



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DE FADAS COM A REDE COLABORATIVA LEONA

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC / INPE – CNPq / MCTC)
PERÍODO: 01/08/2018 – 20/07/2019**

PROCESSO N° 129142/2018-2

Godson Lucas Souza da Penha
(INPE, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq / MCTC)
E-mail: tecnico-lucas@live.com

Dr^a Eliah F. M. T. São Sabbas
(Orientadora – DAE/CEA/INPE – MCTC)
E-mail: eliahfersaosabbas@gmail.com

Dr. Carlos H. C. Villalobos
(Co-Orientador – DAE/CEA/INPE)
Email: carlos.coronado@inpe.br

INPE
São José dos Campos
2019

1. Introdução e Resumo do Plano de Trabalho Inicial

O presente projeto tem como objetivo ganhar uma compreensão ampla sobre os ‘Efeitos da Atividade Elétrica de Sistemas Convectivos – FADAS’, que comportam os Eventos Luminosos Transientes – ELTs, e as Emissões de Alta Energia de Tempestades – ALETs. Para tal, os estudos de FADAS estão sendo feitos no contexto da rede colaborativa ‘Transient Luminous Event and Thunderstorm High Energy Emission Collaborative Network in Latin America – LEONA’, que se propõe à observação e pesquisa de FADAS.

As FADAS são um conjunto de dois tipos de fenômenos: (1) Os Eventos Luminosos Transientes – ELTs, que são plasmas de baixa energia na média e alta atmosfera do planeta, que ocorrem acima dos sistemas convectivos de tempestades; (2) As Emissões de Alta Energia de Tempestades – ALETs, que são emissões de raios gama, raios X, elétrons, pósitrons e nêutrons. Ambos os tipos são causados por campos eletromagnéticos dos relâmpagos originados nas tempestades.

O plano de trabalho inicial deste projeto previa a execução das seguintes atividades: (1) Revisão bibliográfica dos ELTs e das ALETs; (2) Coleta de dados de ELTs a partir de observações periódicas com as estações LEONA; (3) Análise de dados da rede; (4) Observações de ELTs ao longo da execução do projeto LEONA de modo a aprender sobre o funcionamento dos equipamentos utilizados e como operá-los, (5) Possível complementação da análise com dados históricos do grupo coletados em campanhas anteriores.

2. Resumo das Atividades Realizadas

Durante a revisão bibliográfica foram estudados artigos científicos, dissertações de mestrados e manuais. As sessões seguintes são um breve resumo do conhecimento adquirido durante a revisão bibliográfica na qual foram estudados os ELTs, a quebra da rigidez dielétrica da atmosfera e o Detector de Nêutrons da LEONA.

Complementando a revisão bibliográfica, foram realizadas duas apresentações sobre ELTs e sistemas de detecção de nêutrons, além de reuniões semanais com a orientadora e o co-orientador para auxiliar e consolidar os conceitos em questão.

Em decorrência do tema Sistema de Detecção de Nêutrons, que foi acrescentado à pesquisa como uma alteração do projeto original. Com isso iniciei minha participação na parceria da LEONA com o Instituto de Estudos Avançados- (IEAv) cujo objetivo é a construção de um sistema de detecção de nêutrons. Assim pude me familiarizar com os métodos de detecção empregados nos laboratórios da instituição. Através de visitas periódicas sob a orientação de colaboradores da pesquisa no IEAv, foi possível conhecer os laboratórios, equipamentos e procedimentos, como por exemplo: alguns tipos de detectores de nêutrons, um acelerador linear de elétrons e o laboratório de Dosimetria. Nessas visitas aprendi sobre o funcionamento do acelerador de elétrons e dos detectores de nêutrons usados no instituto. No laboratório de Dosimetria foram realizados procedimentos de medição de radiação em um manequim de testes.

Além das atividades mencionadas anteriormente estou analisando os dados de ELTs obtidos pela rede LEONA durante uma campanha internacional, parte do projeto RELAMPAGO, realizada na Argentina em nov.-dez. de 2018.

Nas sessões seguintes serão apresentados em detalhe os progressos realizados mostrando os resultados parciais até então obtidos.

3. Breve Revisão Sobre Eventos Luminosos Transientes – ELTs

São chamados de Eventos Luminosos Transientes os fenômenos de curta duração e baixa emissão de luz que ocorrem entre a média e a alta atmosfera associados a tempestades elétricas na troposfera. Tais eventos evidenciam o acoplamento eletrodinâmico entre as camadas da atmosfera e a Quebra da Rigidez Dielétrica (QRD) à grandes altitudes antes prevista pelo ganhador do prêmio Nobel C. T. R. Wilson, em 1925 [da Silva, 2011]. Os ELTs são consequência dos campos elétricos na média e alta atmosfera, região de fronteira Terra-Espaço, oriundos de perturbações elétricas na troposfera causadas por relâmpagos, que extinguem carga elétrica no interior de nuvens de tempestades.

As primeiras imagens de ELTs foram coletadas por acaso durante uma observação astronômica no estado de Minnesota, EUA, em 1989 [Franz *et al.*, 1990]. Desde então muitas pesquisas foram disparadas com o objetivo de caracterizar e explicar os fenômenos recém-descobertos. Assim foram encontradas outras formas de ELTs e eles podem ser divididos em alguns tipos principais que conhecemos atualmente: Sprites, Halos, ELVES, Jatos. Alguns exemplos de manifestações de ELTs são mostrados na Figura 1.

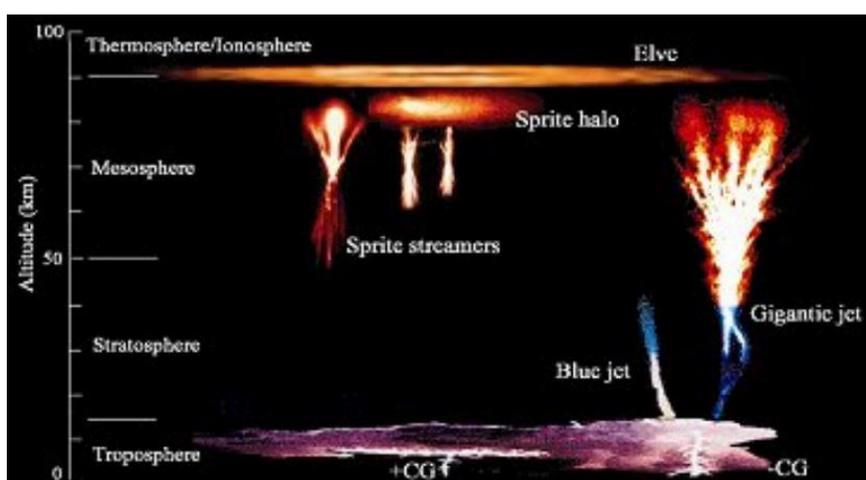


Figura 1 – Exemplos de ELTs

Fonte: Grupo científico da missão *Tool for the Analysis of Radiations from lightnings and Sprites* – TARANIS.

3.1. Sprites

No quinto dia de julho de 1989, uma breve emissão luminosa na atmosfera era registrada por uma câmera em busca de eventos no espaço. Os equipamentos pertenciam à R. C. Franz e seus colaboradores, registravam trinta quadros por segundo e tinham capacidade de registrar fenômenos de baixa luminosidade [Franz *et al.*, 1990].

Descobria-se um Sprite, dos ELTs, o mais facilmente observável. Sua intensidade luminosa é de aproximadamente 1,5 MR por evento [Kuo *et al.*, 2008]. Seu nome foi dado durante a campanha Sprites94 e escolhido de maneira que não deixasse margem a interpretações erradas sobre o evento. Sprite significa Duende em inglês e foi inspirado na peça *A Tempestade* de William Shakespeare [São Sabbas, 1999]. Os Sprites são o tipo de ELTs mais registrados e com maior quantidade de dados encontrados em

bibliografias. Observações mostram que há 85% de ocorrência de Sprites cerca de 1-30 ms após um relâmpago nuvem-solo positivo [Bocippio *et al.*, 1995].

A estrutura morfológica de um Sprite clássico está representada na Figura 2 e foi proposta por Sentman *et al.* [1995]. Eles alcançam a base da ionosfera, localizada em cerca de 90 km de altitude, e se estendem por toda a mesosfera. Sua estrutura pode ser dividida em três regiões principais:

“**Hair**” (cabelo), região superior e de luminosidade difusa alcançando a base da ionosfera em 90 km de altitude;

“**Head**” (cabeça), região de maior luminosidade localizada em torno de aproximadamente 75 km de altitude;

“**Tendrils**” (tentáculos), região inferior estruturada em filamentos que se estendem da cabeça para baixo enquanto sua cor muda gradualmente do vermelho para o azul nas pontas.

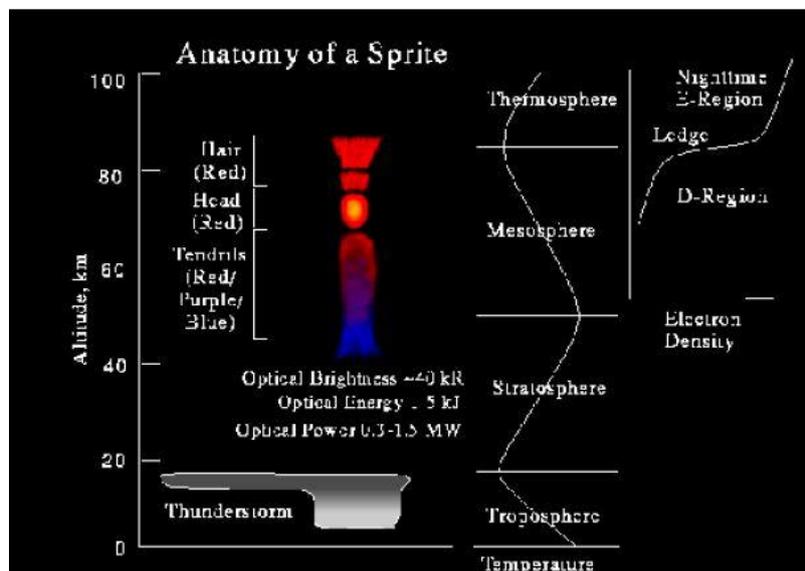


Figura 2 - Estrutura morfológica de um sprite

Fonte: <http://www.gi.alaska.edu/heavner/rs/redsprites.html>.

3.2. Halos

Os halos são produzidos pelos mesmos mecanismos que os Sprites, campos quase-eletoestáticos gerados por relâmpagos nuvem-solo, sua formação é descrita pelo modelo de Pasko *et al.*[1997]. Os halos ocorrem na mesma altitude do topo dos Sprites ou acima, apresentando uma luminosidade difusa [Wescott *et al.*, 2001]. Sua forma é discoide com diâmetro de 50 a 70 km e duração de 2 a 10 ms [Moudry *et al.*, 2003]. Também são chamados de sprite-halo porque podem preceder um sprite ou surgir sozinhos, em função do mecanismo de geração semelhante [da Silva, 2011]. Devido à forte variação do tempo de relaxação do campo quase-eletoestático com a altitude, sprites e halos podem ocorrer independentemente [Barrington-Leigh *et al.*, 2001]. Na Figura 1, o halo é representado como sprite-halo e na terceira imagem da figura 3 pode ser visto o surgimento de um halo.

3.3. Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic pulse Source - ELVES

Diferente de halos e sprites, que são produzidos por mecanismos associados ao campo quase-eletróestático gerados por relâmpagos, o mecanismo de geração dos elves está associado ao pulso eletromagnético gerado pela descarga de retorno do relâmpago [Taranenko et al., 1993^a, 1993b]. Por isso, o significado do seu nome é: “Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic pulse Source (Emissões de Luz e Perturbações de Frequência Muito Baixa de Fontes de Radiação Eletromagnética)” [Fukunishi et al., 1997]. Os ELVES têm forma de anel em expansão e ocorrem na base da ionosfera, em cerca de 90 km de altitude. Sua duração é em torno de 0,5 a 5 ms [Fukunishi et al., 1996; Inan et al., 1996, 1997; Inan, 2002].



Figura 3 – Imagens em sequência espaçadas em 1 ms. Pode-se ver a atmosfera de fundo na primeira imagem, um ELVES na segunda e um halo na terceira.

Fonte – Moudry et al. [2003].

3.4. Jatos

Foi durante a campanha *Sprites94*, que deu nome aos sprites, que os jatos azuis foram descobertos [Wescott et al., 1995]. Tratam-se de jatos que partem do topo da nuvem em direção a ionosfera com coloração azulada, sua altitude terminal está entre 40 e 50 km e velocidade de propagação maior que 10^5 m/s [Wescott et al., 1995]. Posteriormente, durante as análises dos dados, Wescott et al. [1995] descobriram os percussores azuis, parecidos com os jatos porém com altitude terminal inferior, cerca de 20 km [Wescott et al., 1996].

Além disso, mais tarde foram descobertos os jatos gigantes, que alcançam até 70 -90 km de altitude [Pasko et al., 2002; Su et al., 2003]. É possível que a baixa condutividade noturna em latitudes tropicais faça dos jatos gigantes fenômenos desta região, uma vez que isso permitiria ao campo quase-eletróestático da nuvem atingir maiores altitudes [Pasko et al., 2002].

As primeiras modelagens do mecanismo de geração de jatos azuis os descrevem como streamers positivos [Pasko et al., 1996a] ou negativos [Sukhorukov et al., 1996] gerados por campos quase-eletróestáticos. Streamers são canais de plasma quase-neutro, fracamente ionizado e à temperatura ambiente [da Silva, 2011]. Pasko et al. [1996a] propôs que os streamers positivos podem ser gerados pelo crescimento rápido de carga no topo da nuvem, sem associação com relâmpagos, o que está de acordo com as evidências observacionais de jatos azuis e precipitação de granizo [Wescott et al., 1995, 1996].

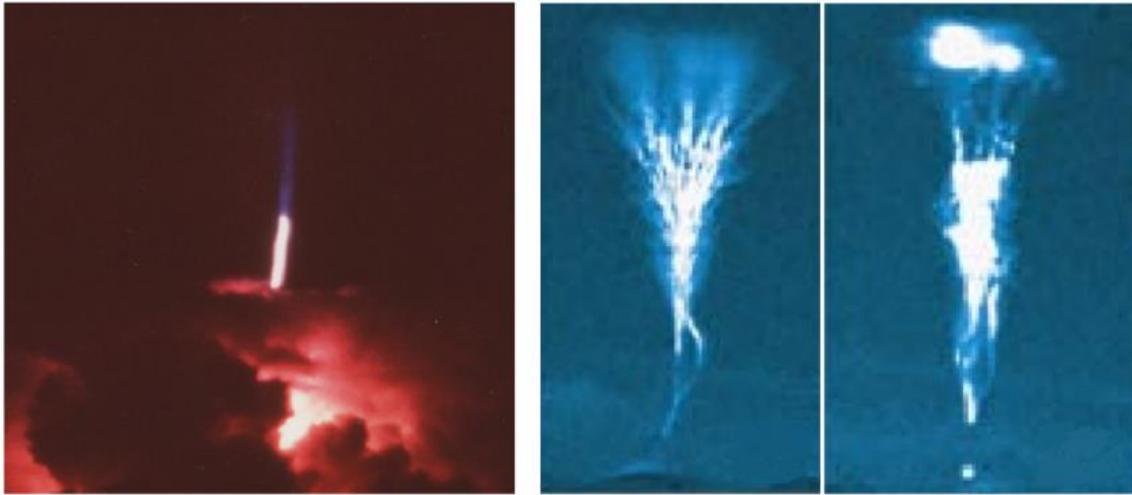


Figura 4 – Jato azul na imagem da esquerda e dois jatos gigantes na imagem da direita.
 Fonte: Esquerda: *Lyons et al.*, [2003]. Direita: *Su et al.*, [2003].

4. Teoria da Quebra da Rigidez Dielétrica (QRD) do ar

A QRD é o processo de induzir uma corrente elétrica em um material não condutor através da aplicação de um campo elétrico suficientemente intenso [Raizer, 1997]. O movimento de elétrons em um gás sob ação de um campo elétrico ocorrerá em função da mobilidade eletrônica do gás e da intensidade do campo. A mobilidade eletrônica é a função de proporcionalidade entre a velocidade de deriva e o campo elétrico [Bittencourt, 2004]. O movimento de elétrons causado por ação da força elétrica é conhecido como processo de advecção e leva a avalanche eletrônica. Neste processo um elétron livre em movimento sob ação do campo elétrico se choca contra uma molécula neutra desprendendo outros elétrons. Cada novo elétron livre é acelerado e se choca com outras moléculas desprendendo mais elétrons. Avalanche eletrônica é o elemento primário de qualquer descarga elétrica [da Silva, 2011]. Este processo leva a mais importante forma de ionização de um gás, ionização colisional por impacto de elétrons [Raizer, 1997, Cap. 4]. A multiplicação de elétrons via avalanches eletrônicas é o mecanismo mais elementar para explicar a quebra da rigidez dielétrica e é chamado de mecanismo de Townsend.

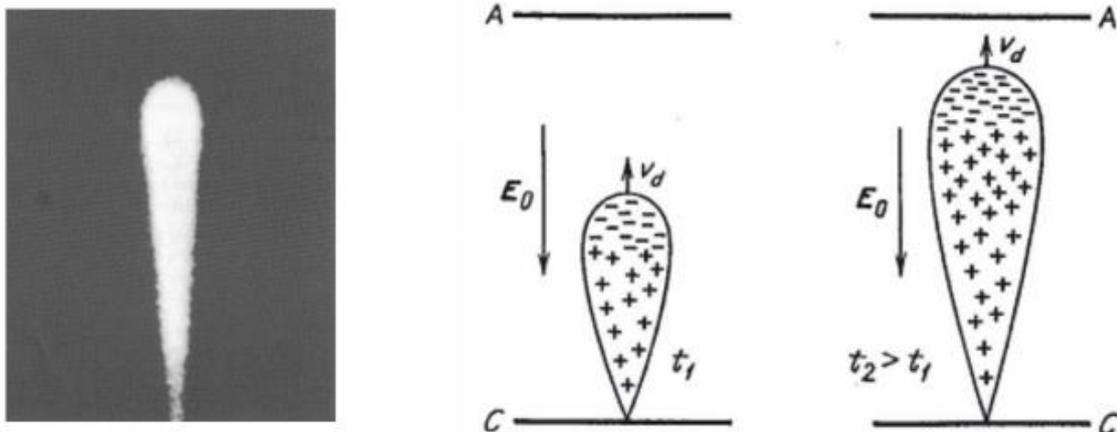


Figura 5 – Esquerda: foto de uma avalanche eletrônica. Direita: representação esquemática de uma avalanche eletrônica em dois instantes de tempo.

Fonte: Esquerda: *Cooray* [2003], p. 69. Direita: *Raizer* [1997], p. 330.

5. Sistema de Detecção de Nêutrons

O sistema de detecção de nêutrons utilizado nesta pesquisa é constituído por dois detectores, uma interface e um computador no qual é instalado um programa especial. Os detectores transformam em um sinal o impulso anódico que recebem ao detectar o nêutron. Posteriormente, enviam à interface que os integra e repassa ao computador onde serão tratados pelo software. Este sistema pode ser visto representado em um diagrama de blocos na Figura 6.

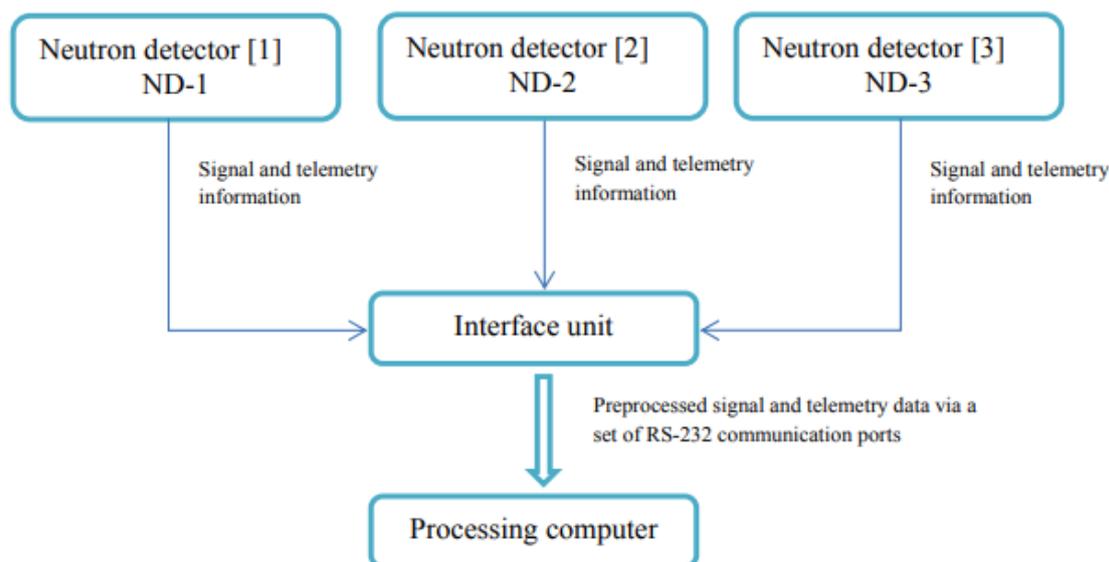


Figura 6 – Diagrama de blocos do instrumento.

Fonte - Neutron Detector user manual, *M. Filippov et al.*, [2015].

O detector contém nove contadores SNM-18 dispostos horizontalmente entre duas camadas de polietileno. O contador é preenchido com gás Hélio-3 sob pressão de 4 atm. Nêutrons velozes são reduzidos a velocidades térmicas (energia de aproximadamente 0,025eV) ao atravessar o polietileno. A altura total do polietileno é de 125 mm [Filippov et al., 2015].

Além dos contadores e as camadas de polietileno, existem no detector de nêutrons as placas de potência e amplificadora. O impulso anódico do contador é amplificado pelos amplificadores com um ganho de 11 e normalizado em amplitude no comparador. O impulso anódico exponencial negativo do contador é convertido em sinal retangular com amplitude de 4V e duração proporcional à amplitude do impulso anódico. Os impulsos dos nove comparadores são combinados em “OR” e emitidos para a interface através de um conector coaxial atrás do detector de nêutrons [Filippov et al., 2015].

A unidade de interface RS232 fornece três canais com seus respectivos grupos de conectores para serem ligados cada um dos detectores de nêutrons. Estes canais sincronizados têm tempo de integração de 1 ms, cada canal tem um modo de teste com tempo de integração de 1 min. O total de detecção de cada canal é transmitido pela interface RS232 para o computador em forma de dois bytes. São transmitidos apenas quando o resultado da detecção é diferente de zero. Os dados de telemetria são transmitidos pelo detector a cada 5 segundos e transmitidos para o computador através

da interface RS232. Cada canal da interface transmite os dados para o computador através de duas portas COM. Ao chegar ao computador esses dados são tratados por um programa especial [Filippov *et al.*, 2015].

Os dados resultantes de cada canal consistem em duas partes: telemetria e dados do contador, eles são armazenados em arquivos de texto separados e um novo arquivo é criado a cada dia. O nome do arquivo é composto pela data de criação seguida pelo nome do canal a que pertence e quando contém dados de telemetria termina em “tm”. Exemplo de arquivos de texto do canal 1 para o dia 21/01/2014:

- 2014-01-21-ch1.txt – Contém informação do contador para o canal 1
- 2014-01-21-ch1-tm.txt - Contém informação de telemetria para o canal 1

Segue o exemplo para o conteúdo dos arquivos com contagem de nêutrons:

Start time: 2014-12-28 00:00:00.685

0.000 0 1

0.704 0 1

1.664 0 1

Primeiro se tem a informação do momento em que o programa começa a receber dados. Cada linha dos dados contém informações sobre o número de nêutrons registrados e o tempo decorrido em segundos da hora de início, com precisão de milissegundos. Os dois campos seguintes são os bytes do contador, usados para calcular o número total de nêutros detectados através da seguinte formula:

Quantidade de nêutrons = $256 * [\text{alta parte}] + [\text{baixa parte}]$

Por exemplo: 0.704 0 1

A conta a ser realizada é $256 * 0 + 1 = 1$, ou seja, 1 neutron foi detectado desde 0.704 segundos após o início do experimento dentro de um intervalo de tempo de 1 ms.

Segue abaixo um exemplo do conteúdo dos arquivos para os dados de telemetria:

Start time: 2014-12-28 00:00:00.685

2.892 31.00 93.43 4.98 -4.91 1572.15

7.901 31.00 93.43 4.98 -4.91 1572.15

12.906 31.00 93.43 4.98 -4.91 1572.15

Primeiro é descrita a hora local em que o programa começa a receber dados. As linhas seguintes descrevem informações sobre o deslocamento do tempo de entrada de dados, temperatura externa, pressão atmosférica e tensão de alimentação (+ 5V / - 5V, tensão de alimentação do contador)

Exemplo:

2.892 31.00 93.43 4.98 -4.91 1572.15,

Onde,

- 2.892 – momento de entrada dos dados em segundos
- 31.00 – temperatura ambiente
- 93.43 – pressão atmosférica
- 4.98 – tensão de alimentação(+5V)
- -4.91 – tensão de alimentação(-5V)
- 1572.15 – tensão de alimentação do contador (Alta voltagem)

6. Análise inicial dos dados da LEONA na Argentina

Decorreu-se entre novembro e dezembro de 2018 na Argentina, uma campanha internacional de observação de FADAS como parte do projeto RELAMPAGO. Nessa campanha foram feitas observações de ELTs e foram coletados dados de nêutrons e de relâmpagos. A análise de dados do ELTs registrados já foi iniciada e segue em execução, atualmente já foram identificados 78 eventos durante a noite de 13 para 14 de dezembro de 2018. Na figura 7, 8 e 9 podem ser vistos alguns eventos registrados durante esta noite.



Figura 7 – Grupo de sprites capturado na estação instalada na cidade de Anillaco província de La Rioja durante a Campanha RELAMPAGO, em 14 de dezembro de 2018.



Figura 8 – Sprite e halo capturados na estação instalada na cidade de Anillaco província de La Rioja durante a Campanha RELAMPAGO, em 14 de dezembro de

2018.



Figura 9 – Sprites tipo coluna e cenoura capturados na estação instalada na cidade de Anillaco província de La Rioja durante a Campanha RELAMPAGO, em 14 de dezembro de 2018.

A análise dos dados de ELTs segue sendo feita assistindo-se os vídeos gravados pelas estações de Anillaco, Chamental e Las Marias em busca de eventos. Estou assistindo os vídeos da noite de 13 - 14/12/2018 gravados a partir de Anillaco. Já identifiquei 78 eventos no período de 03:39 h às 05:13 h UTC. Cada evento registrado é separado em um vídeo curto através de edição com o software Camtasia. Os vídeos curtos terão suas imagens desentrelaçadas para que seja feita a identificação do momento exato em que o evento começou e terminou. Os dados obtidos são registrados em uma tabela junto à informação da posição em que a câmera se encontrava no momento do evento. Estes dados serão usados para estimar a localização dos eventos e associá-los aos relâmpagos através de cruzamento de dados. Segue um exemplo da tabela criada.

Tabela 1 – Registros de ELTs

Minuto	Segundo	Milissegundo	Evento	Azimute	Elevação
35	47	727	mudança pantilt	135	28
39	3	445	Grupo de Sprite	135	28
39	14	746	Grupo de Sprite	135	28
39	21	229	Grupo de Sprite	165	30
43	10	532	Grupo de Sprite	165	30
50	21	557	Grupo de Sprite	165	30

7. Conclusões

Foram conduzidos estudos sobre ELTs e a teoria da quebra da rigidez dielétrica da atmosfera. Também foram realizados estudos sobre detectores de nêutrons usados nesse tipo de pesquisa, utilizando o manual ‘do detector de nêutrons da rede LEONA, juntamente com aulas práticas em laboratórios, executadas durante as visitas ao IEAv. As atividades no IEAv resultaram num entendimento inicial sobre como projetar a arquitetura elétrica de um detector de nêutrons. Nos encontros e atividades de laboratório foram avaliadas diversas alternativas para tal e detalhadamente debatidas com os colaboradores.

As etapas seguintes envolvem: (a) Desentrelaçamento das imagens de ELTs obtidas durante a última campanha; (b) tratamento e análise dos dados de nêutrons coletados na

campanha; (c) documentação dos resultados das análises; (d) extensa revisão bibliográfica a respeito das Emissões de Alta Energia por tempestades.

8. Referências Bibliográficas

- BARRINGTON-LEIGH, C. P.; INAN, U. S.; STANLEY, M. A. Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry. *J. Geophys. Res.*, v. 106, n. A2, p. 1741-1750, 2001. 8, 13, 19, 20, 83
- BOCCIPPIO, D. J.; WILLIAMS, E. R.; HECKMAN, S. J.; LYONS, W. A.; BAKER, I. T.; BOLDI, R. Sprites, ELF transients, and positive ground strokes. *Science*, v. 269, p. 1088-1091, 1995. 7, 16, 91
- COORAY, V. Mechanism of electrical discharges. In: COORAY, V. (Ed.). *The lightning ash*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003. p. 45-126. 29, 31, 32, 33, 34, 37, 38
- DA SILVA, C. L., Mecanismo de Iniciação de Sprites. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011
- FRANZ, R. C.; NEMZEK, R. J.; WINCKLER, J. R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, v. 249, p. 448-51, 1990. 1, 7, 13
- FUKUNISHI, H.; TAKAHASHI, Y.; KUBOTA, M.; SAKANOI, K.; INAN, U. S.; LYONS, W. A. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, v. 23, p. 2157-2160, 1996. 1, 13, 22
- INAN, U. S. Lightning effects at high altitudes: sprites, elves, and terrestrial gamma ray ashes. *C. R. Physique*, v. 3, p. 1411-1421, 2002. 22
- INAN, U. S.; BARRINGTON-LEIGH, C.; HANSEN, S.; GLUKHOV, V. S.; BELL, T. F.; RAIRDEN, R. Rapid lateral expansion of optical luminosity in lightning-induced ionospheric ashes referred to as 'elves'. *Geophys. Res. Lett.*, v. 24, n. 5, p. 5830-586, 1997. 22
- INAN, U. S.; SAMPSON, W. A.; TARANENKO, Y. N. Space-time structure of optical ashes and ionization changes produced by lightning-EMP. *Geophys. Res. Lett.*, v. 23, n. 2, p. 133-136, 1996. 22
- KUO, C. L.; CHEN, A. B.; CHOU, J. K.; TSAI, L. Y.; HSU, R. R.; SU, H. T.; FREY, H. U.; MENDE, S. B.; TAKAHASHI, Y.; LEE, L. C. Radiative emission and energy deposition in transient luminous events. *J. Phys. D Appl. Phys.*, v. 41, n. 234014, 2008. 21
- LYONS, W. A.; NELSON, T. E.; WILLIAMS, E. R.; CUMMER, S. A.; STANLEY, M. A. Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, v. 131, n. 10, p. 2417-2427, 2003. 7, 23
- M. FILIPPOV, O. MAKSUMOV, S. VIKTOROV, Y. STOZHKOVA, V. MAKHMUTOV, Neutron Detector user manual, Lebedev Physical Institute RAS (DSS/LPI), Moscow, Russia, 2015
- MOUDRY, D. R.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M. Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1 ms time resolution. *J.*

Atmos. Solar-Terr. Phys., v. 65, n. 5, p. 509-518,
2003. 9, 19, 20, 22

PASKO, V. P.; GEORGE, J. J. Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters. J. Geophys. Res., v. 107, n. A12, p. 1458, 2002. 24

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F. Blue jets produced by quasi-electrostatic pre-discharge thundercloud _elds. Geophys. Res. Lett., v. 23, n. 3, p. 301-304, 1996. 24

PASKO, V. P.; INAN, U. S.; BELL, T. F.; TARANENKO, Y. N. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere. J. Geophys. Res., v. 102, n. A3, p. 4529-4561, 1997. xvii, 1, 7, 8, 9, 10, 16, 19, 45, 46, 47, 49, 52, 53, 54, 58, 61, 83, 84, 85, 89, 101, 102, 107

PASKO, V. P.; STANLEY, M. A.; MATHEWS, J. D.; INAN, U. S.; WOOD, T. G. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. Nature, v. 416, n. 6877, p. 152-154, 2002. 3, 23

RAIZER, Y. P. Gas discharge physics. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1997. 9, 16, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 95

SÃO SABBAS, F. T. Estudo da relação entre sprites e os relâmpagos das tempestades associadas. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. 1

SENTMAN, D. D.; WESCOTT, E. M.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites. Geophys. Res. Lett., v. 22, n. 10, p. 1205-1208, 1995. 1, 3, 13, 14, 15, 22

SU, H. T.; HSU, R. R.; CHEN, A. B.; WANG, Y. C.; HSIAO, W. S.; LAI, W. C.; LEE, L. C.; SATO, M.; FUKUNISHI, H. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. Nature, v. 423, n. 6943, 2003. 3, 13, 23

SUKHORUKOV, A. I.; MISHIN, E. V.; STUBBE, P.; RYCROFT, M. J. On blue jet dynamics. Geophys. Res. Lett., v. 23, n. 13, p. 1625-1628, 1996. 24

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; HAMPTON, D. L.; OSBORNE, D. L.; VAUGHAN, O. H. Blue starters: Brief upward discharges from an intense arkansas thunderstorm. Geophys. Res. Lett., v. 23, n. 16, p. 2153{2156, 1996. 13, 23, 24

WESCOTT, E. M.; SENTMAN, D. D.; OSBORNE, D. L.; HAMPTON, D. L.; HEAVNER, M. J. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. Geophys. Res. Lett., v. 22, n. 10, p. 1209{1212, 1995. 1, 13, 23, 24

WESCOTT, E. M.; STENBAEK-NIELSEN, H. C.; SENTMAN, D. D.; HEAVNER, M. J.; MOUDRY, D. R.; SÃO SABBAS, F. T. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors. J. Geophys. Res., v. 106, n. A6, p. 467{477, 2001. 1, 13, 18, 19