



GRUPO IX
GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GOP

CORRENTES GEOMAGNÉTICAS NO BRASIL - FANTASIA OU REALIDADE?

Leontina Pinto*

Jacques Szczupak

Márcio A. Drummond

Luiz H. Macedo

ENGENHO

ENGENHO

ELETROBRÁS

ENGENHO

RESUMO

Este trabalho discute o impacto, sobre o sistema elétrico, de um fenômeno tão pouco conhecido como perigoso: o geomagnetismo, capaz de criar significativas variações de campo magnético e conseqüentes correntes geomagneticamente induzidas. O artigo apresenta uma breve descrição do fenômeno geomagnético, seus efeitos em redes de energia e suas manifestações na América do Sul. Finalmente, mostramos a ocorrência do fenômeno durante algumas falhas históricas que registraram coincidências de defeitos de difícil explicação à luz dos conhecimentos convencionais.

PALAVRAS-CHAVE

Correntes Geomagneticamente Induzidas, GICs, Geomagnetismo, Perturbações, Blecautes

1.0 - INTRODUÇÃO

Os eventos estudados neste trabalho iniciam-se em belos dias ensolarados, normalmente na primavera-verão brasileiros. Tempo perfeito, sem sinais de chuvas, sistemas operando normalmente, quando – bruscamente – inicia-se uma perturbação de grandes proporções. Equipamentos incendeiam-se, a proteção é errática, os defeitos “varrem” a rede, ultrapassando fronteiras antes julgadas intransponíveis. Desligamentos automáticos parecem proliferar, religamentos não funcionam. Passada a crise, restabelecida a normalidade, vem a recorrência: os defeitos parecem “retornar” – às vezes no mesmo dia, às vezes alguns dias depois. Felizmente, depois de alguns dias de sucessivas perturbações, a rede – rebelde durante alguns dias – parece “amansar-se”, volta a cooperar. A proteção volta a atuar como esperado, religamentos são aceitos, o sistema retoma a normalidade.

Este panorama - propositadamente exacerbado, para capturar a atenção do leitor – não é totalmente irreal. Ocorreu várias vezes – e tem se repetido com freqüência quase que assustadora. Dois fatores são comuns em todos eles: o primeiro é a dificuldade de explicação técnica (à luz dos conhecimentos convencionais) para tantas e tamanhas coincidências, cuja probabilidade de ocorrência conjunta seria dado como praticamente nulo em qualquer modelo de análise de confiabilidade. O segundo é o tema deste artigo: em todos os eventos analisados ocorria um fenômeno até agora pouco estudado no setor elétrico brasileiro: o geomagnetismo – tema de nosso artigo.

2.0 - O FENÔMENO GEOMAGNÉTICO

A literatura científica é pródiga na descrição do fenômeno geomagnético, incluindo livros-texto geofísicos [1], artigos em revistas especializadas do setor elétrico [2,3,4], relatórios de projetos [5], e artigos abordando o fenômeno no contexto da América do Sul [6]. Importantes instituições, como o NOAA e a NASA, mantêm uma monitoração constante em tempo real da atividade solar, emitindo avisos (warnings) sobre eventos potencialmente perigosos para as redes elétricas e de comunicações [7].

Sabe-se que o Sol é uma das fontes primárias da vida na Terra. Nossa estrela maior, entretanto, envia-nos mais que luz e calor. Seu campo magnético é extremamente dinâmico; pulsa, contrai-se, expande-se – e, algumas vezes, “explode” pelo lançamento ao espaço – eventualmente sobre nosso planeta – de enormes “jatos” de partículas eletricamente carregadas (os *ventos solares* ou *solar winds*). A Figura 1 mostra as imagens de alguns destes eventos (obtidas do satélite SOHO, [8]) – conhecidos como CME (Coronal Mass Ejection) ou popularmente tempestades solares (Solar Storms).

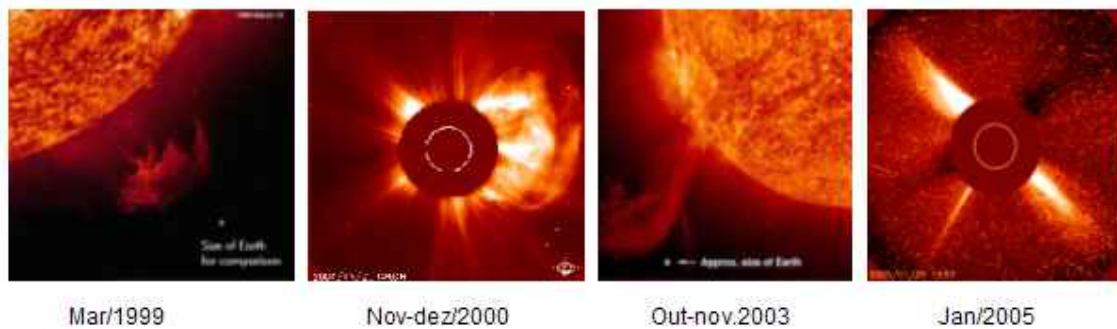


FIGURA 1 – Tempestades Solares recentes

Felizmente, a maior parte desta energia emanada, mesmo quando em nossa direção, encontra uma “barreira protetora” que impede – ou minimiza enormemente – seu impacto. O próprio campo magnético da Terra forma um “escudo” – a *magnetosfera* – que atua como um verdadeiro “cinturão de força” (os conhecidos *cinturões interno e externo de Van Allen*), antepondo-se à entrada destas partículas em nossa atmosfera. Esta proteção, entretanto, não é uniforme. A Figura 2a apresenta a clássica ilustração dos cinturões de Van Allen, que seguem as linhas de fluxo (ilustradas na Figura 2b) e intensificam-se à medida em que se aproximam do Equador.

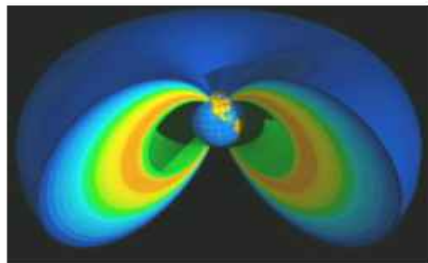


FIGURA 2a – Magnetosfera

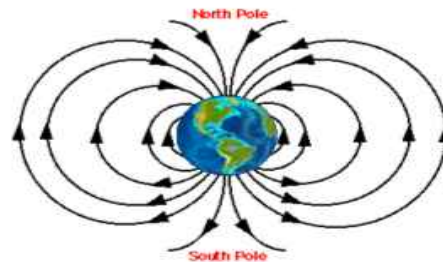


FIGURA 2b – Polos Terrestres

A Figura simplificada da Magnetosfera, entretanto, cumpre apenas um papel ilustrativo. Na verdade, a simetria dos cinturões é apenas uma situação ideal. Na prática, os cinturões são bastante distorcidos – até pelo próprio efeito dia/noite, já que o Sol “comprime” a face da Terra por ele iluminada, criando a distorção ilustrada na Figura 3a ou fotografada por satélite (NOAA/NASA), como na Figura 3b.



FIGURA 3a – Magnetosfera (ilustração)



FIGURA 3b – Magnetosfera (foto)

Sabe-se que os cinturões de Van Allen não formam um escudo perfeito. Eles impedem a entrada, em nossa atmosfera, de partículas eletricamente neutras e alguns tipos de radiação. Entretanto, cargas eletricamente carregadas podem ser “capturadas” pelo campo geomagnético, e passam a realizar uma trajetória “espiral” em torno de suas linhas, como ilustrado na Figura 4. Normalmente os elétrons, mais leves, ficam contidos no cinturão externo de Van Allen. Os prótons, mais pesados, acumulam-se no cinturão interno e, dependendo de sua energia e concentração, chegam a penetrar na atmosfera – normalmente pelas regiões próximas aos pólos magnéticos, criando as conhecidas (e belíssimas) auroras.



FIGURA 4 – Trajetória das Partículas Eletricamente carregadas ao longo do Campo Terrestre

A descrição estaria completa, não fosse um fenômeno natural até recentemente pouco conhecido no setor: a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (South Atlantic Geomagnetic Anomaly, SAGA). Esta anomalia descrita em [9,10], deve-se possivelmente às características geofísicas da região e à diferença entre os eixos magnético e geográfico do planeta, e faz com que a região vulnerável do hemisfério Sul extrapole os limites das altas latitudes (Antártida). Na verdade, os cinturões de Van Allen apresentam uma forte distorção na região do Atlântico Sul, criando sobre a América do Sul (mais especificamente o Brasil) um verdadeiro “sorvedouro de prótons”, extremamente vulnerável durante os eventos solares.

A importância e a força da Anomalia Magnética do Atlântico Sul pode ser medida pelas recomendações da NASA. Há uma expressa restrição às rotas de seus foguetes, que não podem cruzar o centro da anomalia – a qual, segundo eles, forma uma região que lembra um pato (the duck). O conceito de que o fenômeno geomagnético é característico de altas latitudes (como se pensava antigamente) passa por uma revisão a partir da definição da NASA [11], que explica a força da Anomalia do Atlântico Sul:

“There are three regions over the Earth where scientists typically observe high levels of radiation—over the North and South Poles, and another region centered partly over Brazil and extending out over the Atlantic Ocean that scientists call the “South Atlantic Anomaly.” In this region, scientists observe very high levels of proton radiation. The Terra flight operations team nicknamed the region “The Duck” because when you draw a contour map of the central part of the South Atlantic Anomaly where the radiation levels are highest, it resembles the profile of a duck”

A página explica ainda as falhas nos equipamentos elétricos/eletrônicos detetadas no satélite “TERRA” quando exposto à radiação que emanava da anomalia magnética: alarmes errôneos, panes em equipamentos, etc:

“exposure to radiation in The Duck essentially fooled Terra’s High Gain Antenna into thinking that a fault condition existed in its Motor Drive Assembly. The antenna responded by turning itself off in order to prevent any possible damage from occurring. Interestingly, the Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, or MISR, instrument aboard Terra confirmed that the spacecraft was being exposed to high levels of radiation over the South Atlantic Anomaly.”

As Figuras 5a e 5b exibem o contorno do Centro da Anomalia (the duck) – área proibida nas rotas de satélites – e uma foto da NASA realçando os níveis de prótons na Terra. É possível ver claramente a anomalia – onde a densidade de prótons brilha com grande intensidade.



FIGURA 5a – The duck – proibida a satélites

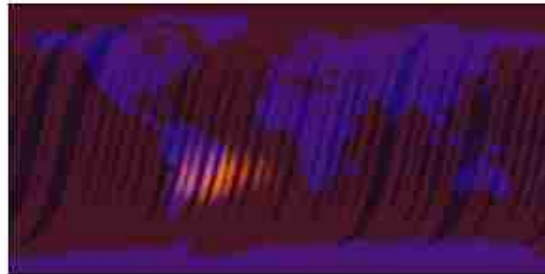


FIGURA 5b – Mapeamento da concentração de prótons

3.0 - CORRENTES GEOMAGNETICAMENTE INDUZIDAS E SUAS CONSEQUÊNCIAS

As correntes geomagneticamente induzidas (GICs), causadas por atividades solares são correntes de frequência muito baixa, praticamente correntes contínuas que entram e saem dos sistemas de potência pelos vários pontos de aterramento [2], conforme mostrado na Figura 6. Têm sido medidas correntes, no neutro de um único transformador, superiores a 150A no Canadá, 184 A na América do Norte e 200 A na Finlândia. Seus impactos são extensivamente conhecidos e descritos na literatura especializada. Este trabalho buscará resumir alguns dos efeitos que consideramos mais relevantes; maiores detalhes podem ser encontrados na extensa literatura especializada, como por exemplo [2-6].

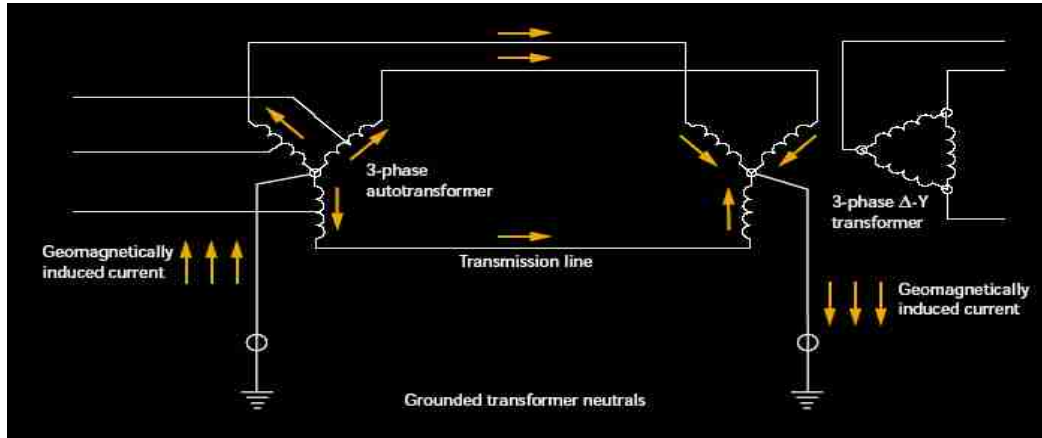


FIGURA 6 – Caminho das Correntes Geomagnéticas nos Sistemas Elétricos

Dois conjuntos de fatores determinam a severidade de um evento de correntes geomagneticamente induzidas num sistema elétrico. Um conjunto é associado ao campo geoelétrico, sua extensão e intensidade. O outro conjunto de fatores diz respeito ao tipo de equipamento e a forma como ele é utilizado. Buscaremos, neste trabalho, acompanhar uma GIC e analisar os efeitos que ela causa ao entrar num sistema elétrico.

3.1 Conceitos Gerais

O transformador é uma máquina de corrente alternada, que só funciona propriamente por variações de corrente, fluxo e tensão no tempo. O núcleo do transformador tem uma capacidade limitada de se magnetizar, ou seja, densidades de fluxo magnético acima de um determinado limite (dado pela geometria e características magnéticas do material empregado na construção do transformador) não responderão a variações de tensão. A Figura 7a mostra o circuito equivalente de um transformador de potência e a Figura 7b um exemplo prático da curva de saturação de um transformador monofásico de 500 kV / 138 kV – 200 MVA.

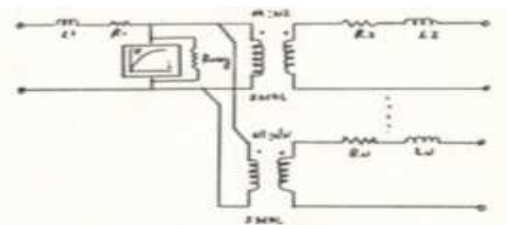


FIGURA 7a – Circuito Equivalente

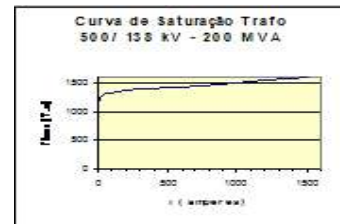


FIGURA 7b – Curva Típica de Saturação

Se uma tensão equivalente

$$V = V_m \cos \omega t \quad (1)$$

é aplicada sobre o transformador, já descontado o fluxo de dispersão e as perdas ôhmicas nos enrolamentos, o enlace de fluxo é dado por

$$\lambda = \int V_m \cos \omega t = (V_m / \omega) \sin \omega t \quad (2)$$

ou seja, o fluxo no transformador é inversamente proporcional à frequência.

Uma excitação contínua aplicada ao transformador equivale a uma frequência praticamente nula no denominador de (2), indicando altos níveis de fluxo, que o levarão à saturação. No entanto esta excitação contínua não é a única sobre o transformador. Ele continua sujeito à tensão de frequência fundamental do sistema de potência, que encontra um núcleo saturado pela corrente contínua originada na GIC.

A decomposição da corrente do transformador saturado em série de Fourier indica, em um sistema equilibrado com tensões puramente senoidais, predominância de 2º e 3º harmônicos, sendo os harmônicos de ordem $3n+1$ seqüência positiva, $3n-1$ de seqüência negativa e $3n$ de seqüência zero. Na prática, o sistema não é tão equilibrado e os níveis de saturação são desbalanceados nas 3 fases, pois dependem do valor instantâneo do fluxo magnético em cada fase de um banco de transformadores, por exemplo, o que fará as 3 fases atingirem a saturação em momentos distintos. As seqüências teóricas dos harmônicos não se aplicam e podem aparecer harmônicos de ordens mais altas com amplitudes significativas, como já foi medido experimentalmente. A Figura 8 mostra exemplos de correntes saturadas numa simulação de um banco de transformadores de 500/230 kV de 3x 200 MVA.

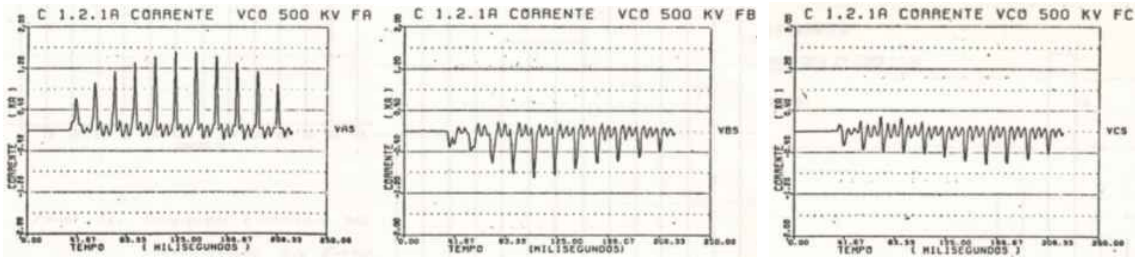


FIGURA 8 – Exemplos de correntes saturadas nas fases de um transformador 500/ 230kv – 200 MVA

Temos então uma injeção, no sistema de potência, de uma corrente contínua e uma série de harmônicos. Passamos a seguir a analisar seus efeitos na rede em geral e nos seguintes componentes do sistema:

3.2 Transformadores de Potência

As grandes transformações dos sistemas de transmissão são em geral feita por bancos de unidades monofásicas por serem mais fáceis de transportar e mais econômicas no que se refere a unidades reservas. No entanto, os bancos de transformadores são mais susceptíveis às GICs do que as unidades trifásicas, nas quais seus efeitos são parcialmente compensados no núcleo comum.

Quando o núcleo do transformador se satura, o fluxo excedente do campo magnético procura outros caminhos tais como o tanque do transformador. As correntes dispersas aquecem os materiais, produzindo pontos quentes no tanque e nas paredes internas (há relatos de temperaturas de 175° C). Os materiais mais sensíveis, que não estiverem dimensionados para essas temperaturas, podem se fundir. A exposição repetida a aquecimento produzido por GICs pode assim provocar progressivamente danos ao isolamento das bobinas, cujo encurtamento da vida significa falha prematura do transformador. O sobreaquecimento pode levar a incêndios e explosões.

Durante a saturação o consumo de reativo cresce no transformador. Ele se comporta como um reator saturável. A energia reativa disponível no sistema é consumida podendo produzir efeitos em cascata e levando até mesmo, em casos extremos, a colapsos de tensão.

3.3 Bancos de Capacitores e Filtros de Harmônicos

Do ponto de vista do sistema, o transformador saturado se comporta como uma fonte de correntes harmônicas, que são injetadas na rede procurando os caminhos de menor impedância. Embora os bancos de capacitores ofereçam alta impedância às GICs, por serem correntes praticamente contínuas, eles constituem caminhos de baixa impedância para as correntes harmônicas dos transformadores saturados. Quando essas correntes fluem pelas fases de um banco de capacitores, o valor eficaz da corrente é dado por:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{1rms}^2 + I_{2rms}^2 + I_{3rms}^2 + \dots + I_{n rms}^2} \quad (3)$$

onde I_{1rms} é o valor eficaz da componente de frequência fundamental e os demais índices correspondem aos harmônicos de ordem superior.

O aquecimento causado pela sobrecorrente vai degradando as unidades de capacitores que compõem o banco, até a queima de uma delas. A partir de então, dependendo do esquema do banco, o ramo a que pertence a unidade queimada experimentará um progressivo processo de sobrecarga e queima das unidades remanescentes, até a sensibilização da proteção de desbalanço entre fases que acabará por desligar o banco. Este problema agrava sobremaneira o estado geral do sistema que, pela saturação dos transformadores já pode estar carecendo de fontes de energia reativa. Assim, bancos de capacitores que desligam por desbalanço, podem ser sintomas de GICs.

3.4 Transformadores para Instrumentos – TCs s TPs

Os TCs e os TPs estarão sujeitos a ambos os efeitos, tanto ao efeito da corrente contínua geomagneticamente induzida quanto aos efeitos das correntes harmônicas. As correntes harmônicas tenderão a produzir erros de medição em ambos os instrumentos. Já a GIC é praticamente bloqueada pelos Divisores Capacitivos de Potencial (DCPs), mas causa saturação nos TCs, colapsando em pulsos a tensão do secundário. A consequência é a interpretação errônea dos eventos pelos circuitos de proteção e controle alimentados pelos secundários dos TCs.

3.5 Sistemas de Proteção

3.5.1 Circuitos de Proteção em Geral

Foi comentado que a saturação de TCs por GICs pode causar envio de informações que produzam inversões de lógica, tanto criando falsos eventos quanto mascarando eventos reais. Este efeito poderia ser responsável, por exemplo, pela interpretação na falha de abertura de um disjuntor, quando este teria operado corretamente, e a proteção iniciaria uma atuação numa lógica secundária.

Alguns relés digitais atualmente em uso são também sensíveis a harmônicos. Eles costumam medir o valor de crista da corrente e calcular o valor rms da corrente na base da forma de onda de 50Hz ou 60 HZ. Com o aumento do valor rms pelos harmônicos causados por saturação, esses relés digitais reagem a correntes de frequência fundamental, tão baixas quanto metade da corrente de ajuste, causando falsas atuações da proteção e desligamentos em equipamentos tais como banco de capacitores, banco de filtros ou compensadores estáticos.

Correntes de sequência negativa e zero são normalmente utilizadas em outros esquemas de proteção. Nos releamentos mais antigos, filtros analógicos eram utilizados para extrair a componente de sequência desejada. Dependendo da resposta em frequência desses filtros, em alguns casos, pode ser conveniente (ou não) responder aos harmônicos das componentes de sequência. Por exemplo, alguns esquemas direcionais que utilizam componentes de sequência negativa podem operar falsamente devido à presença de harmônicos de mais alta ordem que são de sequência negativa.

Finalmente, vale lembrar que a operação das redes elétricas depende dos sistemas de comunicação que, em teoria podem também ser negativamente afetados por GICs.

3.5.2 Proteção Diferencial de Transformadores

Transformadores com saturação unidirecional, como as causadas por GICs, podem sensibilizar seus esquemas de proteção diferencial, uma vez que as correntes saturadas fluindo pelo neutro aterrado do enrolamento primário não tem imagem no secundário que obedeça à relação de transformação. Se a proteção diferencial perceber a diferença entre as correntes do primário e do secundário, interpretará essa diferença como sendo uma falha interna e desligará o transformador.

3.5.3 Proteção de Neutro de Bancos de Transformadores

Os relés de sobrecorrente do neutro de transformadores também podem operar incorretamente, uma vez que os harmônicos múltiplos de 3 podem ser interpretados como correntes de sequência zero e informar uma falsa corrente de neutro alta para o relé.

3.6 Geradores

Embora as GICs não possam fluir em grandes geradores, por causa do bloqueio natural oferecido pelas ligações dos transformadores elevadores Y- Δ , o gerador ainda estará sujeito aos harmônicos causados pela saturação unidirecional. O segundo e o quarto harmônicos que circulam diretamente no circuito do rotor do gerador, estão entre os maiores harmônicos produzidos numa perturbação geomagnética forte. Eles podem sobreaquecer os anéis do rotor, enquanto os harmônicos de sequência positiva podem excitar vibrações mecânicas.

Como essas correntes de aquecimento do rotor crescem linearmente com GICs maiores no neutro do transformador elevador, deve-se tomar cuidado para assegurar que a proteção continue a funcionar adequadamente. Não há ainda normas para correntes harmônicas permissíveis em geradores e os relés convencionais de sequência negativa para geradores devem ser projetados para responder apenas à corrente de frequência fundamental.

3.7 Vulnerabilidade

Sabe-se [2.6] que são mais sujeitos a falhas os sistemas interligados, compostos por linhas longas, pequeno grau de redundância, operando próximo aos limites e situados em regiões de rochas ígneas, sujeitas a fortes anomalias magnéticas. Pode-se notar que o Brasil tem todos os ingredientes (elétricos, energéticos, geofísicos) necessários para que a atuação de Correntes Geomagneticamente Induzidas, possa gerar danos de proporções significativas.

4.0 - CASO-EXEMPLO

O conceito apresentado neste trabalho será ilustrado através de uma perturbação histórica extraída do relatório do ONS (Operador Nacional do Sistema). Como as limitações do artigo (espaço e tamanho de arquivos) tornam proibitiva uma interpretação elétrica do fenômeno, optamos por mostrar o forte geomagnetismo a que estávamos submetidos na época. O relatório completo [12], com a análise elétrica das ocorrências e a sua associação a possíveis GICs, pode ser obtido diretamente com os autores.

O evento de 12 a 14 de dezembro de 2000 abrange um conjunto de falhas coincidentes no Rio de Janeiro, seguidas pela saída de um ponto nevrálgico do sistema brasileiro, culminada por problemas em S. Paulo. Não foi encontrada nenhuma causa comum que pudesse justificar a ocorrência desta seqüência quase que improvável de falhas simultâneas. O tempo nas regiões afetadas encontrava-se bom, sem sinais de tempestades atmosféricas. A ANEEL decidiu multar duas empresas: Light e Furnas, que posteriormente recorreram e conseguiram provar que os equipamentos passavam pelos procedimentos corretos de manutenção e não houve nenhum erro técnico que pudesse causar tais perturbações. Em outras palavras, pode-se concluir que foram eventos sem causa aparente, cuja impressionante coincidência não pôde, à época, ser devidamente explicada.

A Figura 9a apresenta uma foto de satélite da época, sobre a qual foram superpostas as anomalias magnéticas identificadas por modelos específicos de filtros [13] (traços em azul) e a rede elétrica. As estrelas brancas marcam os pontos nos quais foram registradas as falhas elétricas. É possível notar não só a coincidência entre as perturbações e a anomalia que atravessa o Rio de Janeiro, S. Paulo e Paraná, mas também a coerência com a descrição do fenômeno (linhas longas, direção horizontal, rochas ígneas, etc.). Podem-se observar ainda fortes anomalias magnéticas em todo o país, que possivelmente causaram, ou contribuíram para todos os eventos relatados na época (na verdade, a referência [14] mostra a total coincidência entre as anomalias identificadas e os eventos oficialmente registrados no período).

A Figura 9b ilustra os níveis de partículas carregadas. É possível ver que as perturbações não necessariamente coincidem com o *maior* nível de partículas – normalmente durante as tempestades, como nos dias 330-338 (29/11 a 1/12), mas com a maior *variação neste nível* – afinal, é a variação de campo que gera as correntes – que se intensifica entre os dias 345-350 (10 a 15/dez), com ápices coincidentes com as perturbações analisadas. Os valores do campo medido pelo Observatório de Vassouras, ilustrados na Figura 9c (note-se a diferença de escala), são coerentes com o fenômeno e apresentam seu ápice exatamente nos dias das perturbações (falhas) elétricas.

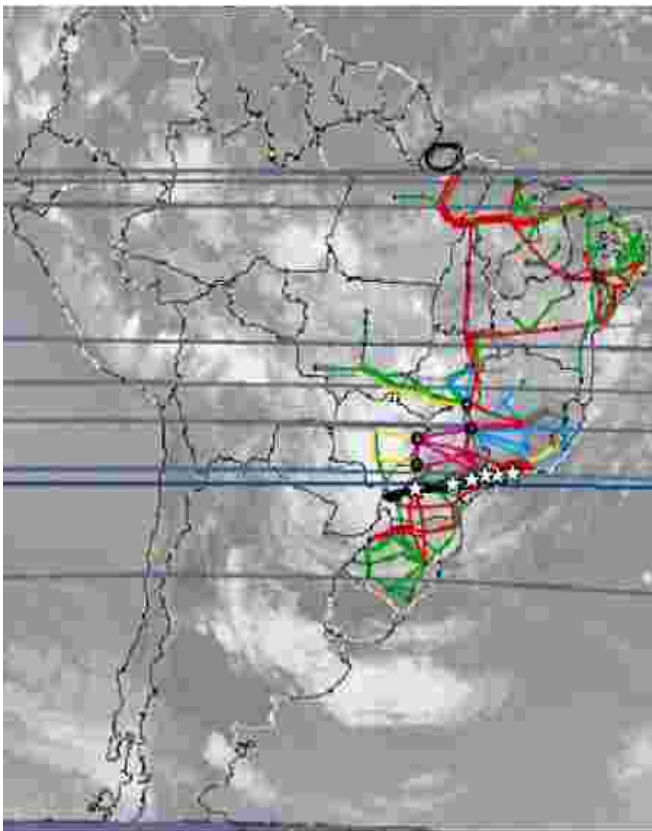


FIGURA 9a – Anomalias Identificadas

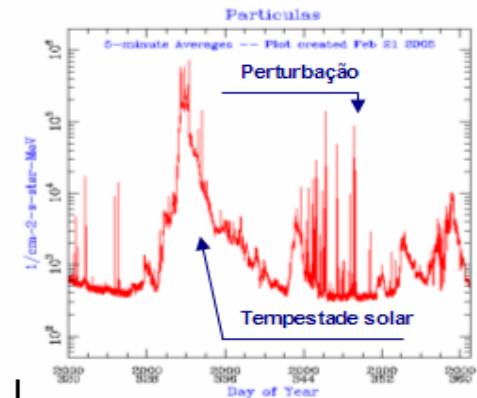


FIGURA 9b – Concentração de Partículas

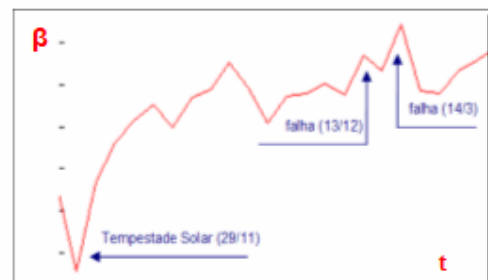


FIGURA 9c – Campo Geomagnético – Vassouras, RJ

Devido às limitações naturais de um artigo, não há espaço para apresentar outros casos-exemplo. O histórico brasileiro, entretanto, é pródigo em perturbações, de grandes e pequenas proporções, ocorridas durante forte geomagnetismo [14]. Um dos casos mais interessantes é a descrição da operação durante as tempestades solares de outubro, novembro e dezembro de 2003 (as maiores do século). As falhas na proteção multiplicam-se e varrem o país, numa coincidência praticamente impossível pela teoria estatística. Outro evento interessante, atualmente em análise, é a sucessão de falhas e perturbações em janeiro de 2005 – quando ocorreu a maior tempestade de prótons dos últimos quinze anos.

5.0 - MONITORAÇÃO E PREVENÇÃO

A modelagem que utilizamos na detecção e filtragem das anomalias permite a realização de uma tarefa que consideramos importante para a segurança do sistema: a *monitoração* e *prevenção*. Temos observado um retardo entre o aparecimento do fenômeno geomagnético e a ocorrência das perturbações – que vai de algumas horas a poucos dias, dependendo da localização e da intensidade do fenômeno. Em muitos casos – incluindo o caso exemplo – é possível *prever* a possibilidade da falha, a partir da detecção das regiões de vulnerabilidade do sistema. Julgamos que este fato merece destaque, já que viabiliza a tomada de medidas preventivas – que vão desde o remanejamento de manutenções programadas até despachos preventivos.

6.0 - CONCLUSÕES

Este artigo discute a possível ocorrência na América do Sul – principalmente no Brasil - de Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs), responsáveis por blecautes de grandes proporções no hemisfério Norte. Foi mostrado que, apesar de antiga crença em contrário, nosso país reúne todas as condições para que o sistema de energia seja impactado pelo fenômeno geomagnético. Na verdade, modelos matemáticos e medições mostram que inúmeros blecautes históricos e aparentemente inexplicáveis (ou ao menos improváveis), como o apresentado no caso-exemplo, podem estar associados ao geomagnetismo.

Pretendemos, a partir dos resultados aqui relatados, abrir uma nova área de estudo, abrangendo as áreas de identificação, modelagem, monitoração e – sobretudo – prevenção e predição. Esperamos, assim, contribuir para o estudo e a mitigação dos efeitos desta verdadeira ameaça à segurança de sistemas elétricos.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao ONS a disponibilização, sempre rápida e eficiente, das informações relativas às perturbações estudadas e à rede elétrica. Agradecemos ainda ao Observatório Nacional não só pelos dados geomagnéticos como também pelo apoio técnico-científico, fundamental para o desenvolvimento do trabalho.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Campbell, W.H., "Introduction to Magnetic Fields", *Cambridge University Press, Second Edition, 2003*
- (2) Moore, S. K.; "Extreme Solar Storm Strikes Earth", *Ieee Spectrum, December 2003.*
- (3) Molinski, T. S., Feero, W. E.; Damsky, B. L.; "Shielding Grids From Solar Storms", *Ieee Spectrum, November 2000, [Pp 55-60].*
- (4) Kappenman, J.G., Zanetti, J.H., Radasky, W.A., "Geomagnetic Storms Can Threaten Electric Power Grid" *Earth In Space, Vol. 9, No. 7, March 1997, Pp.9-11 .© 1997*
- (5) Epri Report Tr-104167, "Sunburst Gic Network", Disponível on-Line
- (6) Pinto, L., Szczupak, J., Drummond, M.A., Macedo, L.H., "A New Threat to Power Systems Security", *Transmission and Distribution Latin America, São Paulo, 2004*
- (7) <http://www.sec.noaa.gov/elecpower/index.html>
- (8) sohowww.nascom.nasa.gov
- (9) <http://www.ll.mit.edu/ST/sbv/saa.html>
- (10) <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/display/saa.html>
- (11) http://eobglossary.gsfc.nasa.gov/Study/LearningToFly/fly_2.html
- (12) Drummond, M.A, Pinto, L., Szczupak, J.S, *Análise de Perturbações Elétricas e Possível Conexão com Fenômenos Geomagnéticos*, Relatório Engenho, 2005
- (13) Pinto, L., Macedo, L.H., Szczupak, J., "Possibilidades da Influência de Fenômenos Geomagnéticos nas Perturbações Elétricas ocorridas no SIN, Ano 2000", Relatório Engenho, 2004
- (14) Szczupak, J., Macedo, L.H., "Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais à Detecção de GICs", Relatório Engenho, 2004