

Um Novo Olhar sobre a Segurança de Sistemas Elétricos

L.M.V.G.Pinto, *Member, IEEE*, J.Szczupak, *Fellow, IEEE*

M. A. Drummond, *Member, IEEE*, L.H.Macedo, *Student Member, IEEE*,

Abstract—O artigo discute a ocorrência de Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) na América do Sul e suas consequências. Mostra que durante décadas engenheiros eletricitistas brasileiros e sul-americanos foram formados sob o paradigma de que GICs eram problema de sistemas elétricos de altas latitudes. No entanto, novas análises dos dados de satélites e correlação entre medidas do campo magnético terrestre e eventos furtivos nos sistemas elétricos do Brasil evidenciam que tal fenômeno pode se manifestar frequentemente na América do Sul, mesmo em latitudes consideradas tropicais. Blackouts e equipamentos danificados sem explicação aparente podem ter sua causa primária no efeito do campo geomagnético. A constatação dos efeitos destes fenômenos entre nós ultrapassa os limites técnicos, com consequências que atingem a própria atuação do órgão regulador. Um caso ilustrativo com uma coincidência de eventos aparentemente inexplicável, geradores de blackouts imprevisíveis e multas severas, é analisado e explicado à luz dos fenômenos geomagnéticos.

Index Terms — Blackouts, Earth Magnetic Field, Geomagnetic Induced Currents

I. INTRODUÇÃO

RIO de Janeiro, 12 de dezembro de 2000. Um lindo dia, nenhuma nuvem no céu. O povo preparava-se para mais um dia de calor, sem saber o que o esperaria para o almoço. Às 11:11, falha a usina de Angra dos Reis – vital para o atendimento do Rio de Janeiro; às 12:27min, desligam-se várias subestações importantes: São José (Furnas), Adrianópolis (Furnas) e Magé (CERJ). A consequência não é diferente da esperada: perda de carga generalizada por todo o estado.

Mas as desventuras dos cariocas estavam longe do fim. Um novo dia, novos eventos: desta vez (dia 13/12) “salta” a subestação central da Cidade Maravilhosa (Frei Caneca), causando novo blackout e todo tipo de transtorno. Finalmente, como que por contágio, na madrugada da mesma noite (às 0:33 do dia 14), falha a usina térmica de Santa Cruz (a 60 km do centro do Rio) e a usina nuclear de Angra dos Reis, 200 Km ao sul do estado.

Simultaneamente, o sistema brasileiro experimenta um defeito em um de seus pontos nevrálgicos: a subestação de Ivaiporã – causando uma perda de quase 3.000 MW e uma perturbação em grande parte das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste brasileiras. Como se não bastasse, no mesmo dia 14, uma perturbação iniciada em Cabreúva, S. Paulo (não muito distante da usina de Angra dos Reis, que já se recusava a funcionar normalmente) causou novas perturbações importantes que ultrapassaram a fronteira do estado de S. Paulo. Em paralelo, usinas importantes em vários pontos do país, de Norte a Sul, “pulavam”, equipamentos falhavam, e os problemas multiplicavam-se. É interessante notar que em grande parte destes locais não havia qualquer indício de descarga atmosférica devida a chuvas. Ao contrário: tanto o Rio de Janeiro como S. Paulo exibiam bom tempo, calor e ausência de nuvens.

Não é nosso foco, aqui, a discussão se haveria modos convencionais de prevenir estes eventos – ou quaisquer outros. Evidentemente sistemas mais robustos possuem maior grau de redundância, sistemas mais frágeis são mais sujeitos a falhas, é reconhecida a carência do Brasil – e de tantos outros países – em recursos para a expansão ideal. Sem nos atermos a essa discussão, nosso objetivo é outro: investigar a possível coincidência – ou não – de uma série de eventos aparentemente desconectados, mas cuja probabilidade de ocorrência simultânea poderia ser considerada, do ponto de vista estatístico, quase desprezível.

Estes resultados são fruto de um trabalho conjunto de engenheiros eletricitistas, astrônomos, geofísicos e climatologistas, que uniram esforços e enfrentaram o desafio de desenvolver uma teoria inovadora voltada para a monitoração, detecção e mitigação de falhas em sistemas de geração/transmissão baseada na análise do efeito de correntes geomagneticamente induzidas. Será mostrado que, ao contrário do intuitivo, estes eventos não ocorrem apenas em países localizados em altas latitudes (como o Canadá). O Brasil é, na verdade, um dos alvos preferenciais dos eventos geomagnéticos induzidos e muitas das falhas “inexplicáveis” ocorridas em nosso sistema podem ter sido causadas por estes fenômenos que, apesar de ainda não conhecidos no setor elétrico brasileiro, desempenham papel crucial na operação de redes elétricas.

L.M.V.G.Pinto is with Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., Rio de Janeiro, Brasil (e-mail leontina@engenho.com)

J. Szczupak is with Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., Rio de Janeiro, Brasil (e-mail jacques@engenho.com)

M.A.Drummond worked here as an independent consultant (e-mail mdrumx@uol.com.br)

L.H. Macedo is with Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., Rio de Janeiro, Brasil (e-mail luiiz@engenho.com)

II. GEOMAGNETISMO

A. Eventos Solares

O campo magnético do Sol (assim como o da Terra) não é constante: distende-se, contrai-se, evolui ao longo do tempo. As manchas solares que aparecem na superfície do Sol são os “indícios” visíveis de um fenômeno magnético de proporções espetaculares, que pode causar descargas de grande quantidade de matéria constituída de hidrogênio ionizado e hélio. As partículas são ejetadas para o espaço e podem mover-se na direção da Terra a uma velocidade de aproximadamente 450km/s, levando de poucas horas a poucos dias para chegar ao nosso planeta, causando as chamadas *tempestades solares*. A Figura 1, obtida do satélite SOHO, mostra um dos chamados “cuspes” solares: a ejeção de matéria eletricamente carregada ao espaço e suas enormes proporções em comparação ao tamanho da Terra.



Fig. 1 – Tempestades solares

B. Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs)

As cargas das partículas ionizadas em movimento formam correntes elétricas de alta altitude que se fazem acompanhar de severas alterações de campo magnético. Essas correntes iônicas de alta altitude induzem correntes-imagem na Terra, assim como nos caminhos artificiais paralelos, incluindo os sistemas telefônicos, linhas de dutos, estradas de ferro e linhas de transmissão. O fenômeno das correntes geomagneticamente induzidas (Geomagnetic Induced Currents, GICs) é bem estudado no hemisfério Norte [1], [2], [3], onde já causou, reconhecidamente, blackouts de grandes proporções. Sabe-se que as correntes são quase contínuas, com frequências bem inferiores a 1 Hz, e que afetam sistemas de comunicação, operações de satélites e sistemas elétricos de potência. Os países localizados nas chamadas “altas latitudes” (Canadá, Escandinávia, Estados Unidos) gastam bilhões de dólares [4] em monitoração e prevenção dos possíveis problemas causados por este fenômeno geomagnético. Órgãos importantes e conceituados, como o NOAA e a NASA [5], emitem boletins periódicos de riscos geomagnéticos para o setor elétrico e de comunicações.

C. Vulnerabilidade

O setor elétrico apóia-se no paradigma de que a vulnerabilidade à atividade solar é principalmente uma função da latitude geográfica. Esta idéia pré-concebida está baseada no mapeamento do próprio campo magnético terrestre que exerce uma função protetora de blindagem. A magnetosfera (região correspondente ao campo magnético terrestre) funciona como verdadeiro escudo, impedindo que sejamos afetados de forma mais significativa pelos fortes “jatos” e “bolhas” de plasma carregado que atingem rotineiramente nosso planeta – vindos ou não do Sol [6].

Esta proteção não é, entretanto, nem completa nem uniforme. Além da diferença entre a compressão/expansão que acompanham o dia e a noite, o campo é geralmente mais fraco nas regiões próximas aos polos magnéticos (que aproximam-se, mas não coincidem com os polos geográficos do planeta). De maneira geral, o campo fortalece-se à medida em que se aproxima do Equador, criando os conhecidos *cinturões de Van-Allen*. A Figura 2 ilustra a forma genérica de representação do campo magnético terrestre em corte, evidenciando os “cinturões de proteção” e seu crescimento junto ao Equador – o que significaria que países tropicais ou equatoriais, como o Brasil, seriam menos sensíveis ao fenômeno das Gics.

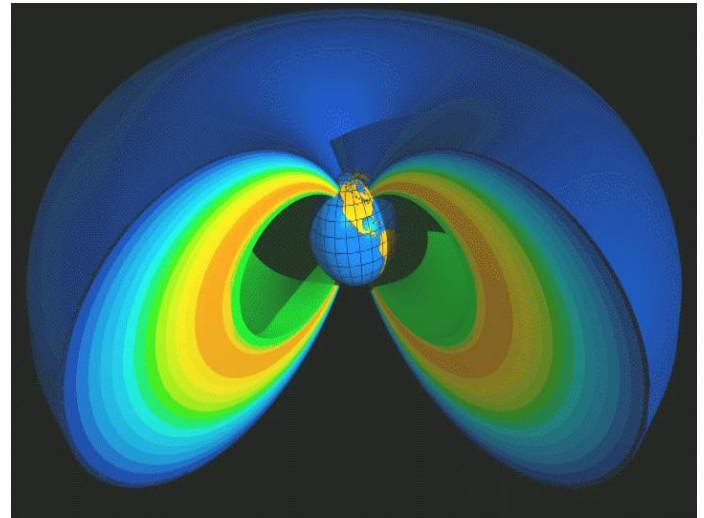


Fig. 2 – Campo Magnético em Corte

Seria intuitivo, então, imaginar que as regiões próximas aos polos são mais vulneráveis a possíveis “bombardeios” eletromagnéticos. Apenas tempestades solares de grandes intensidades atingiriam as latitudes mais baixas, enquanto que tempestades de fracas a moderadas, mais frequentes, atingem com mais facilidade as latitudes mais altas.

Este raciocínio estaria correto, não fosse a existência de uma anomalia geomagnética sobre a América do Sul [7], [8], descoberta há poucos anos e descrita a seguir, que distorce a magnetosfera e priva-nos parcialmente da proteção que acreditávamos possuir.

D. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul

Existe no Atlântico Sul uma anomalia no campo magnético da Terra (South Atlantic Geomagnetic Anomaly, SAGA) que afeta os Cinturões de Van Allen, fazendo com que se aproximem mais da Terra nessa região. A consequência é que, para uma dada altitude, a intensidade da radiação nessa região intensifica-se. Deixando de lado o rigor técnico, poderíamos dizer que, na região da Anomalia, o cinturão “aproxima-se” da Terra, reduzindo-se a espessura da camada de proteção.

Este fenômeno pode ser melhor examinado no desenho em corte da magnetosfera, ilustrado na Figura 3 [9]. Pode-se ver que a “espessura” do “isolamento” proporcionado pelo cinturão de Van Allen é significativamente menor na região da anomalia, tornando “mais fácil” a penetração das partículas carregadas.

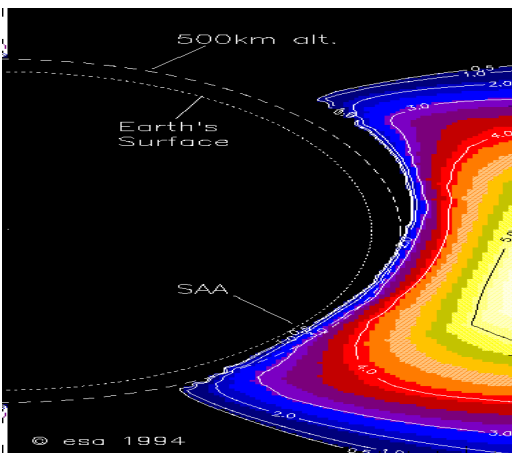


Fig. 3 – Corte detalhado da Anomalia

Essa região, assim como os polos, está mais exposta às variações do campo magnético provocadas pelo Sol. O resultado é um ambiente favorável ao surgimento de correntes geomagneticamente induzidas nos sistemas físicos artificiais, como redes de transmissão de energia elétrica, dutos metálicos ou redes ferroviárias.

A Figura 4 mostra a extensão da Anomalia do Atlântico Sul, mapeada pelo satélite Roentgen [8], a aproximadamente 500 km de altitude, através do monitoramento de partículas carregadas.

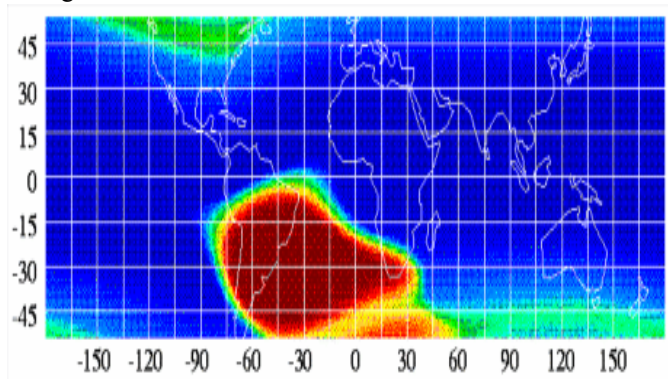


Fig.4 – Mapeamento Geográfico da Anomalia do Atlântico Sul

A anomalia abrange a região situada entre -90° a $+40^\circ$ de longitude e -50° até a linha do Equador. Pode-se concluir, portanto, que quase todo o território brasileiro e uma grande parte da América do Sul encontram-se sob influência da Anomalia e sujeitos, assim, à ocorrência de Correntes Geomagneticamente Induzidas.

Mais interessante é notar que a Anomalia Magnética é forte e permanente. Seus efeitos não se prendem, como talvez se possa intuir, a fortes tempestades solares, que ocorrem eventualmente. Estudos recentes [10] analisaram 100 ocorrências na operação brasileira sorteadas ao acaso nos últimos três anos e detetaram a existência do fenômeno geomagnético em pelo menos 96% dos casos. Esta forte ligação é coerente com os relatórios da NASA, que, face a um campo geomagnético tão anômalo, decidiu desviar a rota de satélites, que costumavam ser danificados quando passavam sobre a região.

III. GICS E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Pode-se dizer, grosseiramente, que as Correntes Geomagneticamente Induzidas “espelham” as correntes elétricas ionosféricas associadas à variação nos campos geomagnéticos causada pelas partículas energizadas que penetram na atmosfera. Devido às características de propagação do fenômeno (leste/oeste e vice versa, dependendo da hora do dia/noite) e de sua abrangência (podem “varrer” boa parte do globo), estão mais sujeitas a GICs as linhas longas, “horizontais” (que “correm” no sentido da latitude) e situadas sobre rochas ígneas (originárias do manto da Terra, ricas em materiais magnéticos).

Como anteriormente mencionado, os efeitos das Correntes Geomagneticamente Induzidas são razoavelmente conhecidos e modelados. Já existe uma bibliografia sólida disponível, e o leitor interessado em maiores detalhes poderá consultar as referências [1]-[5]. Em princípio, as GICs podem ser aproximadas por um pulso de corrente “quase contínua” que “penetra” pela rede através do solo (aterramentos, por exemplo). Citaremos aqui apenas alguns dos efeitos mais conhecidos e já amplamente modelados, livremente traduzidos das referências citadas. É importante notar, entretanto, que esta lista não é, nem poderia ser, exaustiva, já que esta área de investigação encontra-se ainda em aberto, e muito há ainda que estudar e aprender.

A. Transformadores de Potência

Um dos efeitos mais dramáticos produzidos pela presença de GICs é a excitação DC nos transformadores, resultando em saturação do núcleo. Esta pode levar à produção de correntes harmônicas, distorcendo tensões e provocando a atuação dos relés de proteção. A saturação pode ainda provocar o aquecimento localizado do núcleo e dos enrolamentos, danificando, em maior ou menor grau, os isolamentos. O calor localizado pode produzir incêndios ou explosões espontâneas, assim como perfurações ou degradações no isolamento.

B. Colapso de Tensão

Transformadores saturados consomem reativos e causam quedas de tensão, podendo mesmo causar um colapso no sistema.

C. Transformadores de Corrente e de Potencial

Sofrem os mesmos efeitos, resultando em atuações erráticas de relés de proteção – que são sensíveis a harmônicos, e podem responder a correntes até mesmo com valor igual à metade do valor de projeto.

D. Bancos de Capacitores Shunt

Bancos de capacitores shunt tenderão à sobrecarga por oferecerem baixa impedância às corrente harmônicas.

E. Sistemas HVDC e Compensadores Estáticos VAR

Em princípio, um acréscimo de corrente contínua pouco afeta sistemas que operam também em corrente contínua, a não ser que a operação se realize próximo aos limites permitidos. Neste caso, é possível a ocorrência de falhas de comutação. Como estes sistemas requerem uma tensão alternada para a comutação, a distorção harmônica pode ser severa e levar à falha. Bancos de filtros, incluindo bancos de capacitores, associados a estes sistemas tenderão à sobrecarga devido às correntes harmônicas.

F. Geradores

Reguladores Automáticos de Tensão requerem sinais de tensão representativos para o controle da corrente DC. Um sinal distorcido para o regulador pode resultar em falhas no controle, possivelmente resultando em um nível de excitação cíclica no gerador, levando a variações anormais das potências ativa e reativa geradas.

Pode ainda ocorrer sobreaquecimento, devido a desbalanços de correntes nas fases e distorções harmônicas nas tensões resultantes dos transformadores. O aumento de correntes harmônicas no rotor pode excitar a vibração mecânica da turbina.

G. Linhas de Transmissão

A introdução de harmônicos nas linhas de transmissão pode alterar o nível máximo regulado para a tensão da fundamental pela ocorrência de picos, tanto positivos como negativos. Eventualmente, pode levar à violação de limites pré-estabelecidos (isolamento, qualidade de energia) e à eventual atuação da proteção ou dano direto a equipamentos (como, por exemplo, no caso de ruptura de isolamentos, envelhecimento precoce de máquinas, etc.).

H. Falhas “Mecânicas”

A falha na atuação de controles pode induzir ao falso diagnóstico de “falhas mecânicas” – por exemplo, falhas em bombas dos geradores, atuação indevida (ou não atuação) de disjuntores, seccionadores, etc.

I. Sistemas Interligados

A tendência de ampliação de falhas em sistemas interligados é forte e conhecida. Por exemplo, a saturação de um transformador pode levar a um consumo exageradamente alto de reativos e injetar harmônicos no sistema. Estas correntes harmônicas podem sobrecarregar bancos de capacitores, levado-os ao desligamento, à perda de geradores e ao mau funcionamento dos compensadores estáticos. Situações mais graves poderiam induzir colapsos de tensão. Atuações equivocadas da proteção completam o quadro de insegurança da rede.

J. Sistemas mais propensos a falhas por GICs

Do exposto acima, pode-se deduzir 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 necessários para que a atuação de Correntes Geomagneticamente Induzidas, possa gerar danos de proporções significativas.

IV. CASO EXEMPLO

Nosso estudo, descrito mais detalhadamente em [10], abrangeu inicialmente um conjunto de casos exemplo escolhidos ao acaso a partir do histórico de operações brasileiras. Os resultados foram impressionantes: em um conjunto aleatório de cem falhas, noventa e seis foram associadas a anomalias magnéticas. Encontramos ainda uma forte recorrência em pontos “críticos” – em outras palavras, é possível mapear a tendência de ocorrência mais frequente de falhas em regiões mais sujeitas a GICs.

Na impossibilidade de relacionar aqui todos os eventos que catalogamos, focalizaremos a nossa atenção sobre o mês de dezembro de 2000, associado às ocorrências descritas na introdução.

A. O evento principal

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 decide 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.

B. A Evidência Geomagnética

Não havia qualquer sinal de tempestade solar no momento da falha. Ao contrário, a atividade solar era quase que nula. A última tempestade solar havia ocorrido na noite de 28/29 de novembro e não há registros de que tenha causado consequências relevantes nos países de altas latitudes.

A Fig. 7 apresenta a evolução do campo magnético medido pelo Observatório de Vassouras. É possível notar a variação negativa de campo resultante da tempestade solar e a posterior variação positiva associada à anomalia do dia 13 de dezembro.

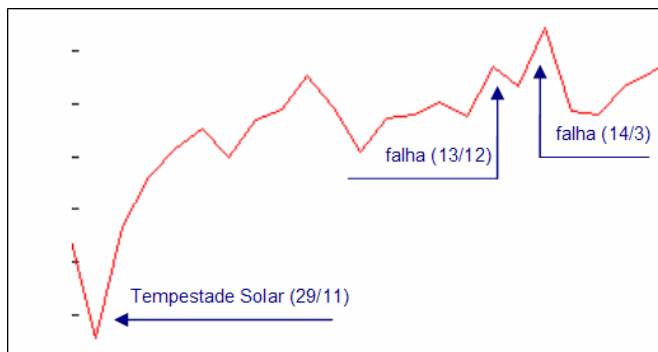


Fig. 7 – Campo magnético – Vassouras (RJ)

Pode-se ver que não existe um único “pico” magnético correspondente à ocorrência da falha. Na realidade, o país foi palco, durante quase todo o mês de dezembro, para um “show” de perturbações elétricas simultâneas, não explicadas por teorias “convencionais”, principalmente nos dias de picos magnéticos positivos e nas regiões mais sujeitas a GICs. O caso-estudo, analisando detalhadamente o fenômeno dinâmico e suas consequências ao longo de todo o período (28/11 a 14/12), é detalhado na referência [11], que mostra uma aderência completa entre o fenômeno geomagnético e a seqüência de perturbações que “varreu” o Brasil durante esta quinzena. Dadas as limitações de espaço deste artigo, focalizaremos apenas as falhas que geraram blecautes na região Sudeste e multas às empresas: do dia 12 ao 14 de dezembro de 2000.

A Figura 7 detalha uma das maiores variações de campo magnético ocorrida no Rio de Janeiro, no ano de 2000 – neste período, o campo passou de um vale significativo a um de seus maiores picos positivos. Nota-se já no dia 12/12, uma forte ascensão do campo magnético. Este é o indicador mais significativo da possibilidade de problemas, já que a corrente elétrica é consequência da variação do fluxo, e não exatamente de seu valor nominal. As oscilações diurnas e noturnas (que “esculpem” os picos e vales no período 12/14) são especialmente fortes, e criam o ambiente propício às perturbações seguintes.

A análise completa-se com dados mais globais, referentes a todo o país. Utilizamos um conjunto de medidas obtidas diretamente por satélite que, combinadas, evidenciam a anomalia magnética.

Por exemplo, um modelo de filtragem digital especialmente desenvolvido para esta finalidade [12] é capaz de tratar os dados de Ondas longas, curtas, Total de Elétrons, etc., de modo a identificar as regiões sob anomalia magnética significativa (capaz de causar perturbações em redes).

A Figura 8 apresenta uma foto de satélite da época, sobre a qual foram superpostas as anomalias magnéticas (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 [11] mostra a total coincidência entre as anomalias e os eventos oficialmente registrados no período.

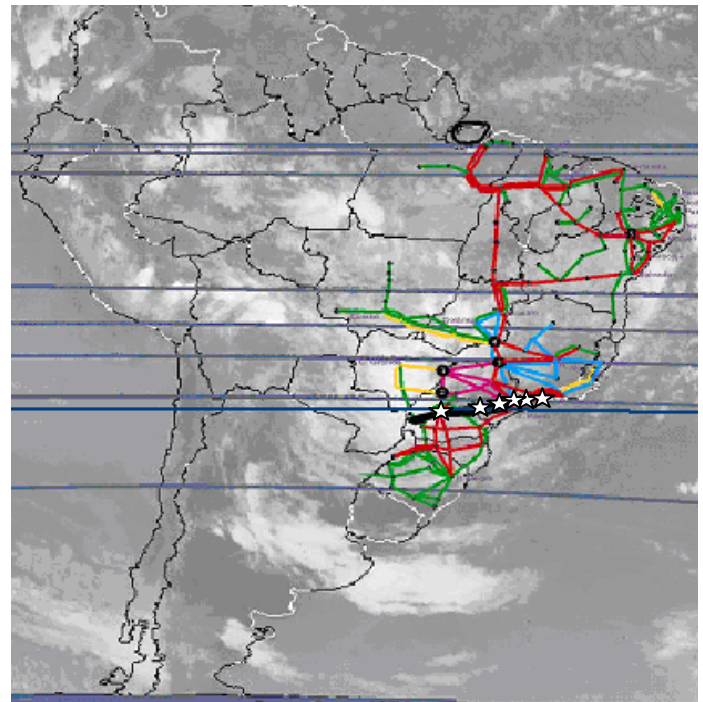


Fig. 8 – Anomalias Magnéticas sobre o Brasil – 13/12/2000

V. MODELOS DE PREVISÃO

É importante ressaltar o retardo entre o aparecimento da anomalia magnética e a ocorrência da perturbação elétrica. Na grande maioria dos casos, é possível detetar a causa (o fenômeno geomagnético e sua localização) um ou dois dias antes da consequência (a perturbação elétrica). Este fato estimula ainda mais a pesquisa na área, e o desenvolvimento de modelos não só de previsão (capazes de detetar a possibilidade de eventos críticos), mas também de prevenção (despachos seguros, reprogramação da manutenção, esquemas de ilhamento preventivo, etc.).

VI. ASPECTOS LEGAIS

A correta compreensão e modelagem do fenômeno geomagnético tem diversas implicações, incluindo os aspectos legais associados às perturbações e suas conseqüências. O fenômeno geomagnético é eventual, fortuito, e pode ser comparado aos eventos climáticos extremos – que estão evidentemente fora do controle das empresas e podem mesmo eximi-las de responsabilidades legais. Este tema é multidisciplinar e será tratado em trabalho futuro.

VII. CONCLUSÕES

Este artigo discute a ocorrência de Correntes Geomagneticamente Induzidas (GICs) na América do Sul e suas conseqüências. Mostra que, ao contrário do que nos era ensinado, grande parte do território brasileiro, assim como da América do Sul está sob a influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, e as perturbações causadas pelas GICs podem ser vistas como uma realidade concreta. Black-outs e equipamentos danificados sem explicação aparente, assim como a ocorrência simultânea e improvável de diversas perturbações que se julgavam independentes, podem ter sua causa primária no trabalho do campo geomagnético.

A atual disponibilidade de dados de satélites, aliados a medições em Terra, permite a utilização de técnicas de processamento de sinais na predição (e conseqüente prevenção) de perturbações originadas por GICs – que podem inclusive surgir não apenas *durante* mas também *após* as tempestades, como parte de um fenômeno de variação do campo terrestre conseqüente da variação geomagnética solar.

A comprovação dessas suspeitas pode ter implicações regulatórias e legais significativas no que se refere à responsabilidade das concessionárias em eventos que, na verdade, deveriam ser classificadas como “eventos de força maior”, já que são derivados de um fenômeno natural, fora do controle das empresas.

As investigações sobre a ocorrência de GICs na América do Sul devem portanto ser objeto de preocupação por parte dos administradores de sistemas elétricos e ter seu aprofundamento estimulado. O fenômeno é ainda pouco conhecido, mas pode se constituir em verdadeira ameaça à segurança e à integridade do sistema.

VIII – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao climatologista Tércio Ambrizzi e ao geofísico Eder C. Molina, da USP, o incentivo e a colaboração ao longo deste trabalho. Agradecemos ainda o valioso auxílio do Prof. Luiz Muniz Barreto, do Observatório Nacional (Brasil), fundamental para o entendimento dos conceitos aqui descritos, e ao técnico Ronaldo Marins, que nos forneceu os dados utilizados no estudo.

IX – REFERÊNCIAS

- [1] MOORE, Samuel K.; “Extreme Solar Storm Strikes Earth”, IEEE Spectrum, December 2003.
- [2] MOLINSKI, Tom S.; FEERO, William E.; DAMSKY, Ben L.; “Shielding Grids from Solar Storms”, IEEE Spectrum, November 2000, [pp 55-60].
- [3] 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
- [4] EPRI Report TR-104167, “Sunburst GIC Network”, disponível on-line
- [5] <http://www.sec.noaa.gov/ElecPower/index.html>
- [6] RUSSELLI, C. T.; LUHMANN, J. G.; EARTH: MAGNETIC FIELD AND MAGNETOSPHERE Originally published in: *Encyclopedia of Planetary Sciences*, edited by J. H. Shirley and R. W. Fainbridge, 208-211, Chapman and Hall, New York, 1997.
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly
- [8] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/gallery/display/saa.html>
- [9] <http://www.estec.esa.nl/conferences/96a09/Abstracts/abstract45/uosat.html>
- [10] PINTO, L., MACEDO, L.H., DRUMMOND, M.A., SZCZUPAK, J.S., Possibilidades da influência de Fenômenos Geomagnéticos nas Perturbações Elétricas Ocorridas no SIN, Ano 2000, Relatório ENGENHO, 2004
- [11] PINTO, L., MACEDO, L.H., SZCZUPAK, J., Análise de Perturbações Elétricas e possível conexão com fenômenos Geomagnéticos, Relatório ENGENHO, 2004
- [12] SZCZUPAK, J., MACEDO, L.H., Aplicação de Técnicas de Processamento de Sinais à Detecção de GICs, relatório ENGENHO, 2004

Leontina M. V. G. Pinto é Engenheira Eletricista, graduada em 1979 pela UFRJ, Mestre em Sistemas de Computação pela COPPE/UFRJ (1981) e Doutora em Matemática pelo Instituto de Matemática – UFRJ (1986). Sua experiência profissional abrangeu a atividade docente (COPPE/UFRJ e PUC-RIO), a pesquisa (CEPEL) e a Consultoria. Atualmente, a Dra. Pinto dedica-se à sua empresa Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., onde é diretora-executiva desde 1990. Seus interesses atuais englobam a análise da segurança de redes elétricas (GICs), o geomagnetismo, a climatologia, além do uso de técnicas econômicas para a gestão de mercados de energia.

Jacques Szczupak (Fellow, IEEE) graduou-se engenheiro (1964) e Mestre em Ciências (1967) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, e Ph.D., (1975) pela Universidade da Califórnia. Atuou na COPPE-UFRJ e foi o líder do Grupo de Processamento de Sinais do CEPEL. Leciona atualmente como Professor Titular da PUC-Rio e é Diretor Técnico da Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Jacques participou em diversos comitês e grupos de trabalho técnicos brasileiros e internacionais, e foi editor de várias revistas especializadas. Suas áreas de interesse incluem Instrumentação, Processamento de Sinais, Energia, Qualidade e Simulação.

Márcio Drummond é Engenheiro Eletricista, graduado em 1977 pela PUC-Rio e Mestre em Sistemas de Potência pela mesma universidade em 1982. Trabalhou mais de 20 anos no CEPEL em projetos e pesquisas de transmissão de energia, tecnologia de linhas e equipamentos elétricos e simulação de transitórios eletromagnéticos.

Luiz Henrique Guimarães de Macedo é Engenheiro Eletricista, graduado em 2000 pela Universidade Federal de Goiás e Mestre em Eletromagnetismo Aplicado pela PUC-Rio. Cursa atualmente o doutoramento na mesma instituição. Seus interesses atuais englobam a climatologia, o geomagnetismo e o processamento de sinais.