



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/09  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO-IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA- GAT**

**REPRODUÇÃO DE UM FENÔMENO DE INSTABILIDADE DE TENSÃO NA ÁREA TRAMO OESTE DO SIN A PARTIR DE DADOS DE SINCRÓFASORES**

**João R. B. Pinheiro  
UNIFAP**

**João P. A. Vieira (\*)  
UFPA**

**Tatiana M. L. Assis  
UFRJ**

**Adriano A. Barbosa  
ONS**

**RESUMO**

Este trabalho visa apresentar a reprodução de um fenômeno de instabilidade de tensão ocorrido na área Tramo Oeste do SIN (Sistema Interligado Nacional), a partir de dados de sincrofasores obtidos de medições em campo. Informações complementares, tais como o cenário operativo pré-distúrbio, ajustes dos relés de proteção e a sequência de atuação da proteção, também foram utilizadas para reproduzir o fenômeno. As máquinas síncronas e reguladores de tensão e de velocidade da Usina Hidrelétrica de Curua-Una (com capacidade de 35,8 MW), conectada a área Tramo Oeste, foram representados por seus modelos dinâmicos. Os softwares ANAREDE e ANATEM, ambos desenvolvidos pelo CEPEL, foram utilizados para reproduzir e simular a instabilidade de tensão. O fenômeno reproduzido por simulação refere-se ao afundamento temporário de tensão presenciado em 21 de agosto de 2013 às 14:47 h, que levou a área Tramo Oeste ao blecaute total.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas de potência, simulação dinâmica, estabilidade de tensão, e sincrofasores.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O aumento da demanda por energia elétrica nos municípios do Oeste do estado do Pará tem levado a área Tramo Oeste do Sistema Interligado Nacional (SIN) a operar próximo de seu limite de estabilidade de tensão, o que impõe dificuldades ao operador na manutenção apropriada dos níveis de tensão em toda a área. Devido à característica radial do sistema de transmissão da área Tramo Oeste, a continuidade do fornecimento de energia pode ser afetada por qualquer contingência simples, de forma a expor a região a interrupções de todas as cargas.

No segundo semestre de 2013, a área Tramo Oeste sofreu diversos cortes de carga na região devido ao rápido afundamento de tensão, sem ocorrência de perturbação, oriundo do esgotamento de recursos para o controle de tensão da área e da operação em condição de carregamento do sistema superior ao seu limite de estabilidade de tensão. O acentuado declínio do nível de tensão provocou a rejeição de cargas, devido tanto à atuação de proteções próprias dos consumidores, quanto à redução natural de carga devido às características do sistema. A rejeição gradativa de cargas provocou a elevação da tensão no sistema, que por sua vez, causou o desligamento de diversos equipamentos do sistema de transmissão pela atuação de suas proteções de sobretensão temporizadas. Vale ressaltar que atualmente, o problema do controle de tensão ainda persiste na área Tramo Oeste. Sob esta ótica, torna-se de fundamental importância realizar análises do comportamento dinâmico pós-distúrbio da área Tramo Oeste para fins de estudos de planejamento mais detalhados, no sentido de garantir a melhoria da segurança de tensão e da confiabilidade do sistema.

Dentro deste contexto, o objetivo desse trabalho é apresentar a reprodução de um fenômeno de instabilidade de tensão ocorrido na área Tramo Oeste do SIN em 21 de agosto de 2013, a partir de dados de sincrofasores registrados durante o incidente. Informações complementares, como o cenário operativo pré-distúrbio, ajustes dos

relés de proteção e a sequência de atuação da proteção, também foram utilizadas para reproduzir o fenômeno. Tais informações estão presentes no Relatório de Análise de Perturbações (RAP) [1], elaborado pelo ONS. As máquinas síncronas e reguladores de tensão e de velocidade da Usina Hidrelétrica de Curua-Una (com capacidade de 35,8 MW), conectada a área Tramo Oeste, foram representados por seus modelos dinâmicos. Os respectivos parâmetros e diagramas de blocos foram fornecidos pela Eletrobrás Eletronorte. A reprodução do fenômeno de instabilidade de tensão por simulação foi realizada pelo uso dos softwares ANAREDE [2] e ANATEM [3], ambos desenvolvidos pelo CEPEL. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois as curvas reproduzidas por simulação no ANATEM foram similares às curvas registradas pela PMU (do inglês, "*Phasor Measurement Unit*") instalada no patio da SE-Ruropolis de 230 kV da área Tramo Oeste.

A reprodução com boa precisão da dinâmica real do fenômeno de instabilidade de tensão por simulações computacionais no domínio do tempo a partir de dados de sincrofasores, considerando a sequência de eventos e a sua cronologia, mostrou ser uma aplicação prospectiva para estudos que envolvam ajustes e/ou coordenação de esquemas de controle e proteção da área Tramo Oeste, a fim de melhorar a sua confiabilidade. Em estudos de pós-distúrbio a reprodução por simulação dinâmica da instabilidade de tensão deve servir como referência para análises mais simplificadas como estudos de fluxo de carga, os quais não consideram a modelagem detalhada de alguns equipamentos que influenciam na estabilidade de tensão [4]. A reprodução por simulação a partir de dados de sincrofasores também contribui para a validação de modelos dinâmicos do sistema [5], de maneira a permitir que os estudos em regime dinâmico a serem realizados sejam mais confiáveis.

## 2.0 - PRINCIPAIS DIFICULDADES PARA REPRODUZIR O FENÔMENO

Diversos fatores inviabilizaram a reprodução exata do comportamento dinâmico da área Tramo Oeste referente à ocorrência do fenômeno da instabilidade de tensão no dia 21/08/2013. Dentre os fatores que dificultaram a reprodução do evento na área, destacam-se:

- Ausência de informações referentes às características das demais subestações que compõem a referida área;
- Insuficiência de informações sobre os fluxos de potência reativa entre as subestações;
- Carência de informações detalhadas a respeito dos desligamentos das cargas (em MW), em cada subestação, provocados pelo afundamento temporário de tensão;
- Ausência de parâmetros dinâmicos dos motores de indução que representam as cargas industriais da região;
- Ausência de parâmetros de operação de transformadores com comutação de tape sob carga ou OLTCs (do inglês, "*On Load Tap Changer*") e de limitadores de sobrecorrente de excitação de máquinas síncronas ou OXLs (do inglês, "*Overexcitation Limiters*");
- Incompatibilidade entre o passo de integração (0,01 s) utilizado na simulação dinâmica e a taxa de amostragem da PMU (10 fasores/s). A simulação dinâmica apresentou problema de convergência no ANATEM quando o passo de integração foi alterado para 0,1 s. Portanto, para evitar esse problema o passo de integração adotado na simulação foi menor do que a taxa de amostragem da PMU.

## 3.0 CENÁRIO OPERATIVO DA ÁREA TRAMO OESTE ANTES DO OCORRÊNCIA DO FENÔMENO EM 21/08/2013

### 3.1 Topologia da Área Tramo Oeste antes da ocorrência do Fenômeno em 21/08/2013

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar da área Tramo Oeste. Entretanto, cabe ressaltar que as medidas operativas adotadas nos dias 28/06/2013 e 21/08/2013 causaram alterações significativas na topologia do sistema. No dia 28/06/2013, em decorrência ao estudo realizado em 27/05/2013 que visava amenizar as dificuldades de controle de tensão, ocorreu a redistribuição de reatores de 230 kV na área Tramo Oeste, acarretando um ganho de 11kV na barra de 230 kV da SE Ruropolis. No dia 21/08/2013, ocorreu o desligamento do reator instalado na SE Altamira. Esta medida operativa visou melhorar o controle de tensão e aumentar o limite de estabilidade de tensão, além de minimizar os desligamentos por instabilidade de tensão garantindo ao sistema um ganho de 10 MW. Por fim, deve-se registrar que durante o mês de agosto de 2013, a unidade geradora UG01 da UHE Curua-Una encontrava-se indisponível, visto que havia sido removida para ser submetida a processos de modernização dos sistemas de proteção e controle [1].

### 3.2 Ponto de Operação da Área Tramo Oeste antes da ocorrência do Fenômeno em 21/08/2013

No instante anterior ao afundamento temporário de tensão, o fluxo de potência ativa na linha de transmissão (LT) 230 kV Tucuruí-Altamira era de aproximadamente 161 MW e o fluxo de potência ativa na LT 230 kV Altamira-Ruropolis era de aproximadamente 106 MW, segundo o ONS. Os módulos das tensões nos principais barramentos da área, antes da ocorrência do fenômeno, estão descritos na Tabela 1. Cabe frisar que os valores de carga (em

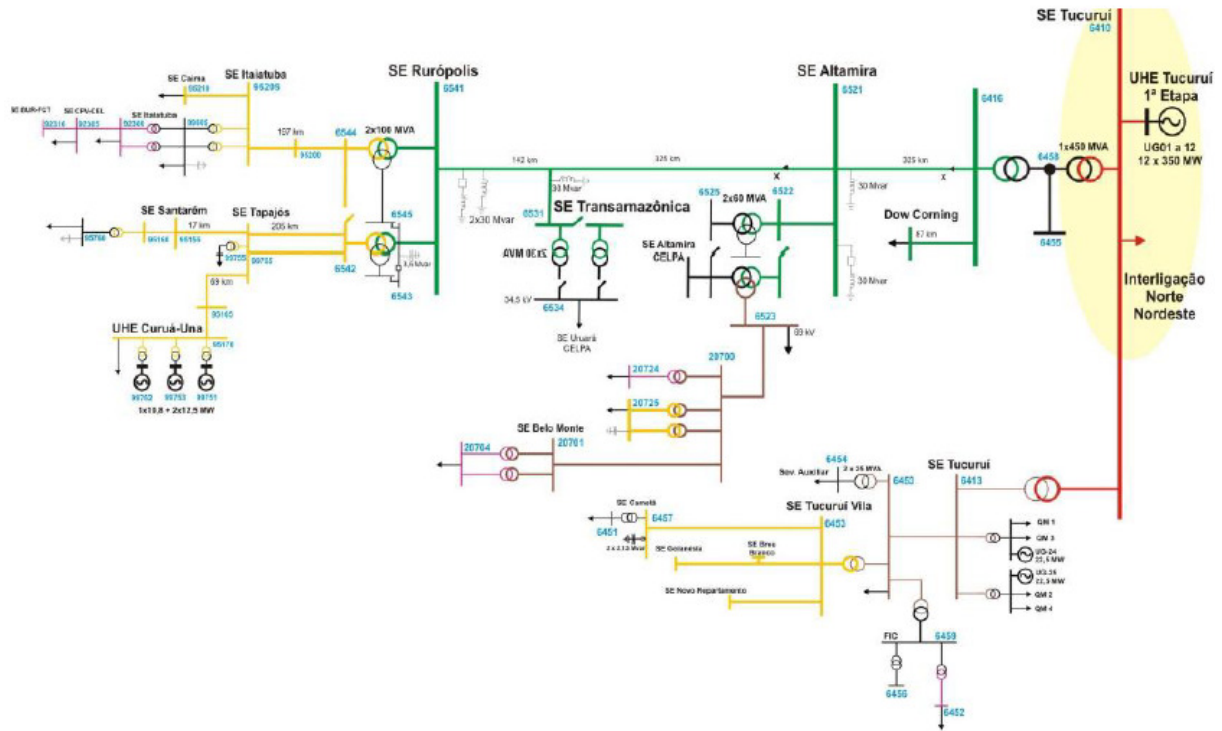


Tabela 1 – Módulos das Tensões nas Barras do Sistema de Transmissão de 138 kV e 230 kV da Área Tramo Oeste antes da Ocorrência do Fenômeno. Fonte: ONS

DATA		TENSÃO NOS BARRAMENTOS				
		Tensão – 230 kV				Tensão – 138 kV
		Tucuruí	Altamira	Transamazônica	Rurópolis	Rurópolis
21/08/2013	14h47	235	225	227	226	141

#### 4.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos pela reprodução por simulação da instabilidade de tensão ocorrida na área Tramo Oeste do SIN, em 21 de agosto de 2013, com base nos dados registrados pela PMU instalada no pátio da SE Rurópolis 230 kV. Informações complementares fornecidas pelo ONS e pela Eletrobrás Eletronorte auxiliaram no desenvolvimento do modelo estático e dinâmico da referida área. Algumas dessas informações com características do sistema foram fundamentais para reproduzir o fenômeno, tais como, topologia, fluxo de potências ativa e reativa, módulo da tensão nos principais barramentos, sequência de eventos precedente do afundamento de tensão, ajuste dos relés de proteção, sequência de atuação da proteção, ente outras.

#### 4.1 Reprodução e Análise do Fenômeno de Instabilidade de Tensão

Em 21/08/2013 às 14h47min ocorreu um afundamento de tensão trifásico na área Tramo Oeste, que atingiu o valor de 0,71 p.u. da tensão visto do setor 230 kV da SE Rurópolis, sem a ocorrência de perturbação. O comportamento dinâmico desse afundamento de tensão pode ser observado na Figura 2. A fim de facilitar a compreensão do

comportamento dinâmico da área Tramo Oeste frente ao afundamento temporário de tensão, alguns pontos foram destacados, seja para delimitar períodos e/ou indicar ocorrências importantes. Observa-se uma similaridade entre a medição registrada pela PMU (curva azul) e a resposta da simulação obtida pelo software ANATEM (curva vermelha).

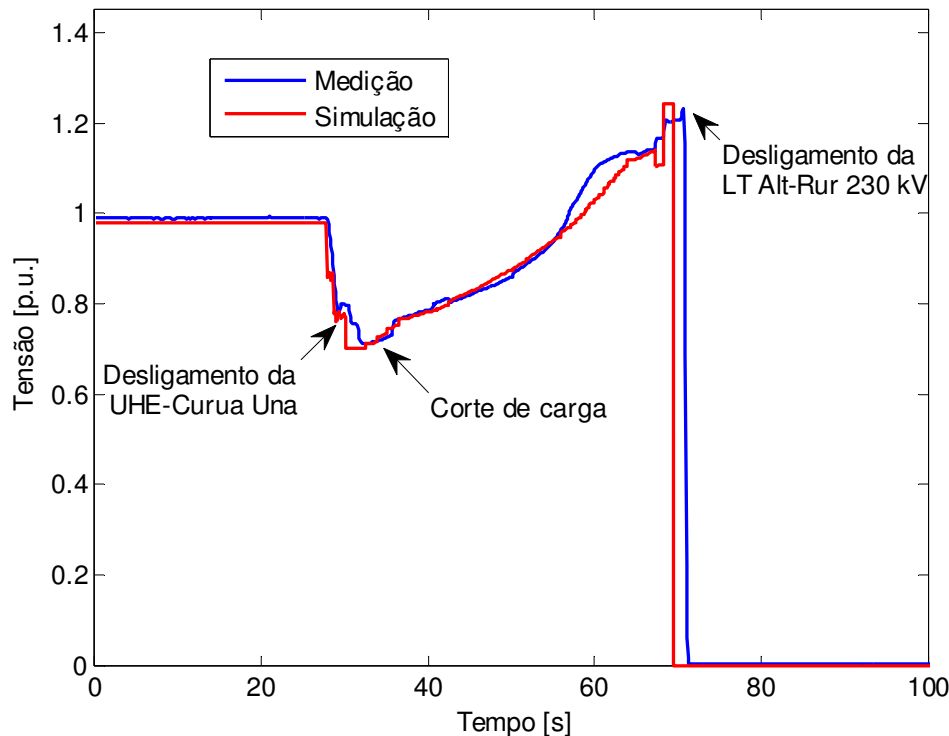


FIGURA 2 – Módulo da tensão na SE-Ruropolis 230 kV

Nota-se que antes do afundamento de tensão, o nível de tensão na SE-Ruropolis 230 kV estava em um valor praticamente constante. Às 14h47min, ocorreu o afundamento de tensão que ocasionou, 54 s mais tarde, a interrupção do abastecimento de energia em toda a região. Inicialmente, o afundamento do módulo da tensão na SE-Ruropolis 230 kV atingiu o valor de aproximadamente 0,78 p.u. Em seguida, as unidades geradoras da UHE-Curua Una aumentaram a injeção de potência reativa com o intuito de elevar o nível de tensão do sistema de transmissão, e assim, reestabelecer a tensão operativa para um nível adequado.

Entretanto, a carência na reserva de potência reativa fez com que o afundamento descontrolado da tensão fosse compensado pelo aumento de corrente injetada na SE-Ruropolis 230 kV, a fim de sustentar a potência demandada pelas cargas. A Figura 3 ilustra o comportamento dinâmico do módulo da corrente injetada na SE Ruropolis 230 kV, frente ao afundamento temporário de tensão. Pode-se observar uma pequena diferença entre a medição registrada pela PMU (curva azul) e a resposta da simulação dinâmica no ANATEM (curva vermelha). Essa pequena diferença é aceitável para o estudo preliminar de validação do modelo dinâmico da área Tramo Oeste, visto a carência de informações, conforme descrito anteriormente.

O aumento da corrente injetada na SE-Ruropolis 230 kV da área Tramo Oeste provocou o surgimento de sobrecorrente de fase no lado de alta dos transformadores 138/6,9 kV elevadores das unidades geradores da UHE Curuá-Una, provocando a atuação da proteção de sobrecorrente temporizada, durante a resposta dinâmica desses geradores. O desligamento da geração da UHE de Curuá-Una ocorreu, aproximadamente, 5 s após o início do afundamento de tensão. O instante do desligamento da UG2 e UG3 está indicado na Figura 2. A perda das unidades geradoras da UHE de Curuá-Una acentuou o desequilíbrio entre a oferta e demanda por potência reativa na SE-Ruropolis 230 kV. Pode-se observar na Figura 3, que instantes antes do desligamento das unidades geradoras, o módulo da tensão que era igual a 0,79 p.u., e após a perda dos dois geradores, em menos de 2 segundos, o módulo da tensão alcançou 0,71 p.u., indicado pelo corte de carga.

A Figura 4 mostra uma visão mais clara do comportamento da tensão na SE-Ruropolis 230 kV nos instantes em que ocorrem as perdas das unidades geradoras da UHE de Curuá-Una. Observa-se na Figura 4 que a perda dos geradores ocorreu em instantes distintos de acordo com os dados dos sincrofasores, diferentemente do que foi observado na simulação. Nota-se, pela resposta da simulação no ANATEM, que a perda dos dois geradores da UHE de Curuá-Una ocorre, simultaneamente, em 80,2 segundos, enquanto que pela medição fasorial ocorre em 80,6 s e 81,6 s, respectivamente.

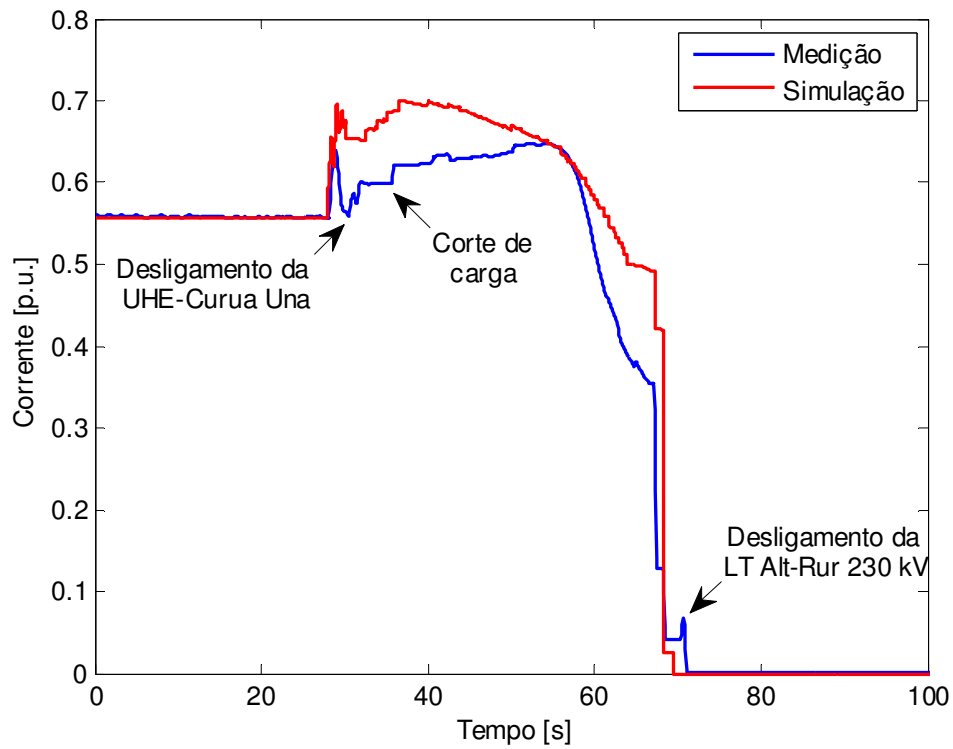


FIGURA 3 – Módulo da corrente injetada na SE-Ruropolis 230 kV

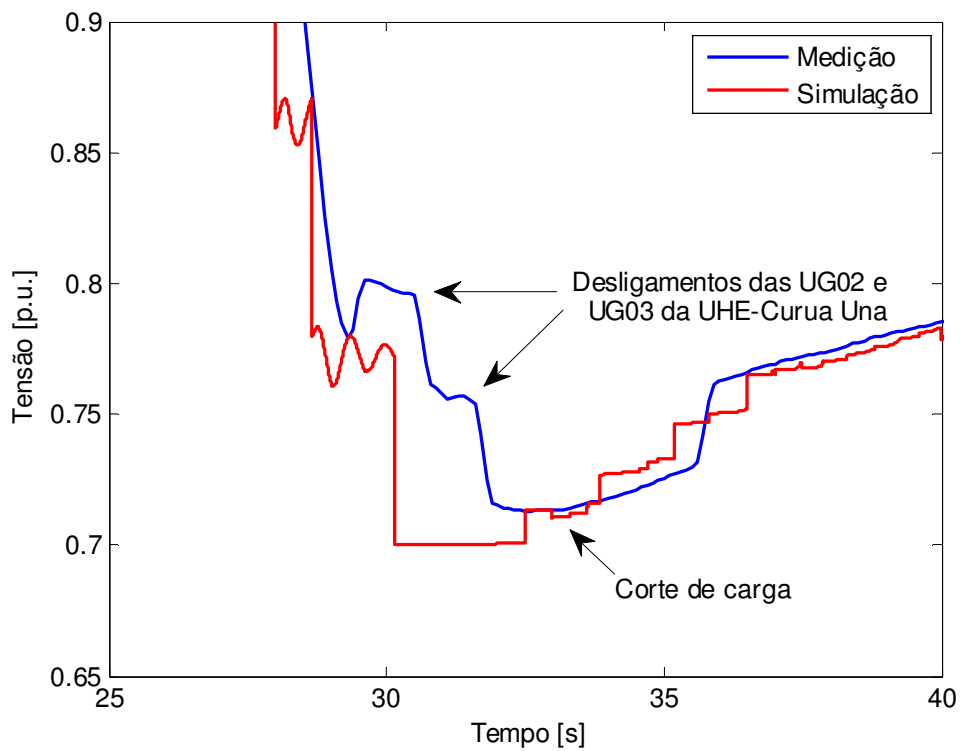


FIGURA 4 – Módulo da tensão na SE-Ruropolis 230 kV durante o afundamento de tensão

Segundo o ONS, essa condição crítica de operação causou a rejeição natural de carga, provocada tanto pela atuação de proteções das redes de distribuição e subtransmissão, como pela redução da carga devido a sua

própria característica. Em seguida, ocorreu a elevação discreta do módulo da tensão, conforme ilustra a Figura 2. Entretanto, o elevado corte de carga ocasionou o aparecimento de sobretensões dinâmicas, levando o módulo da tensão na SE-Rurópolis 138 kV a níveis elevados. A atuação da proteção de sobretensão provocou o desligamento automático das LT 138 kV Rurópolis-Itaituba e Rurópolis-Tapajós e, em seguida, o desligamento automático do lado de baixa dos transformadores 230/138kV da SE-Rurópolis, desenergizando toda a área a jusante da SE-Rurópolis. Tais manobras proporcionaram sobretensões dinâmicas no setor de 69 kV da SE-Altamira, acionando o relé de proteção de sobretensão temporizada e provocando, primeiramente, a perda de parte da carga desta região e, em seguida, o desligamento automático do lado de baixa do transformador 230/69 kV da SE-Altamira. O isolamento dessa região fez com que o módulo da tensão na SE-Rurópolis 230 kV se tornasse muito elevada, atingindo valores de tensão superiores a 1,2 p.u., causando o desligamento automático da linha de transmissão Altamira-Rurópolis 230 kV.

A Figura 5, extraída da Figura 2, ilustra, de forma clara, o comportamento do módulo da tensão da carga nos instantes em que houve os desligamentos das linhas de transmissão 138 kV Rurópolis-Itaituba e Rurópolis-Tapajós, e o desenergizamento da SE-Rurópolis. Observa-se que o desligamento simultâneo das linhas de transmissão promove a elevação do módulo da tensão a níveis superiores a 1,2 p.u., provocando a atuação da proteção e, conseqüentemente, a interrupção do abastecimento de toda carga a jusante dessa SE. A carência de informações impossibilitou que a resposta da simulação dinâmica (curva em vermelho) acompanhasse perfeitamente a medição (curva em azul). Pode se observar na Figura 6 que os desligamentos das LTs 138 kV Rurópolis-Tapajós e Rurópolis-Itaituba ocorreram de forma quase simultânea, seguidos por uma acentuada elevação no módulo da tensão após os desligamentos de ambas as linhas. Os desligamentos das linhas de transmissão impulsionaram o nível de tensão para valores acima de 1,2 p.u., excitando a proteção e o desligamento automático da linha de transmissão Altamira-Rurópolis 230 kV.

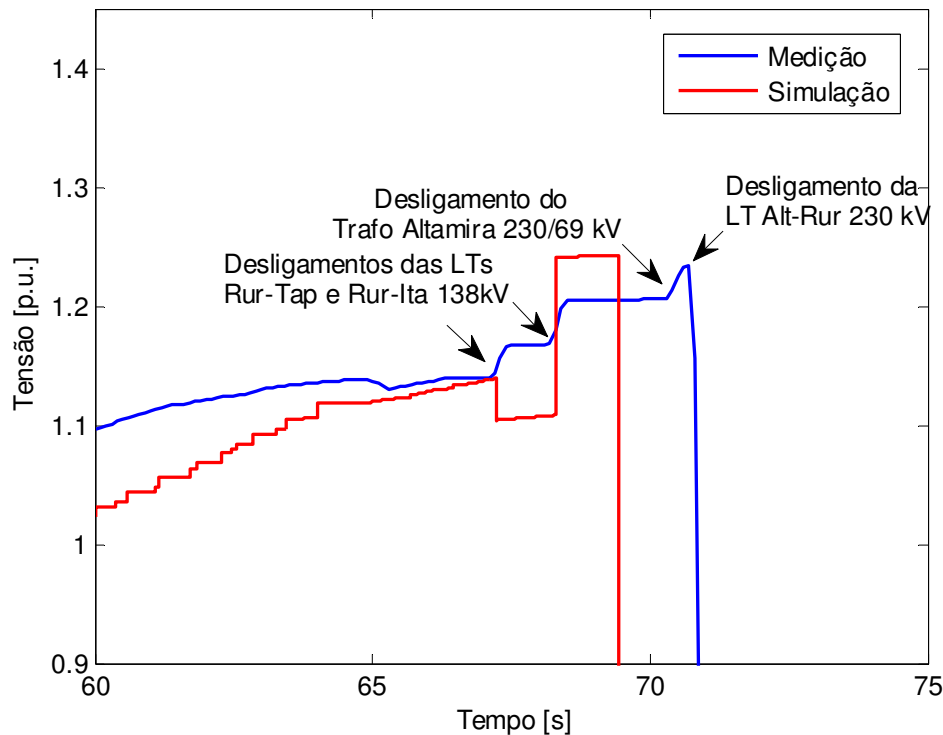


FIGURA 5 – Módulo da tensão na SE-Rurópolis 230 kV durante a sobretensão

A Figura 6 mostra o comportamento da potência ativa injetada na SE-Rurópolis. O efeito da carência de informações torna-se evidente ao se comparar o resultado obtido pela medição em campo (curva azul) e a resposta da simulação dinâmica (curva vermelha). A discrepância entre as curvas azul e vermelha foram razoáveis, tendo em vista que o modelo detalhado do Tramo Oeste não pôde ser concluído, devido à falta de informações como os parâmetros dinâmicos dos motores de indução que representam o setor industrial da região.

A Figura 7 mostra a curva PV (potência ativa X tensão na SE-Rurópolis 230 kV). Pode-se observar, inicialmente, que a potência ativa da carga a jusante da SE-Rurópolis foi reduzida da posição inicial do plano PV o ponto do corte de carga. Em seguida, a potência ativa aumentou com a recuperação da tensão, devido à própria característica da carga, até o ponto de máximo carregamento. Posteriormente, a potência ativa reduziu, pela rejeição natural das cargas da área Tramo Oeste devido à atuação das proteções de sobretensão temporizadas,

até o desligamento da LT Altamira-Ruropolis 230 kV. Pode-se observar uma razoável similaridade entre a medição registrada pela PMU (curva azul) e a resposta da simulação dinâmica no ANATEM (curva vermelha).

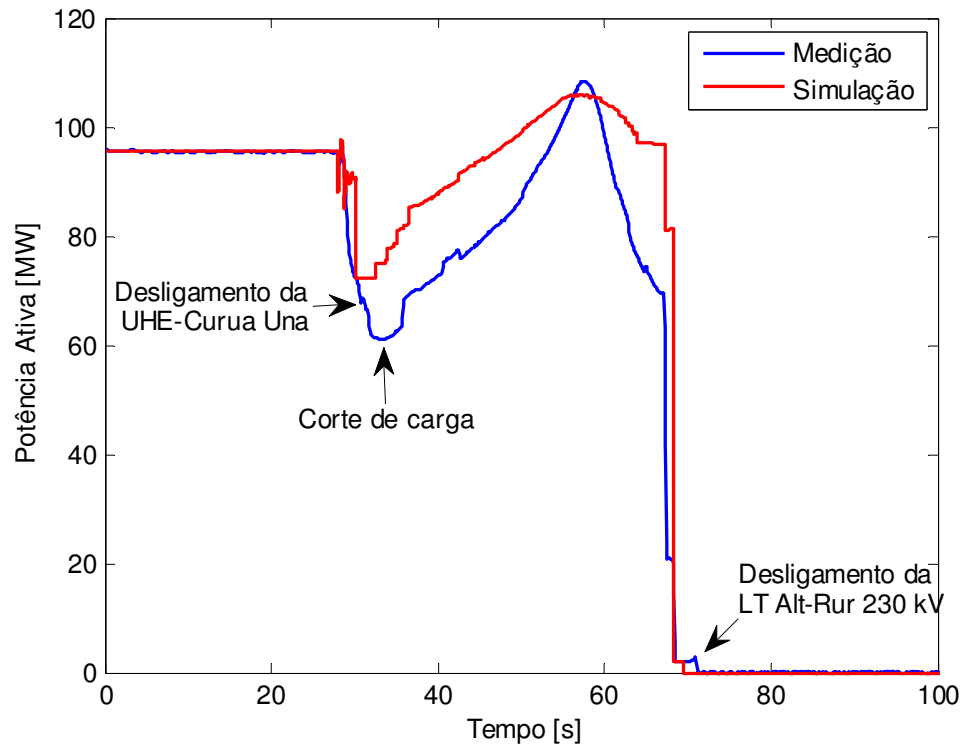


FIGURA 6 – Potência ativa injetada na SE-Ruropolis 230 kV

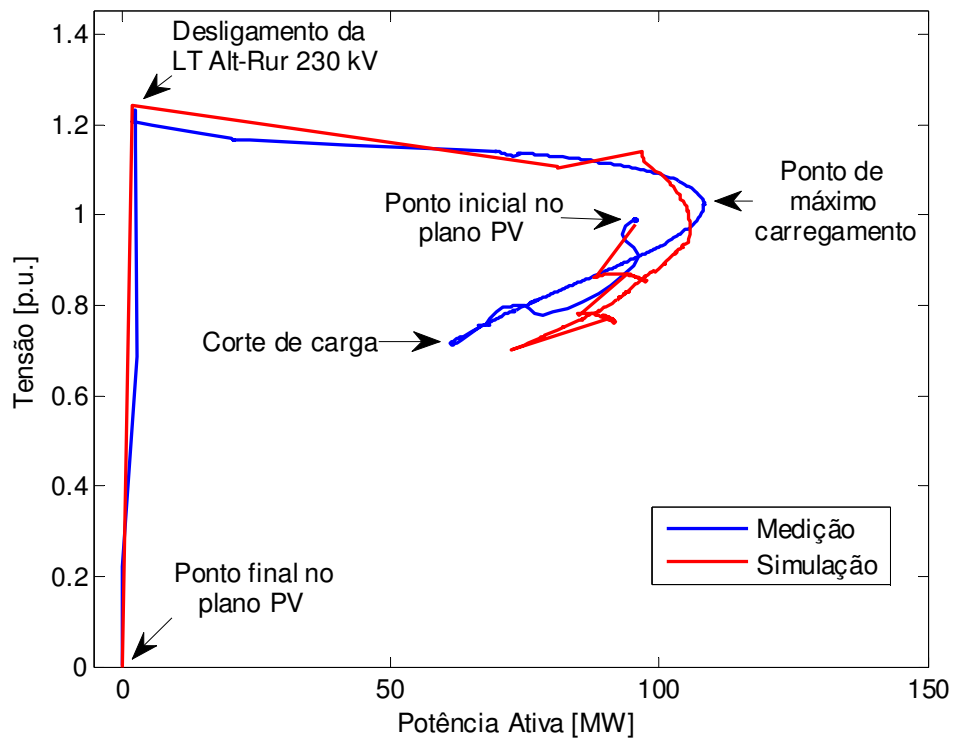


FIGURA 7 – Curva PV da SE-Ruropolis 230 kV

## 5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho reproduziu e analisou um fenômeno de instabilidade de tensão na área Tramo Oeste ocorrido no dia 21 de agosto de 2013, com base nos dados registrados pela PMU instalada na SE-Rurópolis 230 kV. O fenômeno foi ocasionado pelo esgotamento da reserva de potência reativa. Os resultados obtidos a partir das simulações no ANATEM foram satisfatórios, considerando as dificuldades de reprodução por simulação como a ausência de algumas informações e o desprezo de modelos dinâmicos de alguns componentes do sistema. A reprodução desse fenômeno poderá servir como base para estudos de pós-operação e auxílio à proposição de soluções e/ou reajustes do controle e proteção da área Tramo Oeste. A inclusão de modelos e parâmetros dinâmicos de motores de indução, OXLS e OLTCs deve ser considerada em estudos futuros, a fim de tornar o modelo da área Tramo Oeste cada vez mais fiel e confiável para análise dinâmica da estabilidade de tensão.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico - Relatório de Análise de Perturbação – RAP, Rio de Janeiro, RJ. Outubro, 2013.
- [2] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ANAREDE: Programa de Análise de Redes, Manual do Usuário, V09.05.02, Setembro 2009.
- [3] CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ANATEM: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário, V10.01.00, Dezembro 2007.
- [4] P. Kundur – Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [5] Jaime De La Ree, Virgilio Centeno, James S. Thorp e A. G. Phadke - Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.01, no 01, Jun, 2010.

## 7.0 – AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua profunda gratidão a Eletrobrás Eletronorte, por ceder gentilmente os dados de medições de sincrofasores

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**João Ricardo Brito Pinheiro** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2014). Atualmente é engenheiro eletricista da Universidade Federal do Amapá.

**João Paulo Abreu Vieira** Possui graduação (2004), mestrado (2006) e doutorado (2009) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará. Atualmente é professor adjunto da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará. Seus interesses em pesquisa estão focados em modelagem, simulação, estabilidade, controle e segurança de sistemas elétricos de potência; integração da geração distribuída em sistemas de energia elétrica. É membro do IEEE PES.

**Tatiana Mariano Lessa Assis** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1998), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2007). De janeiro a março de 2009 atuou como pesquisadora visitante no Rensselaer Polytechnic Institute (EUA). Entre 2006 e 2011 foi professora da Universidade Federal Fluminense. Atualmente é professora adjunta da Universidade Federal do Rio de Janeiro e realiza pós-doutorado no Imperial College London. Tem experiência na área de planejamento da operação de sistemas interligados, aplicações computacionais em sistemas de potência, dinâmica e controle de sistemas de potência, qualidade de energia e eletrônica de potência. Atua como voluntária do IEEE desde 2010 e atualmente é vice-presidente da Seção Rio de Janeiro. É Senior Member do IEEE.

**Adriano Andrade Barbosa** Nasceu em Juiz de Fora, em 1973. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela UFJF, em 1995, e obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ, em 1999. Em 2011 concluiu o MBA em Gestão de Energia Elétrica, pela PUC/RJ. Desde 2001, atua como engenheiro no Operador Nacional do Sistema Elétrico, onde coordena e desenvolve estudos pré-operacionais de instalações de geração e transmissão do Sistema Interligado Nacional, com foco na análise de desempenho dinâmico e estabilidade eletromecânica.