscilação - Gradiente e Curvas Equipotenciais (Simétrica)

3.4 A TRANSFORMADA DE WAVELET (TW)

De acordo com (13), a TW trata de sinais não-estacionários, utilizando-se um ajuste de componentes que se assemelham a formas de ondas. Ela fornece múltiplas resoluções tanto na escala de tempo como na escala de frequência. Ela é uma transformação linear como a transformada de Fourier, com uma importante diferença: a TW permite localização no tempo de um determinado sinal com diferentes componentes de frequência.

3.4.1 Transformada Contínua de Wavelet (TCW)

A TCW é definida como sendo: $TCW(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$, onde: $\Psi(t)$ é a função base ou *wavelet* "mãe", ** denota o conjugado complexo e a, b $\in R$, são os parâmetros de translação, respectivamente.

3.4.2 Transformada Discreta de Wavelet (TDW)

As funções base são geradas discretamente para evitar informação redundante, selecionando-se: $a = a_0^m$ e $nb_0 a_0^m$.

Dessa forma a TDW é definida como: $TDW(m, n) = 2^{-\frac{m}{2}} \sum_m \sum_n x(n)\Psi^*\left(\frac{t-n2^m}{2^m}\right)$, onde a *wavelet* "mãe" é:

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t-nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right), \text{ onde } a_0 \text{ e } b_0 \text{ são constantes fixadas com } a_0 > 1, b_0 > 1, m, n \in Z.$$

3.4.3 Análise Multiresolução (AMR)

A AMR permite que o sinal seja decomposto em vários níveis de resolução. Inicialmente, o sinal é decimado, dividindo-se o valor de frequência anterior por 2. Dessa forma, o sinal é decomposto em dois outros sinais, um sinal aproximado e um outro detalhado. A frequência de amostragem utilizada se refere à frequência da PMU, 60 Hz. Assim, após o processo de decomposição, chega-se à frequência de oscilação na decomposição nível 6 e, para tanto, é necessário um número mínimo de amostras de dados de: $2^6 = 64$ amostras. A proposta nesta parte do trabalho é encontrar o sinal detalhado que represente a oscilação de potência e, para tanto, será utilizado o cálculo da pseudo-energia do nível de cada detalhe, comparando-a com a anterior. Essa "pseudo-energia" pode ser calculada utilizando-se, por exemplo, a norma de *Frobenius*, como sendo: $D = \sqrt{\sum_{i=1}^N [d(i)]^2}$, onde 'd' representa o nível de detalhe do sinal sincrofásorial de diferença angular entre as PMU de Ji Paraná e de Pimenta Bueno.

3.4.4 Resultados Obtidos através da TDW

Nas Figuras seguintes encontram-se os resultados das análises obtidas através da TDW aplicada no sincrofásor de diferença angular entre Ji Paraná e Pimenta Bueno, referente ao segundo caso analisado, apresentado no item 3.2 desse trabalho.

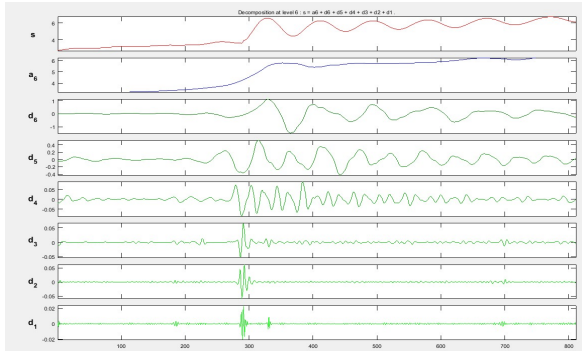


Figura 22 – Análise-1 Início da Oscilação

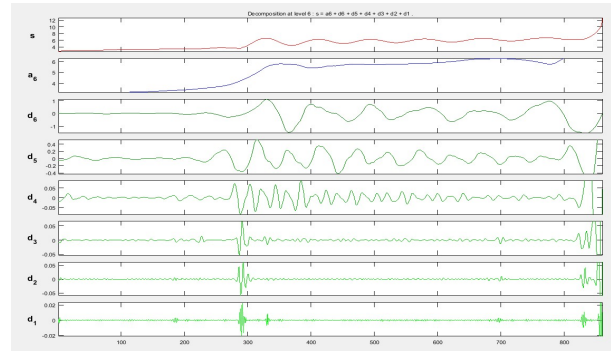


Figura 23 – Análise-2 Instante 't0+'

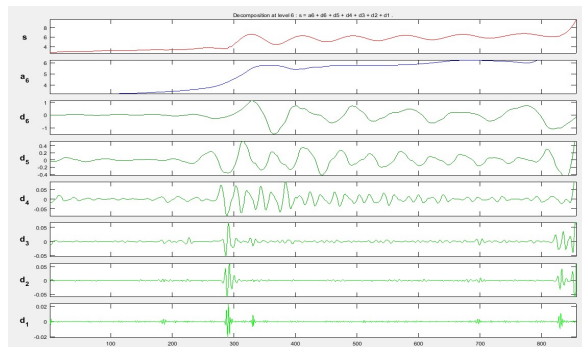


Figura 24 – Análise-3 Instante 't0+' + 100 ms

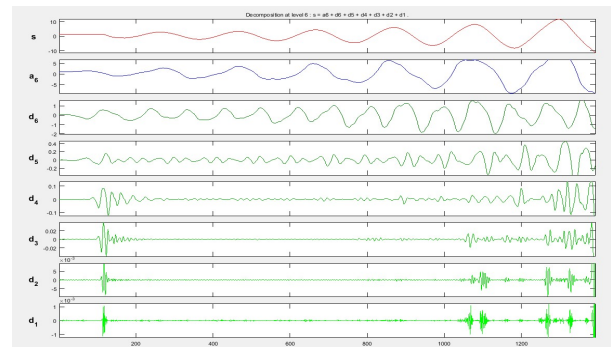


Figura 25 – Análise-4 Instante 't0+' + 200 ms

Tabela 1 - Análise dos Resultados com a TDW e PMU

Pseudo-Energia <i>Wavelet</i>				
Nível de Detalhe	Análise - 1	Análise - 2	Análise - 3	Análise - 4
d1	0,0475	0,0513	0,1674	0,0825
d2	0,1456	0,2564	1,5566	0,4144
d3	0,1644	0,2470	1,2841	0,2675
d4	0,5738	0,6426	2,1947	1,0341
d5	4,1537	4,8258	6,3154	4,5268
d6	10,7307	12,9815	15,1319	27,6323

Na Tabela 1, tem-se o nível de detalhe e a pseudo-energia *wavelet* obtida em relação a cada análise. Para a análise-1, a variação entre o nível d6 e d5 foi de: **240%**. Para a análise-2, a variação foi de: **258%**. Já para a análise-3, a variação foi de: **268%**. Por fim, para a análise-4, a variação foi de: **610%**. A "pseudo-energia" crítica de *wavelet*, para essa referida perturbação, foi de $E_{crítica} = 27,63$, obtida após transcorridos $t = 't0+' + 200$ ms do início da detecção da oscilação. Este valor poderia ser utilizado para um ajuste fino da característica de disparo, conforme apresentada na Figura 18, podendo ser um valor menor, por exemplo, utilizando-se o valor encontrado na análise-3, $E_{crítica} = 15,13$, obtida após transcorridos: $t = 't0+' + 100$ ms, do início da detecção da oscilação. Para futuros trabalhos, propõe-se analisar a característica temporal da TDW, identificando o início da oscilação, computando a energia do sinal sincrofásorial e comparando-a com a energia crítica da interligação Acre-Rondônia para uma tomada de decisão em tempo real.

4.0 - CONCLUSÃO

Esse trabalho abordou a atuação da proteção de disparo por oscilação de potência em dois casos reais de perturbação no SIN. O primeiro caso envolveu um caso de instabilidade transitória - falta de torque sincronizante, com uma perda de carga no estado do Acre, que levou a incursão da impedância para a região de disparo no plano de impedância RX. Já a segunda ocorrência registrada foi devido a um problema de instabilidade dinâmica – falta de torque de amortecimento, observada pela diferença angular entre as PMU de Pimenta Bueno e de Ji-Paraná. Durante a análise dessas duas ocorrências foi possível verificar a dificuldade em relação à correta detecção da oscilação e o limiar entre o bloqueio e o disparo, principalmente pelas alterações de topologia e condições não previstas durante as simulações.

Na característica de disparo apresentada na Figura 10, aonde a perturbação resultou em uma instabilidade transitória, foi possível verificar que essa nova abordagem apresentou um resultado satisfatório. Já na segunda análise, conforme apresentada na Figura 18, aonde a perturbação resultou em um caso de instabilidade dinâmica, não foi possível obter uma região de disparo bem delimitada, pois a trajetória dinâmica do vetor de impedância, representada pela relação entre o escorregamento e a aceleração, atingiu a região de disparo quando já houve a atuação da função de disparo por oscilação de potência, com a respectiva abertura do disjuntor.

Para contornar este problema, foi proposto a análise da instabilidade dinâmica em conjunto com a análise da energia retida no sincrofasor de diferença angular, com a aplicação da transformada discreta de *wavelet*, encontrando-se o nível de detalhe mais característico relacionado à frequência de oscilação de potência. Após a análise multiresolução, com a identificação do nível de detalhe característico, encontrou-se a pseudo-energia desse sinal, verificando-se que, já no início da oscilação de potência, foi possível computar a variação da energia no domínio do tempo, trazendo uma maior confiabilidade e segurança em relação à proposta de abordagem baseada somente em medição sincronizada de fasores.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1).R.O. Fernandes, B.G. Isolani, S.A. Souza, "Meios e Métodos de Detecção de Oscilação de Potência para a prevenção de Blackouts", XI STPC, 18 a 21 de novembro de 2012, Florianópolis, Brasil.
- (2).T.M.S. Alves, D.B. Oliveira, A.C.R. Duarte, A.G. Massaud, A.F.C. Aquino, A.N. Nohara, "Aplicação das Funções de Bloqueio e Disparo por Oscilação (68 OSB e 68 OST) no SIN - Casos Exemplos", XIII STPC, 23 a 27 outubro de 2016, Brasília, Brasil.
- (3).R.O. Fernandes, M. E.C. Paulino, "Power Swing Secondary Testings and Analysis of Transient and Steady State Performance of Protective Relays", Belo Horizonte, Brazil, Cigré Study Committee B5 Colloquium, August 25-31, 2013.
- (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).R.O.Fernandes, A.Massaud, M.Muniz, S.Diniz,H.Volskis, "O Sistema de Medição Sincronizada de Fasores no SIN e as Lições Aprendidas com o Projeto Piloto de Aquisição de PMU através do openPDC pelas Equipes de Estudo Elétrico e de Análise de Eventos do ONS", XXIV SNPTEE, 22 a 25 de outubro de 2017, Curitiba, Brasil.
- (7).A. Guzmán, M. Venkat, G. Zweigle, "Backup Transmission Line Protection for Ground Faults and Power Swing Detection Using Synchronphasors", San Diego, United States, Distributech Conference, February 3-5, 2009.
- (8).B. Alinejad, H.K.Karegar, "A Novel Out-of-Step Relay Using Wide Area Measurements", The 5th Conference on Thermal Power Plants (IPGC2014), June, 10-11, 2014.
- (9).Abidin, A.F., Mohamed, A. and Shareef, H., "Power swing detection for correct distance relay operation using S-transform and neural networks", in Conference Publications 2011:Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 6-7 Jun.
- (10). Esmailian, A. and Astinfeshan, S. , "A novel power swing detection algorithm using adaptive neuro fuzzy technique", in Conference Publications 2011: Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 17-19 Jul.
- (11). J.Holbach, "New Out of Step Blocking Algorithm for Detecting Fast Power Swing Frequencies", in Power Systems Conference 2006: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, pp. 182-199.
- (12). Introdução à Geometria Diferencial, Lima, R.F., IV Colóquio de Matemática da Região Norte, Sociedade Brasileira de Matemática - SBM, 2016.
- (13). Dubey, R., Samantaray, S.R., Babu, B.C., Kumar, S.N., "A Novel Out-Of-Step Detection Algorithm Using Angle of Power Signal".

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael de Oliveira Fernandes, engenheiro eletricista graduado pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (2001) com mestrado na área de Estabilidade Transitória com PMU pela Unicamp (2019). Atualmente é Doutorando na Unicamp na área de Fasores Dinâmicos/Transitórios Eletromagnéticos. Membro Individual do Cigré-B5 e Correspondente do WGB5.62 do Cigré. Atualmente é Engenheiro Senior da Gerência de Proteção e Controle do ONS, com atuação no projeto de implantação de medição sincrofasorial e na área de análise de perturbações.

