



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

FI/GPC/33  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - V**

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

**ANÁLISE DE PERTURBAÇÃO ENVOLVENDO O SISTEMA MADEIRA COM REFLEXOS PARA A ÁREA ACRE  
E RONDÔNIA**

**Denise Borges de Oliveira (\*)**

**Tatiana Maria T. de Souza Alves**

**Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS**

**Alexandre Akio Nohara**

**Paulo Eduardo M. Quintão**

**Sergio Luiz de A. Sardinha**

**Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS**

**RESUMO**

O Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira no Estado de Rondônia é formado pelas usinas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau, de dois bipolos de corrente contínua responsáveis pela transmissão da energia dessas usinas para a Região Sudeste e de uma Estação Conversora Back-to-Back CCC, conectada ao Sistema de 230 kV de suprimento aos estados do Acre e Rondônia. Dessa forma, o entendimento das ocorrências nesse sistema é de vital importância para a operação segura do Sistema Interligado Nacional (SIN). Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados da análise de uma perturbação de vulto ocorrida em abril de 2014, envolvendo o Bipolo 1 do Madeira, com reflexos para os estados do Acre e de Rondônia, assim como as ações tomadas visando a evitar sua reincidência.

**PALAVRAS-CHAVE**

Distúrbio; Complexo do Rio Madeira; Sistema Acre-Rondônia; Oscilografia; Unidade de Medição Fasorial

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira é formado pelas usinas de Santo Antônio, com 44 unidades geradoras (UG) de 71,6 MW (totalizando 3.150 MW), com previsão de expansão para 50 UG, e Jirau, com 50 UG de 75 MW (totalizando 3.300 MW), com previsão de expansão para 50 UG. Este complexo gerador é responsável pela geração e transmissão da energia gerada na Região Norte do País para a Região Sudeste, por meio de um sistema de transmissão em CCAT composto de 2 bipolos de corrente contínua (3.150 MW  $\pm$  600 kV) entre as SE Coletora Porto Velho (RO) e Araraquara 2 (SP) com uma extensão aproximada de 2.375 km, e uma Estação Conversora Back-to-Back composta de 2 blocos de 400 MW, conectada através de duas linhas de transmissão em 230 kV à SE Porto Velho.

O perfeito entendimento das ocorrências neste sistema, visando a evitar reincidências, é de vital importância para o SIN. Nesse sentido, será apresentado neste trabalho o resultado das análises de uma perturbação de vulto ocorrida em abril de 2014, que teve início no Bipolo 1, envolvendo as LT de 500 kV Santo Antônio / Coletora Porto Velho C3 e Jirau / Coletora Porto Velho C1, além das LT 230 kV Pimenta Bueno / Ji-Paraná C1 e C2, da UHE Santo Antônio e da UHE Jirau, com reflexos nos estados do Acre e de Rondônia.

(\*)Rua Júlio do Carmo, 251, Cidade Nova, Rio de Janeiro, RJ(21)3444.9842 - doliveira@ons.org.br

A perturbação ocorreu durante a execução do desbloqueio do polo 1 do bipolo 1 para a sua entrada em operação. No instante do desbloqueio, ocorreu uma falha no controle do bipolo, que gerou uma ordem de corrente de valor muito elevado, acima da ordem de corrente máxima suportada pelas válvulas. Isto fez com que durante cerca de 2 segundos, o polo transmitisse uma potência de aproximadamente 1.000 MW, com consequências para o Sistema Acre-Rondônia 230 kV. Esse sistema, que no instante imediatamente anterior à ocorrência, se encontrava exportador, com a tomada de carga de aproximadamente 1.000 MW, passou a ser importador de um montante de potência superior ao limite dinâmico de intercâmbio da área Acre-Rondônia. Com isso houve perda de sincronismo entre as unidades geradoras das usinas dessa área com o restante do SIN.

Como consequência da perda de sincronismo, ocorreu a abertura da interligação da área Acre-Rondônia com o SIN, pela atuação da Proteção de Perda de Sincronismo (PPS), instalada nos dois circuitos do trecho Ji-Paraná / Pimenta Bueno, resultando no seu ilhamento do SIN.

Ocorreram em seguida, os seguintes desligamentos:

- LT 230 kV Pimenta Bueno / Ji-Paraná C1 e C2;
- Transformador provisório 525/230 kV - 465 MVA da SE Coletora Porto Velho (TF-13);
- Unidades geradoras 01, 02, 03, 29, 30, 31, 39 e 40 da UHE Jirau;
- Unidades geradoras 09, 10, 12, 13, 14 e 15 da UHE Santo Antônio;
- LT 500 kV Santo Antônio / Coletora Porto Velho C3;
- LT 500 kV Jirau / Coletora Porto Velho C1.

Esta perturbação provocou ainda a interrupção de cargas nos estados de Rondônia e do Acre.

Na figura 1, é mostrada a área afetada pela perturbação:

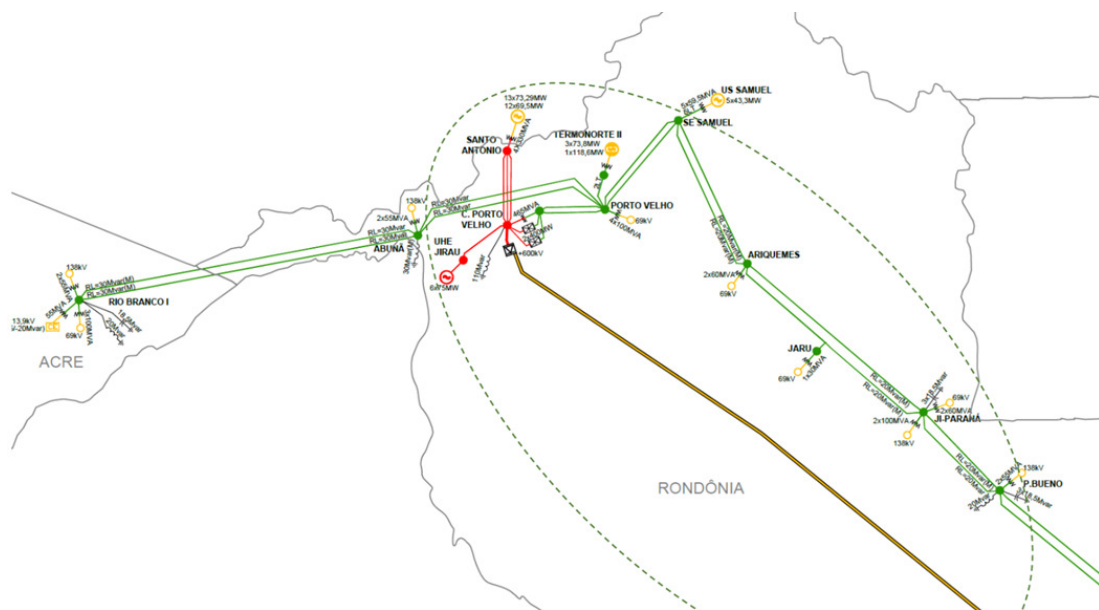


FIGURA 1 – Diagrama Esquemático da Área Envolvida na Perturbação

## 2.0 - DESCRIÇÃO DA PERTURBAÇÃO E ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO SIN

No dia 26 de abril de 2014, às 13h53min, durante a execução do desbloqueio do polo 1 do bipolo 1 para a sua entrada em operação, ocorreu uma falha no controle do bipolo, que gerou uma ordem de corrente de valor muito elevado, acima da ordem da corrente máxima suportada pelas válvulas. Este problema foi causado por um valor muito baixo, próximo de zero, na tensão medida da saída do conversor, uma vez que a corrente de ordem é o resultado da divisão da potência ordenada por esta tensão calculada. Isso fez com que durante cerca de 2 segundos, o Bipolo transmitisse uma potência da ordem de 1.000 MW.

Na figura 2 abaixo, é mostrada a área onde teve origem a ocorrência

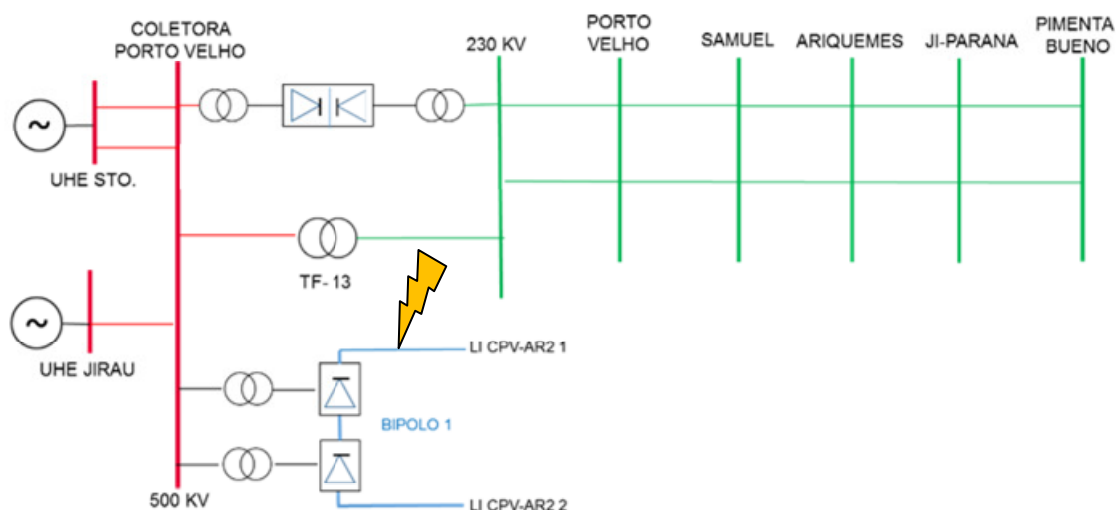


FIGURA 2 – Diagrama Esquemático da Área de Origem da Perturbação

O aumento repentino de potência do bipolo de cerca de 1.000 MW refletiu-se como uma tomada de carga desse montante provocando inversão no sentido do fluxo do transformador provisório 525/230 kV da SE Coletora Porto Velho (TF-13) e da interligação do sistema Acre/Rondônia, com consequente perda de sincronismo entre as máquinas da área 230 kV Acre-Rondônia e o restante do SIN. Com isto, houve o desligamento automático das LT 230 kV Pimenta Bueno / Ji-Paraná C1 e C2, por atuação correta da proteção de perda de sincronismo, cerca de 750 ms após o desbloqueio do polo 1, abrindo a interligação 230 kV Acre-Rondônia. A atuação da PPS no terminal de Ji-Paraná do circuito 2 comanda a abertura dos terminais locais dos circuitos 1 e 2. No circuito 1, é enviado sinal de transferência de disparo para o terminal de Pimenta Bueno. A característica da PPS implementada e a trajetória da impedância medida estão mostradas na figura 3.

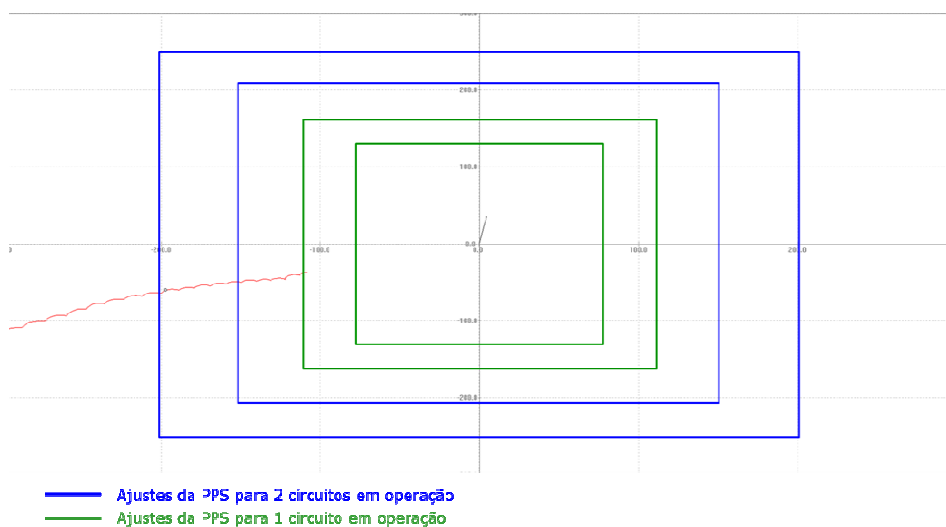


FIGURA 3 – Característica de operação da PPS da LT 230kV Ji-Paraná / Pimenta Bueno C2.

Foi observado, em registros oscilográficos, uma sobretensão de cerca de 14% no terminal de Ji-Paraná, da LT Ji-Paraná / Pimenta Bueno C2, visto que o terminal de Pimenta Bueno permaneceu fechado.

Foi também observado um aumento na corrente do transformador provisório 525/230 kV da SE Coletora Porto Velho (TF-13), provocando seu desligamento cerca de 990 ms após o desbloqueio do Polo 1, por atuação incorreta da proteção de sobrecorrente de fase do lado de 230 kV, de tempo definido, ajustada em 400 ms. Este desligamento separou o sistema de 500 kV do 230 kV na SE Coletora Porto Velho, isolando as UHE Santo Antônio e Jirau com o Polo 1, formando uma segunda ilha.

As UHE Jirau e Santo Antônio estavam operando com 8 e 6 unidades geradoras respectivamente, permaneceram suprindo a potência ativa solicitada pelo polo, fazendo com que a frequência elétrica nesta ilha caísse rapidamente. Foi observada uma frequência mínima de 55,5 Hz, medida na barra de 500 kV da SE Coletora Porto Velho. Este fato provocou o desligamento automático das unidades geradoras da UHE Jirau (UG01, UG02, UG03, UG29, UG30, UG31, UG39 e UG40) e da UHE Santo Antonio (UG09, UG10, UG12, UG13, UG14 e UG15) pela atuação correta da proteção de subfrequência, cujo ajuste é de 56 Hz.

Na oscilografia da unidade geradora 09 da UHE Santo Antônio, mostrada na figura 4, é possível verificar a subfrequência atingida:

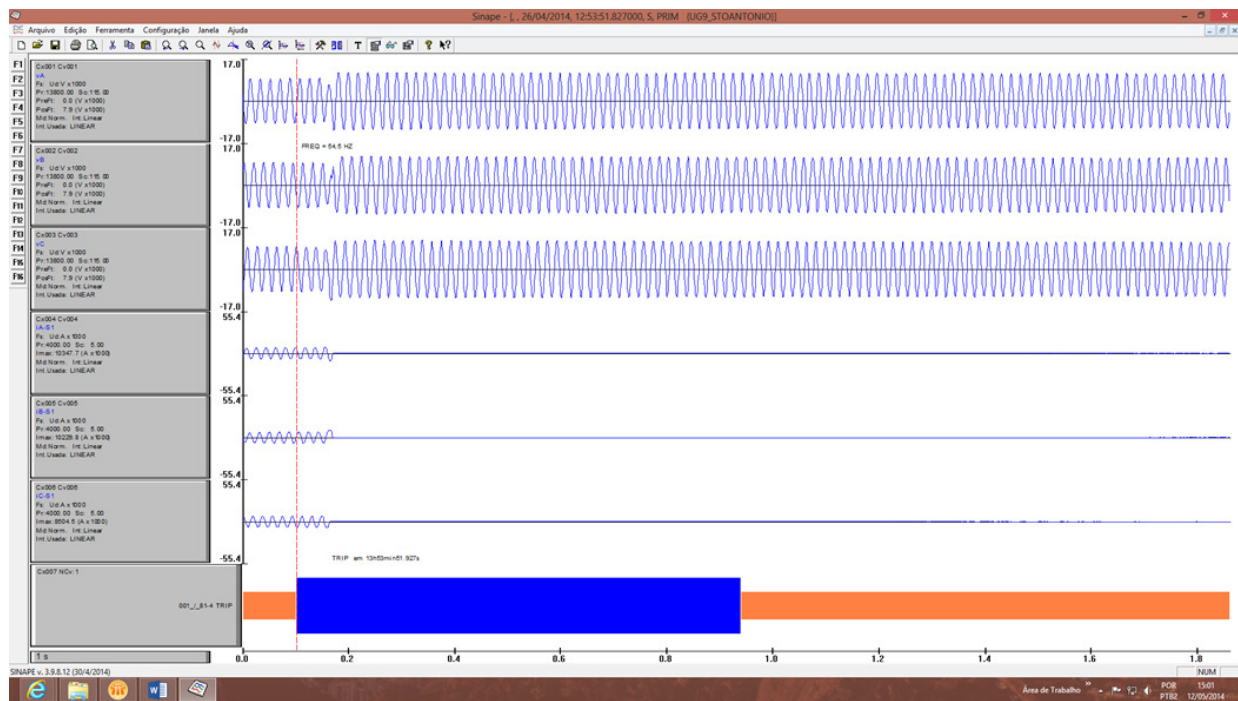


FIGURA 4 – Oscilografia da UG09 da UHE Santo Antônio

Após a saída das unidades geradoras das UHE Santo Antônio e Jirau, foram abertas manualmente a LT 500 kV Santo Antonio / Coletora Porto Velho C3 e LT 500 kV Jirau / Coletora Porto Velho C1.

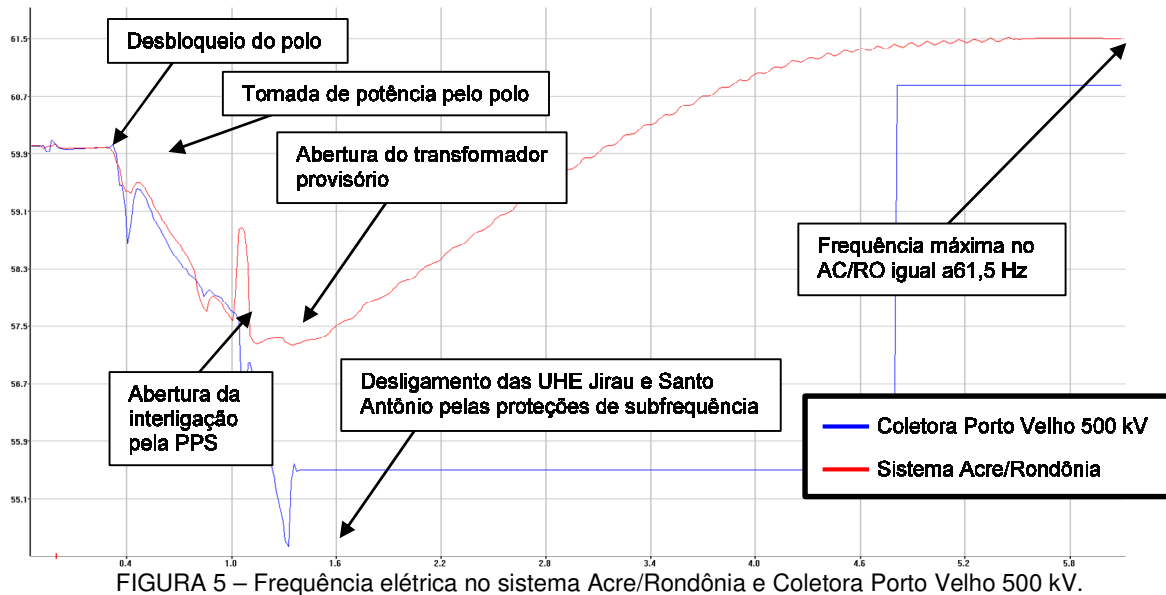
Texto de ARARAQUARA removido porque já está ni final do item ( o texto estava duplicado)

A perturbação também provocou a atuação do Esquema Regional de Alívio de Cargas - ERAC na área ilhada do sistema Acre – Rondônia, onde a frequência atingiu o valor mínimo de 57,5 Hz, cortando 187,7 MW de cargas em Rondônia e 3,52 MW no Acre. Foi correto o desempenho do ERAC em Rondônia e incorreto no Acre, por anormalidades em disjuntores de circuitos alimentadores em 13,8 kV, impactando nos tempos envolvidos no processo de recomposição das cargas interrompidas.

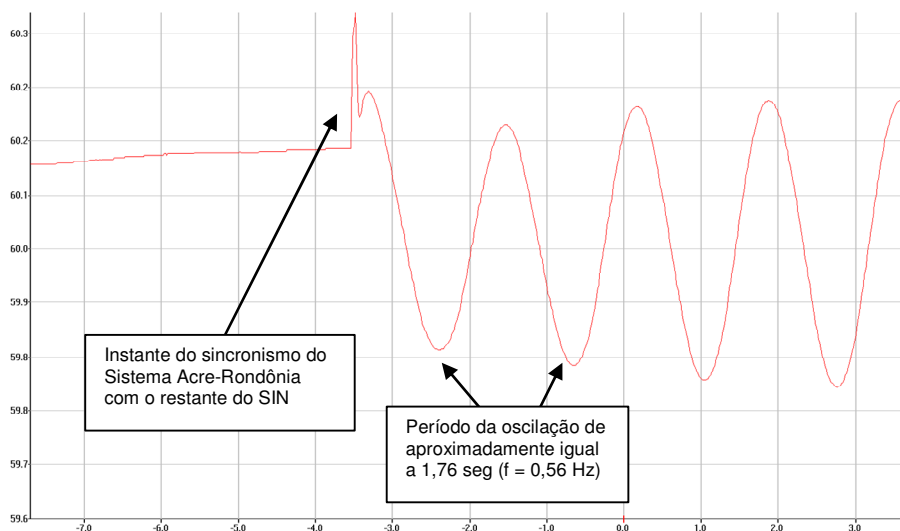
Por outro lado, o sistema Acre/Rondônia, que ficou sendo suprido pela UTE Termonorte II (3 UGs) e pela UHE Samuel (5 UGs), com o desligamento do transformador TF13, teve como resultado a rejeição de carga pelo ERAC, suficiente para que a frequência elétrica neste sistema iniciasse sua recuperação imediatamente, tendo atingido a frequência mínima de 57,5 Hz. A frequência máxima observada após a recuperação foi de aproximadamente 61,5 Hz. Com a frequência recuperada, o sistema Acre/Rondônia permaneceu estável e isolado do SIN até o momento do sincronismo, alguns minutos após o início da perturbação, às 13h57min.

Em função dos desvios de frequência durante a perturbação, os PSSs da UTE Termonorte II e das UHEs Jirau, Santo Antônio e Samuel foram desligados por intermédio da lógica de desconexão dos PSS. A referida lógica de desconexão dos PSSs atua para desvios maiores que 0,8 Hz por um segundo.

A figura 5 abaixo apresenta a frequência elétrica no Sistema Acre-Rondônia e na SE Coletora Porto Velho, obtidas através das oscilografias de longa duração da UTE Termonorte II e do bipolo de corrente contínua, na ocasião da perturbação, destacando os principais eventos.



Imediatamente após o sincronismo com o SIN, foi observada oscilação de potência sustentada associada ao modo interárea (Acre/Rondônia x SIN com frequência de oscilação entre 0,5 e 0,6 Hz) ocasionada por falta de torque de amortecimento provocado pelo desligamento do PSS da UTE Termonorte II, conforme pode ser observado no registro da na figura 6 abaixo.



Do ponto de vista do terminal de Araraquara 2, o polo realizou uma injeção de aproximadamente 1.000 MW até o instante do desligamento das usinas do Rio Madeira, quando houve redução de potência do polo. Nesta área, não foram identificados desligamentos adicionais (além daqueles associados ao sistema de transmissão em corrente contínua) ou maiores consequências para o sistema elétrico da região sudeste em função desta ocorrência. A frequência elétrica nesta região permaneceu estável e sem excursões expressivas.

### 3.0 - PROVIDÊNCIAS TOMADAS

A perturbação em pauta foi causada por uma falha no controle do Bipolo 1, ocorrida no momento da operação de desbloqueio do Polo 1 para sua entrada em operação. Esta falha ocasionou uma ordem de corrente anormal, de valores muito elevados, a partir da ordem de potência de entrada para a operação de desbloqueio do referido Polo. Esta potência foi demandada pelo elo em função de uma implementação incorreta da lógica de controle responsável por calcular a ordem de corrente do polo. Nas manobras de desbloqueio, a referida lógica realiza a divisão da ordem de potência pela tensão no lado CC do conversor, que na ocasião do desbloqueio era zero, razão

pela qual a ordem de corrente para o polo assumiu incorretamente valores elevados. A figura 5 apresenta um diagrama simplificado da lógica de cálculo da ordem de corrente.

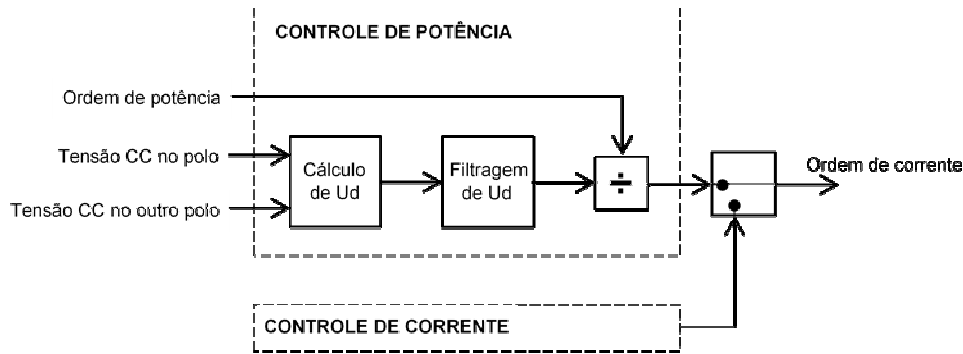


FIGURA 5 – Lógica para o cálculo da ordem de corrente do polo

Como providência, após a ocorrência, foram implementadas ações preventivas no controle do Polo 1 do Madeira, de forma a evitar novas ocorrências deste tipo, tais como: reset dos computadores de controle do Polo1; inserção de um limite para o valor de corrente no momento do desbloqueio do Polo 1 para, em caso de repetição do problema, o sistema limite a potência em torno de 165 MW. Sendo o desbloqueio do polo satisfatório, o limite de corrente será normalizado, liberando a transmissão desejada.

Foi habilitada lógica de desconexão/reconexão automática dos PSSs das unidades geradoras da UTE Termonorte II (gás e vapor), de forma a garantir o retorno dos mesmos.

Foram revisados os ajustes das proteções de sobrecorrente do TF13 da SE Coletora Porto Velho visando adequar as atuações destas proteções aos níveis de curto-circuito atuais do sistema.

Quando de atuação da proteção de perda de sincronismo (PPS), instalada no terminal de Ji-Paraná, foi Implementado o envio de sinal de transferência de disparo para o terminal de Pimenta Bueno da LT 230kV Ji-Parana – Pimenta Bueno C2,

Foram acertadas as não conformidades observadas no desempenho do ERAC no estado do Acre, onde ocorreu desligamento de apenas 01 alimentador em cada um dos dois primeiros estágios e não atuação dos demais estágios (3º ao 5º), uma vez que a frequência mínima observada na perturbação foi de 57,5 Hz.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

Após as análises das oscilografias dos equipamentos fornecidas pelos agentes envolvidos, e das verificações das oscilações de frequência obtidas através das Unidades de Medição Fasorial - PMU (*Phasor Measurement Units*), foram geradas recomendações e efetuadas ações pelos agentes envolvidos.

Sendo as principais:

- Adequação na estrutura da lógica de Controle de Bipolo nos polos 1 e 2;
- Implementação de novos ajustes das proteções do transformador provisório 525/230 kV da SE Coletora Porto Velho (TF-13);
- Implementação de envio de sinal de transferência de disparo para o terminal remoto, quando de atuação da proteção de perda de sincronismo da LT 230 kV Ji-Paraná / Pimenta Bueno C2.
- Implementação de lógica de desconexão/reconexão automática dos PSSs das unidades geradoras da UTE Termonorte II (gás e vapor).
- Correção das atuações do ERAC no do Estado do Acre.

Todas as ações corretivas e preventivas efetuadas neste sistema, farão com que ocorrências deste tipo não mais ocorram, ou, caso ocorram, tenham um impacto bem menor para o SIN, além de propiciar maior agilidade nos tempos envolvidos no processo de recomposição das cargas interrompidas

Cabe ressaltar o envolvimento e empenho dos agentes envolvidos nesta perturbação, que agiram em conjunto com o ONS na investigação dos problemas e implementação das soluções recomendadas, de forma a contribuir para o funcionamento seguro e correto do SIN.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Relatório de Análise de Perturbação ONS RE 3/0067/2014 - ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 26/04/2014 ÀS 13H53MIN ENVOLVENDO A UHE SANTO ANTONIO, UHE JIRAU E ÁREA 230 KV ACRE/RONDÔNIA
- (2) Manual de aplicação SINAPE- Sistema Integrado de Apoio à Análise de Perturbação
- (3) Projeto MedFasee:Desenvolvimentos e Aplicações da Tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada- UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina)/ONS.
- (4) Curso de Transmissão em Corrente Contínua - Controle Mestre do Sistema de Transmissão em Corrente Contínua – Sergio Luiz de Azevedo Sardinha - ONS

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Denise Borges de Oliveira nasceu em 1959 na cidade do Rio de Janeiro, estado do Rio de Janeiro. Recebeu seu diploma de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 1981, e de Pós-Graduação/Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2003. Trabalhou em Furnas Centrais Elétricas S.A. de 1981 à 2013 na área de análises e estudos de proteção. Em 2014 passou a trabalhar na Gerência de Proteção e Controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, atuando em análise de perturbações e ajustes de proteção. Participa do Grupo de Estudos de Proteção (GE03) da Comissão Mista de Operação ANDE/ITAIPU/ELETRORBRAS – CMO, e do Comitê Técnico do STPC- Seminário Técnico de Proteção e Controle.