



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## ESTUDO DOS RELÂMPAGOS ATRAVÉS DE CÂMERAS DE VÍDEO E SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE)

Lucas David Noveline (ITA, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: [lucasnoveline@gmail.com](mailto:lucasnoveline@gmail.com)

Marcelo Magalhães Fares Saba (INPE, Orientador)

E-mail: [marcelosaba@gmail.com](mailto:marcelosaba@gmail.com)

Julho de 2015

## 1- INTRODUÇÃO

### 1.1- Introdução teórica:

Raios. Um fenômeno tão comum no cotidiano da sociedade, o qual embora tão banalizado por ela, é uma das manifestações mais destrutivas da mãe natureza. Principalmente nos dias atuais, onde a energia elétrica passa a ser cada vez mais a principal fonte energética da sociedade, a proteção de plataformas de geração e de redes de transmissão contra raios passa a ter uma importância cada vez maior no contexto atual. Tudo isso aliado ao fato dessa fonte de energia ser a principal usada nas residências domésticas atuais, torna evidente a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento de métodos de proteção contra essas casualidades da mãe natureza.

Tais fenômenos naturais possuem uma série análises físicas possíveis de serem feitas, sendo algumas atualmente já descobertas e estudadas, e outras que ainda precisam de uma análise mais profunda. Uma dessas análises diz respeito a maneira de propagação do raio. É fato conhecido que, durante a propagação do raio negativo vindo do céu, chamado aqui de líder descendente, ao se atingir uma certa distância de um ponto dado, o campo elétrico gerado por esse líder se torna tão intenso que um raio positivo ascendente, chamado de líder ascendente, é induzido nesse ponto, como ilustrado na figura 1.



Figura 1: Exemplos de líderes ascendentes. Recortes dos vídeos de nosso banco de dados.

Uma vez que esses raios se propagam um em direção do outro, pode se dizer que a conexão foi estabelecida no momento do encontro dos dois raios, e nós chamamos de ponto de impacto do raio o ponto de origem do líder ascendente conectivo, que não é nada mais que o ponto onde o raio "caiu". Como muitas vezes mais de um líder ascendente é emitido, e a conexão ocorre apenas em um deles, acontece de alguns deles não se conectarem e retornarem ao seu ponto de origem. Chamaremos aqui de LAC (Líder Ascendente Conectivo) os líderes que de fato se

conectarem, e chamaremos de LANC (Líder Ascendente Não Conectivo) os líderes que retornarem ao seu ponto de origem. Uma vez estabelecida a conexão, um pico de corrente é emitido desde o ponto de impacto em direção as nuvens, e esse pico pode ser medido com a ajuda de sensores de campos elétricos nas redondezas do fenômeno, ou com sensores próprios de corrente elétrica instalados nos para-raios. Outra característica importante no processo de "queda" do raio é a chamada distância de colisão. Essa característica é muito importante quando falamos de sistemas de proteção de estruturas contra raios, pois graças a ela podemos prever o raio de proteção gerado por um para-raios no topo de uma construção. Essa distância pode ser definida como a distância crítica entre o LAC e o líder descendente, no momento em que a o estabelecimento da conexão se torna iminente. Em uma definição menos usual, temos a definição de distância de colisão de Golde, que é a distância entre a ponta do líder descendente e um certo ponto no qual um líder ascendente será induzido, no momento de indução do líder.

Outro conceito importante de se definir é o de salto final, que é um aumento brusco na velocidade dos líderes ascendentes momentos antes da conexão ser estabelecida, como pode ser visto na figura 2. Embora o salto final seja um fenômeno conhecido, não se foram descobertas muitas coisas a seu respeito, o que o torna um fenômeno altamente passível de análise.

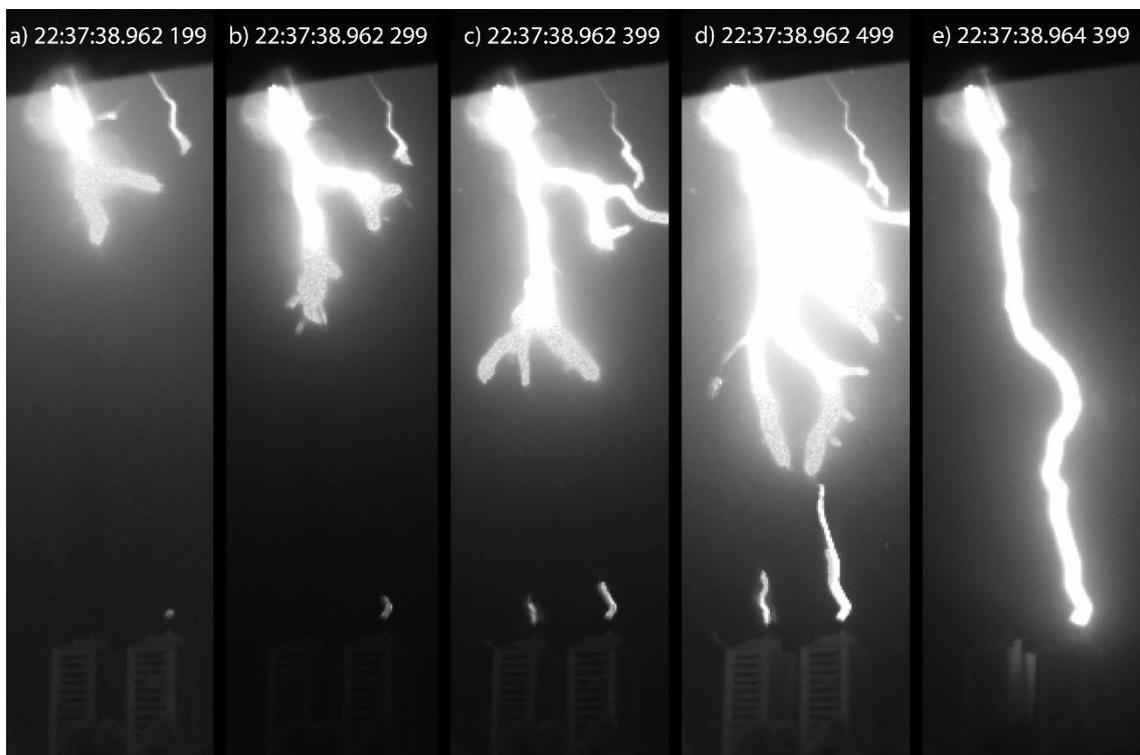


Figura 2: Comparação da velocidade normal de propagação e do salto final dos líderes ascendentes. O salto final é entendido como a brusca diferença de tamanhos entre os quadros c) e d). Recortes dos vídeos de nosso banco de dados.

Existe um modelo teórico, que é o atualmente utilizado na proteção de estruturas contra raios, que relaciona a distância de colisão de um raio com o seu pico

de corrente pela seguinte fórmula:  $S = a \cdot I^b$ , onde  $S$  é distância de colisão,  $I$  o pico de corrente, e  $a$  e  $b$  constantes. Esse é o chamado EGM (*Eleto-Geometrical Model*). Embora vários grupos de pesquisa tenham efetuado medições para determinar os valores constantes da fórmula, ilustrados na tabela 1, notou-se que em alguns casos, mesmo com uma grande abrangência de valores entre o máximo e o mínimo das fórmulas, para cada par de constantes, o resultado não tem se mostrado satisfatório, e os modelos apresentaram falhas em alguns momentos. Estudos mais recentes, como o feito por Vernon Cooray, em seu *paper* "*Attractive radii of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader and propagation model - SLIM*" demonstraram que a variação da distância de colisão não possui apenas uma relação de dependência com o pico de corrente emitido, mas também com a altura da construção considerada. Assim, foi desenvolvido por ele o método *SLIM* de determinação da distância de colisão. Uma comparação entre os resultados do método EGM e do método *SLIM* pode ser visto no gráfico 1.

Modelo:	a	b
Armstrong and Whitehead	6,72	0,8
Brown and Whitehead	7,1	0,75
Gilman and Whitehead	6,7	0,8
Gilman and Whitehead - Design of new lines	6	0,8
Love	10	0,65
Whitehead CIGRE survey lines	9,4	0,67
IEEE Working Group [1]	8	0,65
IEEE Working Group [2]	10	0,65

Tabela 1: Valores das constantes para a fórmula do método EGM, de acordo com o grupo de pesquisa fornecedor. Tabela retirada do livro *Lightning Protection*, de Vernon Cooray.

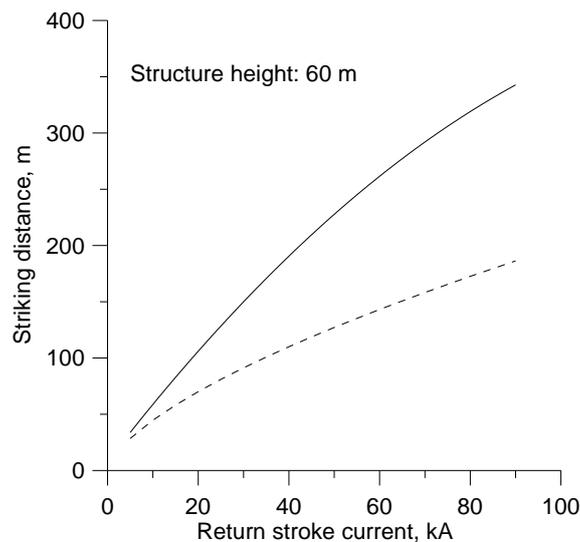


Gráfico 1: Comparação da distância de colisão em função do pico de corrente de uma descarga. A linha cheia representa a distância retornada pelo método *SLIM*, enquanto a linha tracejada representa a distância retornada pelo método EGM. Gráfico fornecido por Vernon Cooray.

## **1.2- Objetivos gerais:**

Conforme descrito na seção anterior, existem diversas teorias com o objetivo de prever a distância de colisão de um raio, mas ainda não existe nenhum experimento a fim de coletar dados para validar ou derrubar as teorias. Dessa forma, esse projeto tem como objetivo, a partir de dados experimentais, fornecer embasamento experimental, ou até mesmo contraexemplos para colocar a teoria a prova, e numa condição futura, servir de base para o desenvolvimento de uma nova teoria a respeito desse tema.

## **2- DESENVOLVIMENTO**

### **2.1- Objetivos específicos:**

Nesta seção iniciaremos o tratamento da pesquisa descrita por esse relatório, que tem como objetivo obter medidas quantitativas experimentais de fatores como deslocamento, velocidade e distância para a origem de LAC's e LANC's, e analisar como estas se comportam desde o momento em que os líderes ascendentes são lançados até o momento em que a conexão é estabelecida, dando uma atenção maior para o momento em que o salto final ocorre. Após feitas essas medições, os resultados serão comparados com os modelos disponíveis atualmente, e serão retiradas conclusões a respeito da validade desses modelos.

### **2.2- Metodologia:**

Para realizar todas as medições descritas no parágrafo anterior, será adotado o seguinte procedimento: Dispondo de uma câmera de alta velocidade, ela será posicionada com foco em dois prédios vizinhos, o edifício Violeta, o qual, para efeito de simplicidade nas análises, será chamado de P1, e o edifício Azaléia, que por motivo análogo ao Violeta, será chamado de P2. Os edifícios estão ilustrados na figura 3. Na figura 4 temos representada a distância entre os edifícios e a nossa base de filmagens. Com o auxílio de dois sensores de campos elétricos disponíveis nas proximidades dos dois prédios, um no Pico do Jaraguá, a 5 km dos edifícios, e outro na cidade universitária da USP, a 8,5 km dos edifícios, serão obtidas medidas do campo elétrico, do pico de corrente e da latitude e longitude do ponto de impacto da descarga. A cada vez que ocorrer uma tempestade, esta será filmada, e de posse do filme da tempestade e das medições do sensor, com a ajuda de um *software* específico para essa função, serão realizadas as medidas experimentais dos dados mencionados no parágrafo anterior, e estes serão comparados com os seus valores teóricos.



Figura 3: Foto dos prédios de estudo. A esquerda está o edifício Azaléia (P2), enquanto a direita está o edifício Violeta (P1). Foto tirada por Benny, membro de nossa equipe.



Figura 4: Vista de um satélite dos edifícios de estudo. Cada edifício está indicado por uma seta na imagem, enquanto a câmera representa o local onde as filmagens são feitas. Fonte: *Google Earth*.

### 2.3- Procedimentos experimentais:

Inicialmente, para a coleta dos dados, foi-se usado uma câmera do modelo *Phantom v711*, que possui uma taxa de 10000 a 20000 quadros/s. Para o armazenamento dos dados, os quais ocupavam um grande espaço de memória, se era usado o equipamento *CINEMAG*, que a cada vez que se era visto um raio, o equipamento era acionado por um operador, e a câmera gravava o segundo anterior e o seguinte ao seu acionamento, mas por possuir uma capacidade de armazenamento bem limitada, a cada 8 acionamentos, o *CINEMAG* era substituído e seus dados transferidos para um computador, evitando assim perda de dados caso a câmera parasse de gravar devido ao completo preenchimento de sua capacidade de

armazenamento. Para uma melhor catalogação dos vídeos gravados, todos os frames gravados eram registrados com o horário local, com precisão de microssegundos.

A respeito das medições realizadas, foi se usado o *software Cine Viewer*, da empresa *Vision Research*, que permite a partir de uma medida de referência efetuar medições de outras distâncias na imagem, baseando-se na seguinte fórmula: dadas as coordenadas em pixels de dois pontos na imagem, a distância entre eles em pixels é dada simplesmente pelo teorema de Pitágoras. De posse dessa distância, um coeficiente de mudança de unidades é aplicado, para se obter a distância em metros. Esse coeficiente é calculado de maneira análoga, pois dada uma medida conhecida e a sua distância em pixels medida pelo *Cine*, a razão delas é o coeficiente procurado. Essa maneira de se calcular distâncias não é muito precisa, pois parte do pressuposto que todos os objetos presentes na imagem são coplanares, o que não é necessariamente verdade, mas ainda assim, para as análises efetuadas, essa aproximação não invalida as medições.

Assim, a partir da medida da altura de um andar do prédio, como mostrado na figura 5, nós obtivemos o fator de conversão pixel-metros da imagem. Dado esse fator, foram se coletados uma por uma as coordenadas dos pontos das extremidades das descargas lançadas, quadro a quadro, pois isso facilitaria uma revisão das medições, caso necessário. Uma vez conhecidas essas medidas e o intervalo de tempo entre dois quadros consecutivos da câmera, utilizando fórmulas de cálculo em planilhas no *Windows Excel*, os resultados foram obtidos. Utilizando o *software OriginPro 8*, os resultados obtidos na planilha foram plotados nos gráficos presentes nos anexos 1, 2 e 3.



Figura 5: Ilustração representativa da distância entre andares medida por nossa equipe, que serve de referência para as medições realizadas no *Cine*. Foto tirada por Benny, membro de nossa equipe.

De posse das medições dos sensores de campo elétrico, foi obtido o pico de corrente elétrica de cada caso, nos possibilitando calcular os valores teóricos da distância de colisão para cada par de constantes da tabela 1. Assim, foi possível elaborar tabelas tais quais a tabela 2 para cada caso, viabilizando as comparações entre os modelos teóricos e os resultados experimentais.

Peak of current 1st stroke	21 kA
----------------------------	-------

Model:	a	b	Striking Distance (m)
Armstrong and Whitehead	6,72	0,8	76,76
Brown and Whitehead	7,1	0,75	69,65
Gilman and Whitehead	6,7	0,8	76,53
Gilman and Whitehead - Design of new lines	6	0,8	68,54
Love	10	0,65	72,35
Whitehead CIGRE survey	9,4	0,67	72,28
Whitehead CIGRE survey - Design of new lines	8,5	0,67	65,36
IEEE Working Group [1]	8	0,65	57,88
IEEE Working Group [2]	10	0,65	72,35

Tabela 2: Medidas teóricas para distância de colisão para cada par de constantes pelo método EGM. Tabela retirada do anexo 1 deste documento.

## 2.4- Resultados obtidos:

Uma vez definidos os procedimentos utilizados, essa sequência de procedimentos foi efetuada para três casos, os quais serão disponibilizados nesta seção. Os resultados estão disponibilizados em planilhas do Excel, e estão representados da seguinte forma: A primeira aba (Measurements) contém as medições de deslocamento, distância para origem, e velocidade de todas as descargas contidas no quadro, bem como a razão entre as velocidades do líder descendente e do LAC; a segunda aba (Graphs) contém os gráficos com as medidas realizadas em função do quadro de cada medida; a terceira aba (St Distance) contém os modelos teóricos para par de constantes em função do grupo de pesquisa de cada uma, sendo destacado o modelo que mais se aproxima do resultado medido, além de conter conclusões específicas da análise de cada caso; a quarta aba (Models) apresenta comparações percentuais entre os valores calculados para a distância de colisão, e os valores medidos, tanto para definição usual quanto para a de Golde; e na quinta aba (LLS e Ef) está disponibilizada as medidas efetuadas pelos sensores de campo elétrico.

## 2.4.1- Análise do dia 01 de Março de 2014:



Figura 6: Frame do evento acontecido no dia 01 de Março de 2014, retirado de nosso arquivo.

Para esse evento, podemos retirar os resultados apresentados abaixo, expostos conforme a descrição dessa seção:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	Measurements made for March 1st, 2014 video:										Coordinate of the floors:	X (psf)	Y (psf)	Distance between floors (m)	2.77
2											9th floor:	360	362		
3	Observation: On the measurements that we made, the doubtful digit was considered to be on the centimeters house.										14th floor:	360	339		
4											Number of floors:	5			
5											Calibration (m/psf):	0.6021739			
6	Downward leader:				Observation: Coordinates of the origin	X (psf)	Y (psf)								
7	Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the origin)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)								
8	22:37:38.961939 743	6.00E-04	167.70	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	310	45								
9	22:37:38.962039 743	5.00E-04	145.43		22.70	2.27E+05	324	80							
10	a	22:37:38.962139 743	4.00E-04	120.00		25.47	2.55E+05	329	122						
11	b	22:37:38.962239 743	3.00E-04	94.53		25.47	2.55E+05	334	164						
12	c	22:37:38.962339 743	2.00E-04	75.39		22.67	2.27E+05	358	193						
13	d	22:37:38.962439 743	1.00E-04	46.65		23.30	2.39E+05	350	242	ave speed down	2.41E+05				
14		22:37:38.962539 743	0.00E+00	46.65	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement		350	242	ave speed up	4.32E+04				
15											ave ratio	5.6			
16	LUCL P2														
17	Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the origin)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)			Ave of individ ratios	5.6	Ratio Vdown/Vucl			
18	a	22:37:38.962139 743	4.00E-04	3.01	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	365	313				5.8			
19	b	22:37:38.962239 743	3.00E-04	7.33		4.38	4.38E+04	363	306			5.3			
20	c	22:37:38.962339 743	2.00E-04	11.58		4.26	4.26E+04	362	299			1.0			
21	d	22:37:38.962439 743	1.00E-04	42.67		31.09	3.11E+05	354	249	Observation: Final jump					
22		22:37:38.962539 743	0.00E+00	46.65	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement		350	242						
23	LUCL P1														
24	Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the origin)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)								
25	a	22:37:38.962139 743	4.00E-04					326	322						
26	b	22:37:38.962239 743	3.00E-04	4.22	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	326	315							
27	c	22:37:38.962339 743	2.00E-04	10.31		6.14	6.14E+04	324	305						
28	d	22:37:38.962439 743	1.00E-04	17.50		7.23	7.23E+04	324	293						
29		22:37:38.962539 743	0.00E+00	17.50		0.00	0.00E+00	324	293						
30	LUCL Edge P2														
31	Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the origin)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)								
32	a	22:37:38.962139 743	4.00E-04					306	333						
33	b	22:37:38.962239 743	3.00E-04												
34	c	22:37:38.962339 743	2.00E-04	3.96	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	301	323							
35	d	22:37:38.962439 743	1.00E-04	6.81		3.01	3.01E+04	298	325						
36		22:37:38.962539 743	0.00E+00	6.81		0.00	0.00E+00	298	325						

Figura 7: Print da aba "Measurements" do evento do dia 01 de Março de 2014, o qual contém tanto os dados extraídos dos próprios vídeos, como a razão entre a velocidade do LAC e do líder descendente *frame a frame*. Print retirado de nosso arquivo.

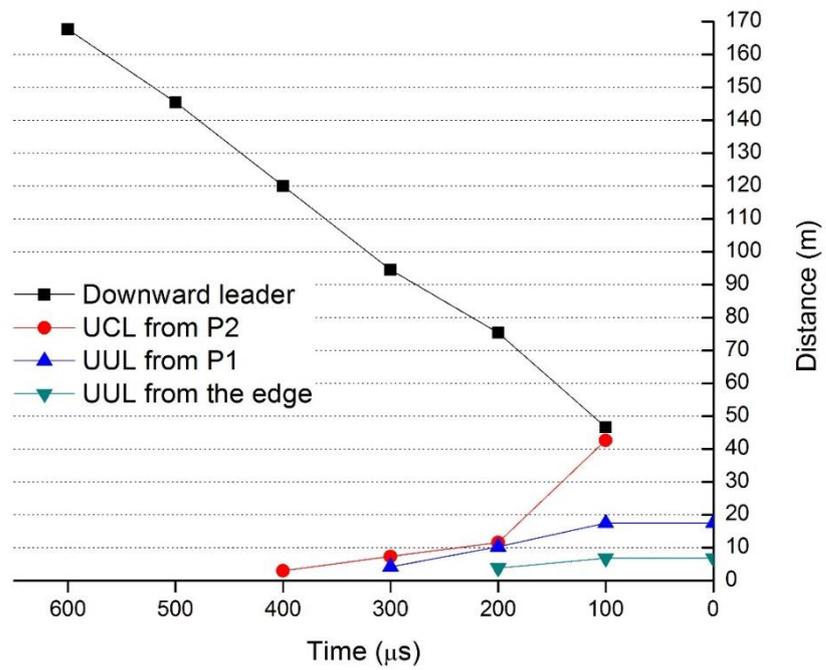


Gráfico 2: Gráfico da distância da ponta de cada descarga para sua origem, em função do tempo para o evento do dia 01 de Março de 2014. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

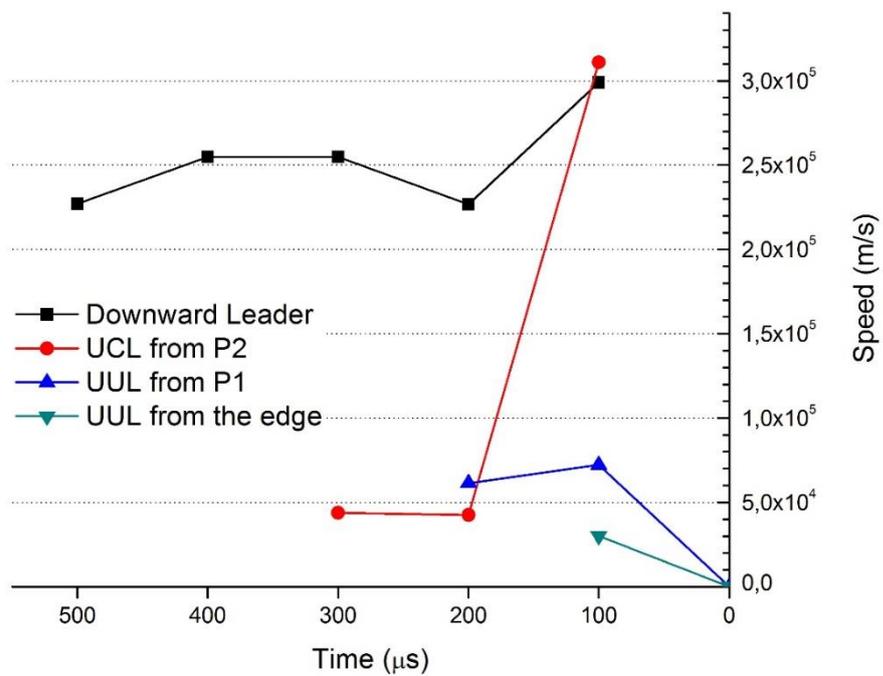


Gráfico 3: Gráfico da velocidade de cada descarga em função do tempo para o evento do dia 01 de Março de 2014. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

Peak of current 1st stroke	21 kA
----------------------------	-------

Model:	a	b	Striking Distance (m)
Armstrong and Whitehead	6,72	0,8	76,76
Brown and Whitehead	7,1	0,75	69,65
Gilman and Whitehead	6,7	0,8	76,53
Gilman and Whitehead - Design of new lines	6	0,8	68,54
Love	10	0,65	72,35
Whitehead CIGRE survey	9,4	0,67	72,28
Whitehead CIGRE survey - Design of new lines	8,5	0,67	65,36
IEEE Working Group [1]	8	0,65	57,88
IEEE Working Group [2]	10	0,65	72,35

Tabela 3: Medidas teóricas para distância de colisão para cada par de constantes pelo método EGM para o caso do dia 01 de Março de 2014, onde a medida destacada representa o valor mais próximo do valor medido. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

Modelos	Ip (kA)	a	b	Sm	S-Sm	Sg-Sm	Measured elements	
							Sg	S
	21							
Armstrong and Whitehead	21	6	0,8	68,5	-33%	75%	120	46
Brown and Whitehead	21	6,4	0,75	62,8	-27%	91%		
Love	21	10	0,65	72,4	-36%	66%		
IEEE standard 1243 [X]	21	8	0,65	57,9	-21%	107%		
IEC standard 62305 [x]	21	10	0,65	72,4	-36%	66%		

Tabela 4: Comparação percentual entre os valores teóricos para cada modelo da distância de colisão com os valores medidos para distância de colisão padrão e pela consideração de Golde. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

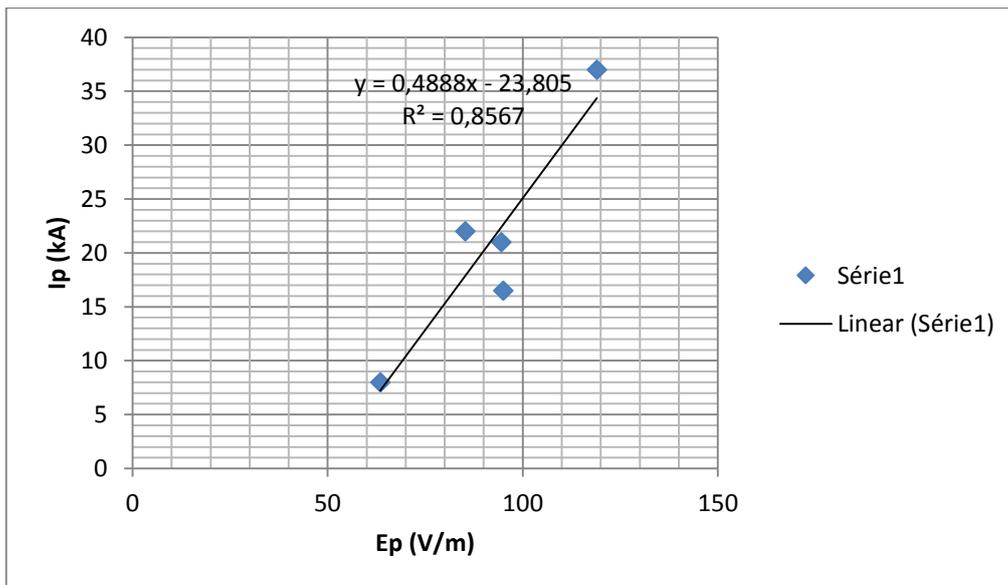


Gráfico 4: Gráfico que relaciona o pico de corrente ( $I_p$ ) e o campo elétrico ( $E_p$ ) no momento da descarga para o caso do dia 01 de Março de 2014. Sabe-se que teoricamente essa relação possui um comportamento linear, e a reta que rege esse comportamento é a aproximação no gráfico. Gráfico elaborado pela equipe.

## 2.4.2- Análise do dia 09 de Fevereiro de 2014:



Figura 8: *Frame* do evento acontecido no dia 09 de Fevereiro de 2014, retirado de nosso arquivo.

Infelizmente para esse evento nós não possuímos dados dos sensores de corrente elétrica, mas podemos retirar os resultados apresentados abaixo, expostos conforme a descrição dessa seção:

Measurements made for February 9th, 2014 video:							Coordinate of the floor	X (psf)	Y (psf)	Distance between floors (r)	2,63	
Observation: On the measurements that we made, the doubtful digit was considered to be on the centimeters house.												
Downward leader:							Observation: Coordinates of the origin		X (psf)	Y (psf)		
Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the orig)	Displacement (m)	Speed (m/s)	X (psf)	Y (psf)						
22:28:37.710 599.75 S	9,00E-04	123,06	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	381	82						
22:28:37.710 699.74 S	9,00E-04	116,61	12,07	1,2E+05	373	102						
22:28:37.710 799.74 S	7,00E-04	98,64	13,32	1,33E+05	367	125						
22:28:37.710 899.74 S	6,00E-04	89,67	9,04	9,04E+04	365	141						
22:28:37.710 999.74 S	5,00E-04	81,63	7,93	7,93E+04	363	155						
22:28:37.711 099.74 S	4,00E-04	68,95	13,19	1,32E+05	366	176						
22:28:37.711 199.74 S	3,00E-04	65,30	5,56	5,95E+04	376	185						
22:28:37.711 299.73 S	2,00E-04	49,32	16,86	1,69E+05	365	213						
22:28:37.711 399.75 S	1,00E-04	46,53	8,02	8,02E+04	378	219						
22:28:37.711 499.75 S	0,00E+00	44,32	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	378	223						
UCL P2:							Observation: Final jump.					
Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the orig)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)						
22:28:37.710 599.75 S	9,00E-04				385	301						
22:28:37.710 699.74 S	9,00E-04				373	102						
22:28:37.710 799.74 S	7,00E-04				367	125						
22:28:37.710 899.74 S	6,00E-04				365	141						
22:28:37.710 999.74 S	5,00E-04	2,80	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	365	296						
22:28:37.711 099.74 S	4,00E-04	5,63	2,96	2,96E+04	366	291						
22:28:37.711 199.74 S	3,00E-04	10,63	6,28	6,28E+04	371	283						
22:28:37.711 299.73 S	2,00E-04	14,54	4,38	4,38E+04	377	278						
22:28:37.711 399.75 S	1,00E-04	17,72	4,08	4,08E+04	375	271						
22:28:37.711 499.75 S	0,00E+00	44,32	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	378	223						
UJUL P1:							Observation: Coordinates of the origin		X (psf)	Y (psf)		
Absolute time:	Relative time:	Height measured (From the orig)	Displacement:	Speed:	X (psf)	Y (psf)						
22:28:37.710 599.75 S	9,00E-04				327	303						
22:28:37.710 699.74 S	9,00E-04	112	Inaccurate measurement	Inaccurate measurement	327	301						
22:28:37.710 799.74 S	7,00E-04	0,00	112	1,12E+04	327	303						
22:28:37.710 899.74 S	6,00E-04	0,00	0,00	0,00E+00	327	303						
22:28:37.710 999.74 S	5,00E-04	0,00	0,00	0,00E+00	327	303						
22:28:37.711 099.74 S	4,00E-04	0,00	0,00	0,00E+00	327	303						
22:28:37.711 199.74 S	3,00E-04	5,60	5,60	5,99E+04	327	293						
22:28:37.711 299.73 S	2,00E-04	9,53	3,52	3,92E+04	327	286						
22:28:37.711 399.75 S	1,00E-04	11,82	2,51	2,51E+04	325	282						
22:28:37.711 499.75 S	0,00E+00	14,11	2,31	2,31E+04	324	278						

Figura 9: *Print* da aba "Measurements" do evento do dia 09 de Fevereiro de 2014, o qual contém tanto os dados extraídos dos próprios vídeos, como a razão entre a velocidade do LAC e do líder descendente *frame a frame*. *Print* retirado de nosso arquivo.

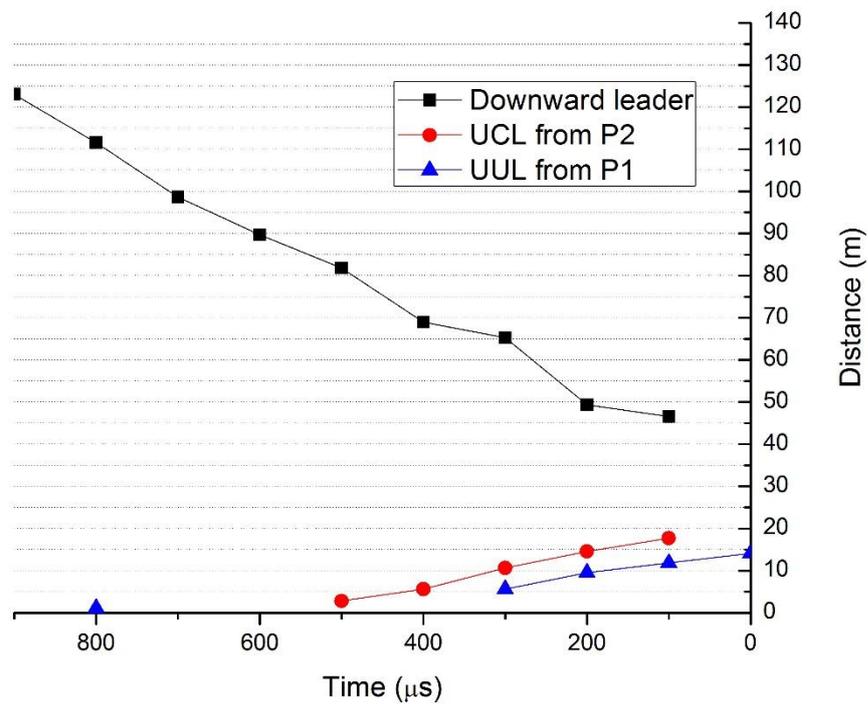


Gráfico 5: Gráfico da distância da ponta de cada descarga para sua origem, em função do tempo para o evento do dia 09 de Fevereiro de 2014. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

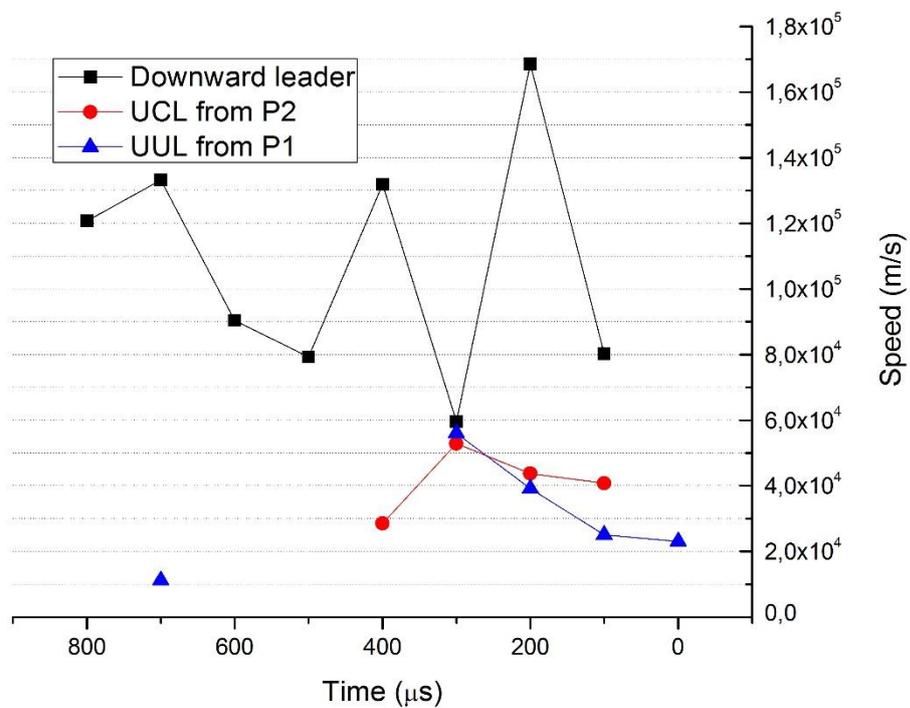


Gráfico 6: Gráfico da velocidade de cada descarga em função do tempo para o evento do dia 09 de Fevereiro de 2014. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

Models analysis:

Peak of current	17 kA
-----------------	-------

Model:	a	b	Striking Distance (m)
Armstrong and Whitehead	6,72	0,8	64,82
Brown and Whitehead	7,1	0,75	59,44
Gilman and Whitehead	6,7	0,8	64,63
Gilman and Whitehead - Design of new lines	6	0,8	57,88
Love	10	0,65	63,07
Whitehead CIGRE survey	9,4	0,67	62,74
Whitehead CIGRE survey - Design of new lines	8,5	0,67	56,73
IEEE Working Group [1]	8	0,65	50,45
IEEE Working Group [2]	10	0,65	63,07

Tabela 5: Medidas teóricas para distância de colisão para cada par de constantes pelo método EGM para o caso do dia 09 de Fevereiro de 2014, onde a medida destacada representa o valor mais próximo do valor medido. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

Models	Ip (kA)		a	b	Sm	S-Sm	Sg-Sm	Measured elements	
	17							Sg	S
Armstrong and Whitehead	6	0,8	57,88	-24%	40%	81	44		
Brown and Whitehead	6,4	0,75	53,58	-18%	51%				
Love	10	0,65	63,07	-30%	28%				
IEEE standard 1243 [X]	8	0,65	50,45	-13%	61%				
IEC standard 62305 [x]	10	0,65	63,07	-30%	28%				

Tabela 6: Comparação percentual entre os valores teóricos para cada modelo da distância de colisão com os valores medidos para distância de colisão padrão e pela consideração de Golde. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

### 2.4.3- Análise do dia 25 de Fevereiro de 2015:



Figura 10: Foto do evento acontecido no dia 25 de Fevereiro de 2015, retirado de nosso arquivo.



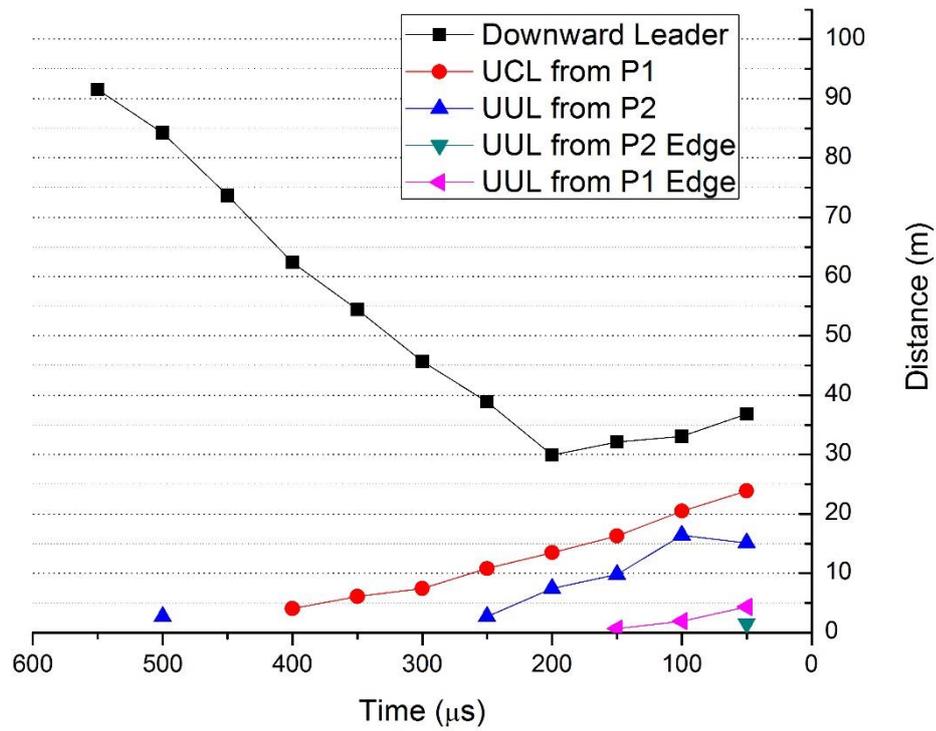


Gráfico 7: Gráfico da distância da ponta de cada descarga para sua origem, em função do tempo para o evento do dia 25 de Fevereiro de 2015. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

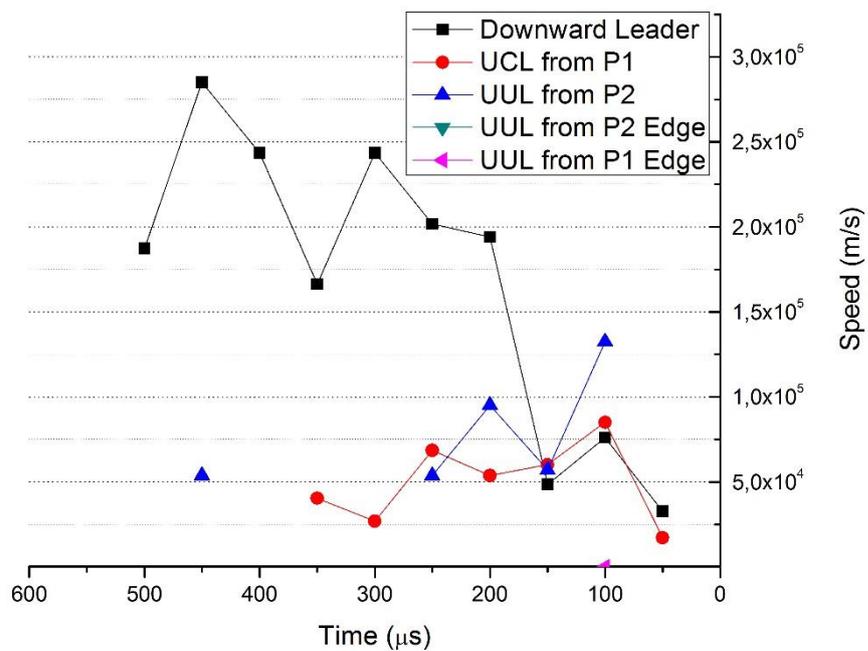


Gráfico 8: Gráfico da velocidade de cada descarga em função do tempo para o evento do dia 25 de Fevereiro de 2015. Gráfico elaborado com auxílio do *software OriginPro 8* pela nossa equipe.

Models analysis:

Peak of current	14	kA
-----------------	----	----

Model:	a	b	Striking Distance (m)
Armstrong and Whitehead	6,7	0,80	55,50
Brown and Whitehead	7,1	0,75	51,39
Gilman and Whitehead	6,7	0,80	55,33
Gilman and Whitehead - Design of new lines	6,0	0,80	49,55
Love	10,0	0,65	55,59
Whitehead CIGRE survey	9,4	0,67	55,09
Whitehead CIGRE survey - Design of new lines	8,5	0,67	49,81
IEEE Working Group [1]	8,0	0,65	44,47
IEEE Working Group [2]	10,0	0,65	55,59

Tabela 7: Medidas teóricas para distância de colisão para cada par de constantes pelo método EGM para o caso do 25 de Fevereiro de 2015, onde a medida destacada representa o valor mais próximo do valor medido. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

Modelos	Ip (kA)		a	b	Sm	S-Sm	Sg-Sm	Measured elements	
	14							Sg	S
Armstrong and Whitehead	6		0,8	0,8	49,55	-29%	25%	62	35
Brown and Whitehead	6,4		0,8	0,8	46,32	-24%	34%		
Love	10		0,7	0,7	55,59	-37%	12%		
IEEE standard 1243 [X]	8		0,7	0,7	44,47	-21%	39%		
IEC standard 62305 [x]	10		0,7	0,7	55,59	-37%	12%		

Tabela 8: Comparação percentual entre os valores teóricos para cada modelo da distância de colisão com os valores medidos para distância de colisão padrão e pela consideração de Golde. Tabela retirada de nosso arquivo interno.

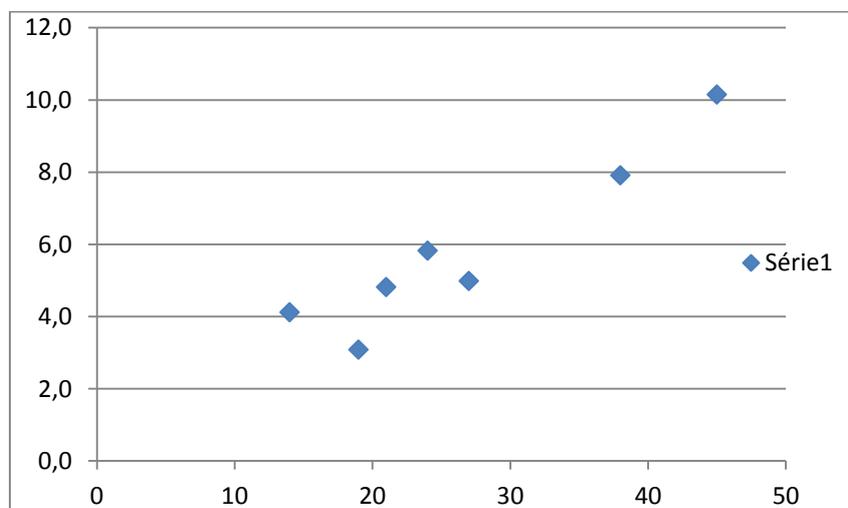


Gráfico 9: Gráfico que relaciona o pico de corrente ( $I_p$ ) e o campo elétrico ( $E_p$ ) no momento da descarga para o caso do dia 25 de Fevereiro de 2015. Sabe-se que teoricamente essa relação possui um comportamento linear. Gráfico elaborado pela equipe.

### 3- CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Apesar dos modelos apresentarem grandes diferenças para os valores medidos, ambas as medidas possuem erros consideráveis, o que impossibilita qualquer conclusão prévia de ser tomada. Como forma de dar continuidade às pesquisas, métodos de refinar os dados obtidos estão sendo desenvolvidos. Primeiramente, para melhorar a qualidade dos dados obtidos, foi instalada uma câmera comum, de 30 *frames/s*, no colégio EMEFM Guiomar Cabral, que se localiza nas redondezas dos prédios P1 e P2, formando um ângulo de visão de aproximadamente 30° com nosso primeiro ponto de observação. Assim, com o auxílio das imagens dessa câmera, conseguiremos obter a projeção perpendicular do caminho do raio, que nos possibilitará obter medidas mais precisas das distâncias e velocidades das descargas.

Além disso, também estão sendo instalados sensores de corrente elétrica nos para-raios de P1 e P2. Esse avanço será crucial para a pesquisa, uma vez que o sensor de campo elétrico possui uma imprecisão muito grande. A figura 6 exhibe o modelo do sensor que está mais cotado para compra, pela nossa equipe. Nos antevendo à instalação dos sensores, foi feito o modelo 3D dos edifícios de estudo no *software CATIA V5 R20*, como representado nas figuras 7 e 8.

Uma vez que já está em processo de instalação desses equipamentos, análises mais refinadas poderão ser realizadas, levando assim à resultados mais confiáveis. Uma aplicação prática imediata de pesquisas mais refinadas seria um aprimoramento dos sistemas de proteção contra raios, os tornando mais eficientes. Além disso, os resultados aqui obtidos podem levar ao desenvolvimento de uma nova teoria no que diz respeito a proteção contra raios, a qual poderá trazer novas descobertas ainda não imaginadas. Atualmente nós possuímos mais de 100 análises possíveis de serem feitas, dentre LAC's e LANC's nos prédios P1 e P2 ou em objetos secundários, aguardando para serem analisados, além da possível existência de casos futuros que já contarão com os novos equipamentos instalados, demonstrando assim, a necessidade de continuidade desse projeto.



Figura 13: Exemplo de sensor de corrente elétrica disponível no mercado. Foto retirada de um catálogo da *Hilo Test*.

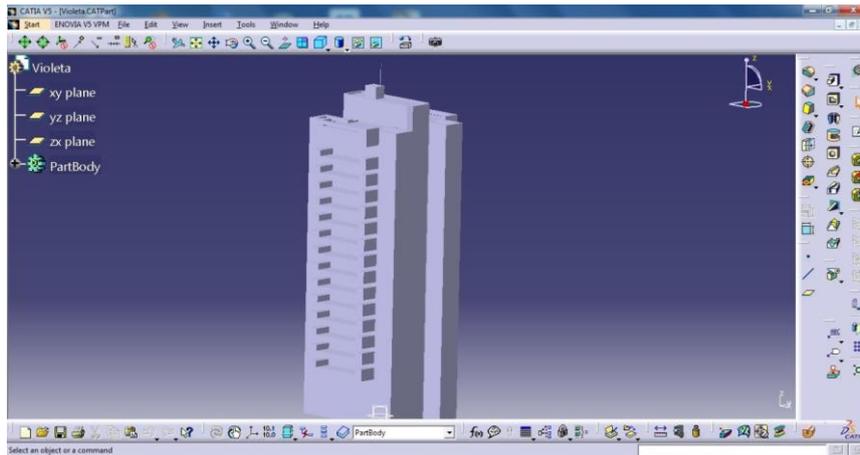


Figura 14: Modelo do edifício Violeta no software CATIA V5 R20. Print Screen do computador operando o software.



Figura 15: Imagem renderizada pelo programa do Edifício com foto de fundo retirada em expedições passadas da nossa equipe.

#### 4- Referências bibliográficas

- [1] Saba, M. M. F., C. Schumann, T. A. Warner, J. H. Helsdon Jr., W. Schulz, and R. E. Orville (2013), Bipolar cloud-to-ground lightning flash observations, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, doi:10.1002/jgrd.50804.
- [2] Golde, R. H., *Lightning Protection*, Edward Arnold, London, 1973.
- [3] CIGRÉ WG 33-01 (convener A. Erickson), *Guideto Proceduresfor Estimatingthe Lightning Performance of Transmission Lines*, Cigré Brochure 63, October 1991.
- [4] Brown G.W. and E. R. Whitehead, Field and analytical studiesof transmission lineshielding, *IEEE Trans. on PAS*, **88**, pp. 617-626, 1969
- [5] Love E.R., *Improvements on lightning stroke modelling and applications to the design of EHV and UHV transmission lines*, M.Sc. Thesis, University of Colorado, 1973.
- [6] IEEE Std. 1243, *IEEE guide for improving the lightning perfomance of transmission lines*, June 26, 1997.