

▼ Aula Prática 1: Simulação de Campo Elétrico

Nesta aula prática, iremos analisar a variação do campo elétrico para diferentes configurações de centro de cargas de uma nuvem usando a teoria de campo elétrico sobre um condutor.

As configurações de centro de cargas disponíveis são:

- Monopolo (condições de bom tempo)
- Dipolo
- Tripolo
- Multipolo (6 centros de cargas distintos)

Cada centro de carga vai ser definido a partir da altura. No caso multipolo, a distância horizontal entre centros de cargas também será definida.

Lembrando que a teoria de campo elétrico sobre um condutor diz que, no caso de diversos centros de cargas $+q$ ou $-q$ acima da superfície (a diferentes alturas z e distâncias x), as componentes do campo elétrico E_x e E_z e o campo elétrico total E são definidos por:

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{q_1 x_1}{r_1^3} + \frac{q_2 x_2}{r_2^3} + \dots \right) = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{q_1 x_1}{\sqrt{(x_1^2 + z_1^2)^3}} + \frac{q_2 x_2}{\sqrt{(x_2^2 + z_2^2)^3}} + \dots \right)$$

$$E_z = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{q_1 z_1}{r_1^3} + \frac{q_2 z_2}{r_2^3} + \dots \right) = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{q_1 z_1}{\sqrt{(x_1^2 + z_1^2)^3}} + \frac{q_2 z_2}{\sqrt{(x_2^2 + z_2^2)^3}} + \dots \right)$$

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_z^2}$$

Nesta simulação, partiremos de um valor base (máximo) de carga e redistribuiremos esse valor aos centros de carga de acordo com a configuração escolhida da seguinte forma:

Configuração	Centro de Cargas Positivas (+q)	Centro de Cargas Negativas (-q)
Dipolo	1: 100%	1: 100%
Tripolo	1: 20% 2: 80%	1: 100%
Multipolo	1: 10% 2: 60% 3: 10% 4: 20%	1: 60% 2: 24% 3: 16%

Observe que, na configuração multipolo, um quarto centro de cargas positivas é gerado. Ele fica na mesma altura do primeiro centro cuja altura iremos definir, mas deslocado de acordo com a distância horizontal escolhida.

► 1. Definindo os parâmetros necessários

Importando as bibliotecas necessárias

Nesta aula prática, iremos importar funções de um script auxiliar chamado `calcula_plota_multipolo.py`. Para isso, precisamos montar a nossa pasta do Google Drive e apontar o caminho do script para este notebook, usando a biblioteca própria `google.colab` e a nativa do Python `sys`.

Não esqueça de modificar o caminho abaixo, indicando a pasta onde está o script da aula prática no seu Drive. Use a barra lateral para encontrar a pasta se for necessário

[] ↴ 3 células ocultas

▶ 2. Calculando o campo elétrico

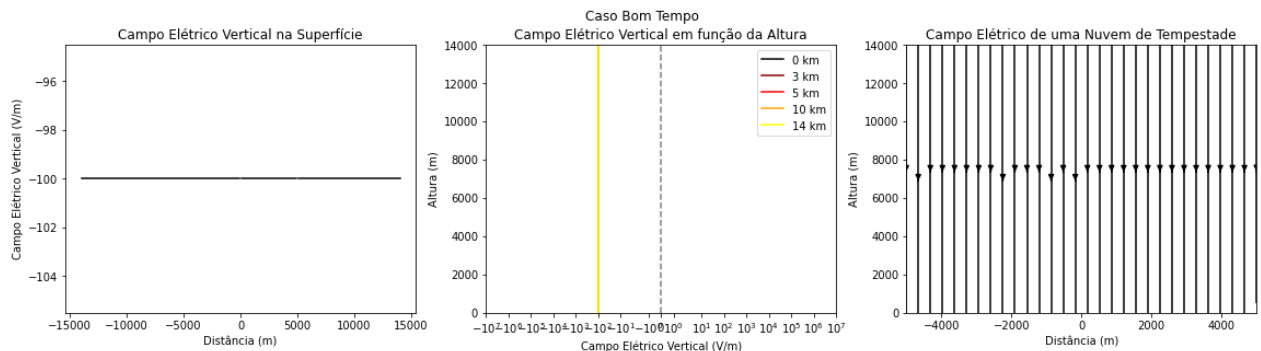
Vamos aplicar os parâmetros acima na função `calc_campo_e`.

[] ↴ 3 células ocultas

▼ 3. Plotando os resultados

Agora vamos aplicar as variáveis acima, além dos parâmetros `h`, `dist_multip` e `n_polos`, na função `plota_campo_e`.

```
1 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
```



Edite os parâmetros, adicionando e modificando as alturas de cargas:

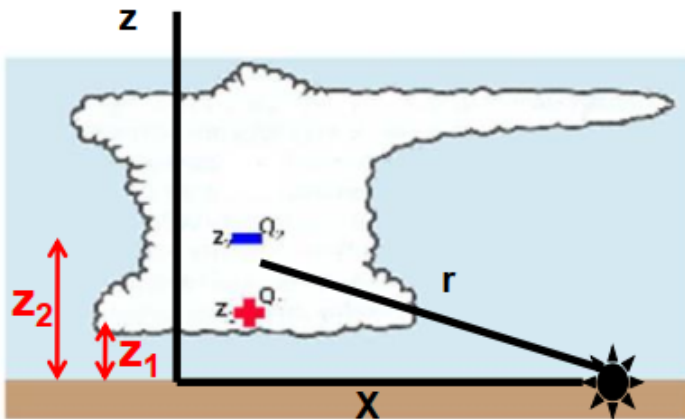
Dica: Lembre da redistribuição de cargas entre os centros em cada configuração ao escolher a posição deles.

▼ Exercício 1 [5 pontos]

Analise as soluções de dipolo (exercício apresentado na Aula 2) e tripolo (segundo exercício da Lista 2).

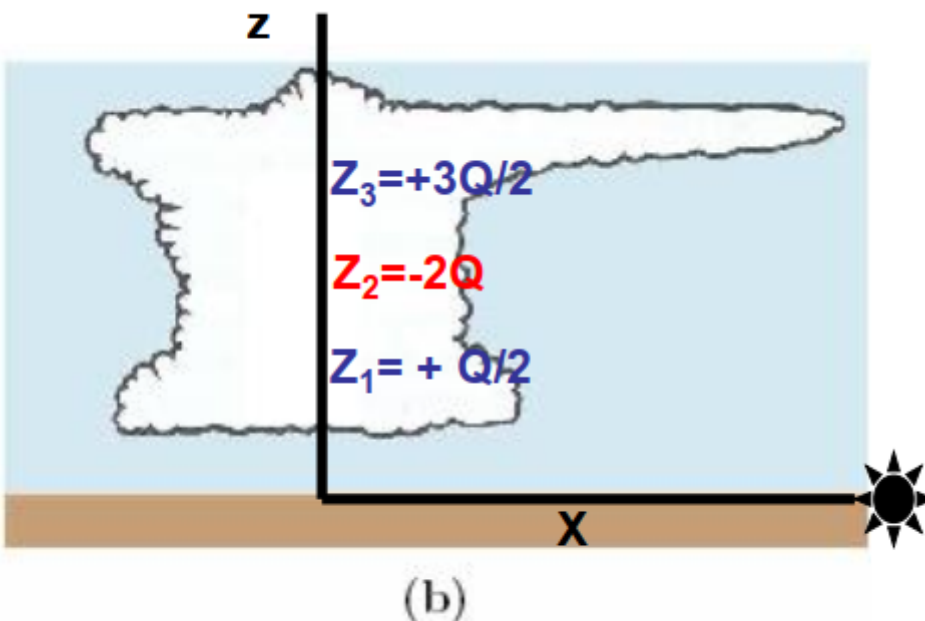
- Como o campo elétrico na superfície muda de um caso para outro?
- Como o campo elétrico varia em função da altura à medida que aumenta a distância? Qual o papel dos centros de cargas em cada caso?

Dipolo analisado na Aula 2



Onde $z_1 = z$ e $z_2 = 2z$
e
 $|Q_1| = |Q_2| = |Q|$

Tripolo analisado na Lista 2



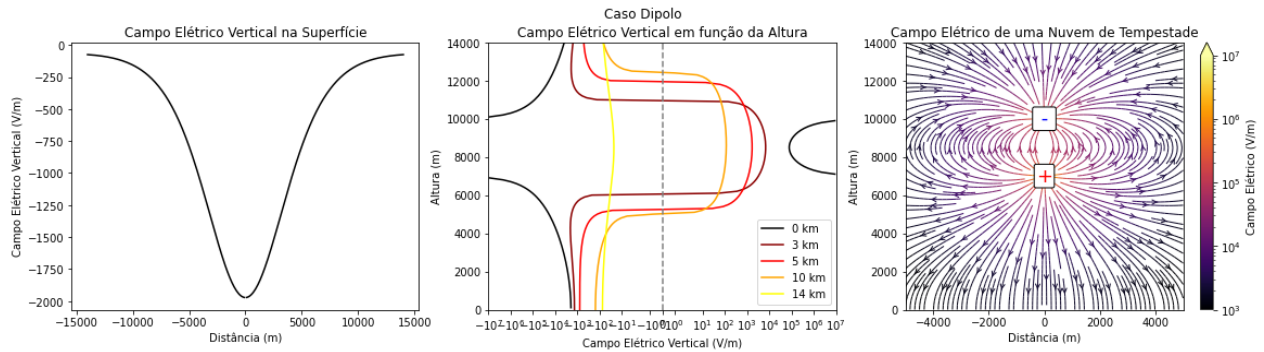
Onde, $z_1 = z$, $z_2 = 2z$ e $z_3 = 3z$

Averiguemos inicialmente os campos gerados pela configuração **dipolar**:

```

1 import numpy as np
2 h = [7, 10 ]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -100
5 n_polos = 2
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
10

```

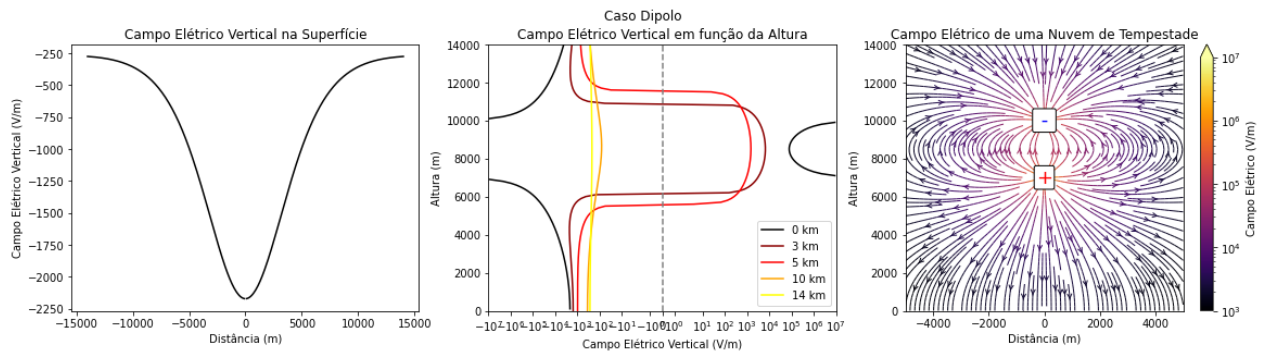


Naturalmente observa-se intensidade maiores em módulo do campo elétrico vertical para a posição vertical coincidente com o eixo do centro de distribuições. Nota-se a influência da superfície na propagação dos campos e com a carga em menor altitude induzindo densidade de carga negativa na superfície, como ocorre em um capacitor. Nota-se também que os campos verticais variam rapidamente nas proximidades dos centro de cargas ($7000m - 1000m$). Variemos as condições de tempo para $-300\frac{V}{m}$:

```

1 h = [7, 10 ]
2 dist_multip = 0
3 E_bomtempo = -300
4 n_polos = 2
5 q_max = 10
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
9

```



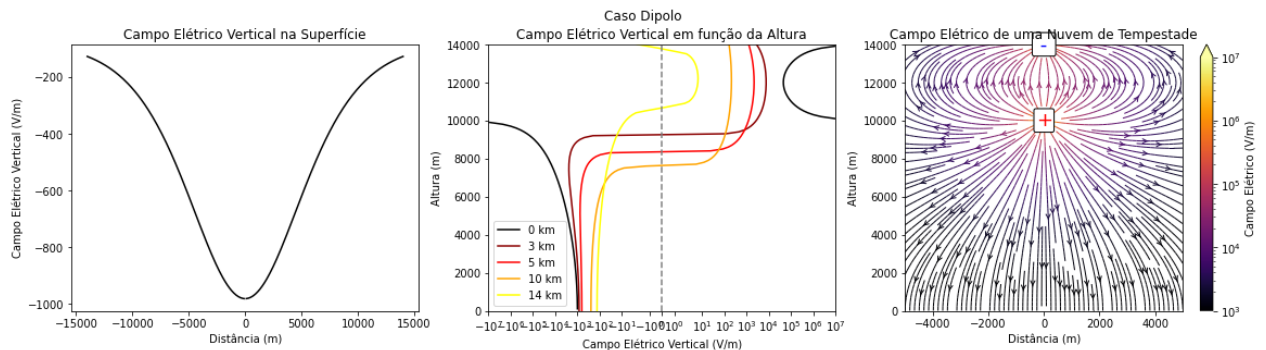
Variando agora a altura dos centros de carga:

```

1 import numpy as np
2 h = [10, 14]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -100
5 n_polos = 2
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
10

```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
#POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
#CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
#NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
#CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO



```

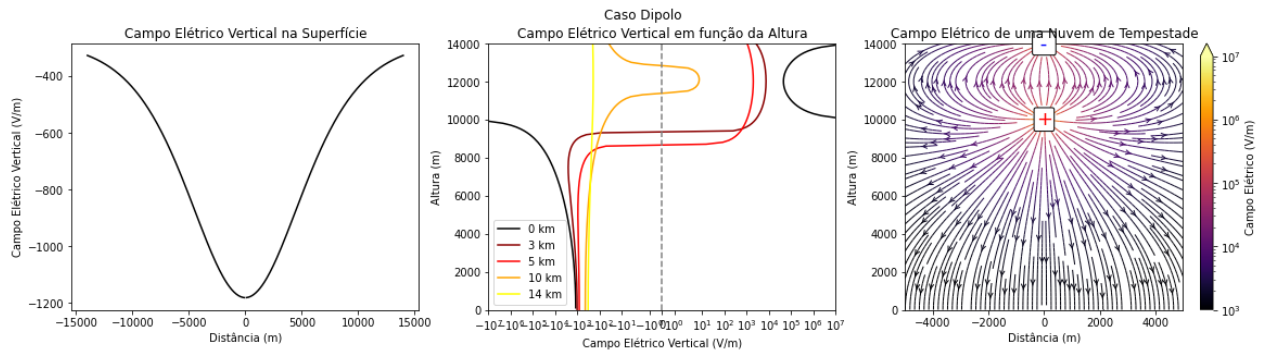
1
2 h = [10, 14 ]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -300
5 n_polos = 2
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)

```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
#POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
#CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
#NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
#CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO

```
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
```

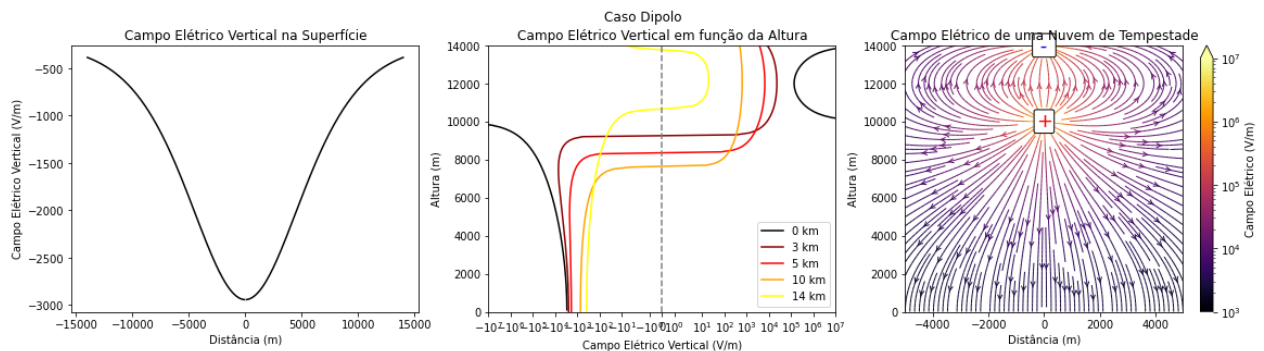
```
10
```



Nota-se padrões similares para as curvas verticais, no primeiro gráfico é observável que a curva é menos afunelada para cargas localizadas em maiores altitude, e novamente é notável a variação maior do campo nas alturas que abrangem os centros de cargas.

```
1 h = [10, 14 ]
2 dist_multip = 0
3 E_bomtempo = -300
4 n_polos = 2
5 q_max = 30
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
 #POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
 #CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
 #NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
 #CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO



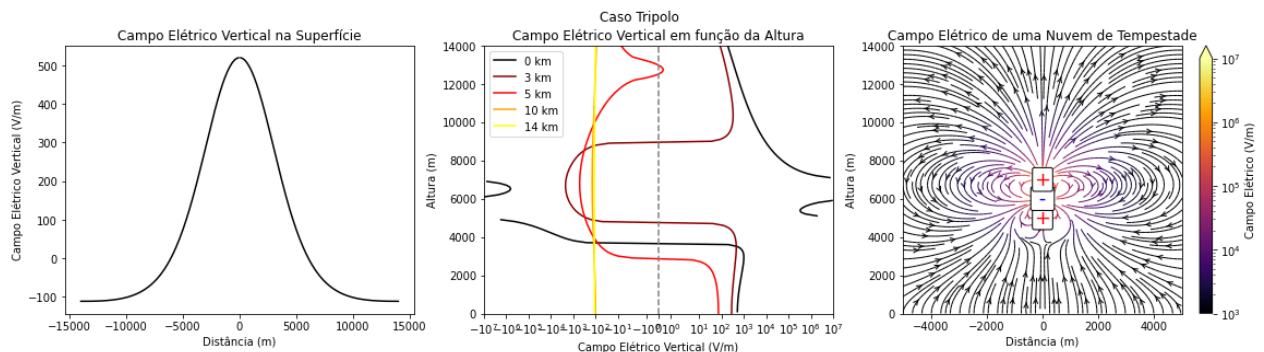
Com o aumento da intensidade dos centros de cargas para $30C$ observamos aumento na intensidade de todas as curvas, e é observável essa variação no mapa da terceira figura com os centros coloridos de amarelo.

Aqui gera-se curvas de campo elétrico para um tripolo com campo inicial de $E = -100 \text{ V/m}$. Fazemos quatro versões duas com $E_{bomtempo} = -100 \frac{\text{V}}{\text{m}}$, mas variando a posição vertical inicial, e duas com $E_{bomtempo} = -300 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ também variando a posição vertical. Para esse último caso analisaremos o impacto de variação da intensidade das cargas no campo elétrico:

```

1 =
2 h = [5, 6, 7]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -100
5 n_polos = 3
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

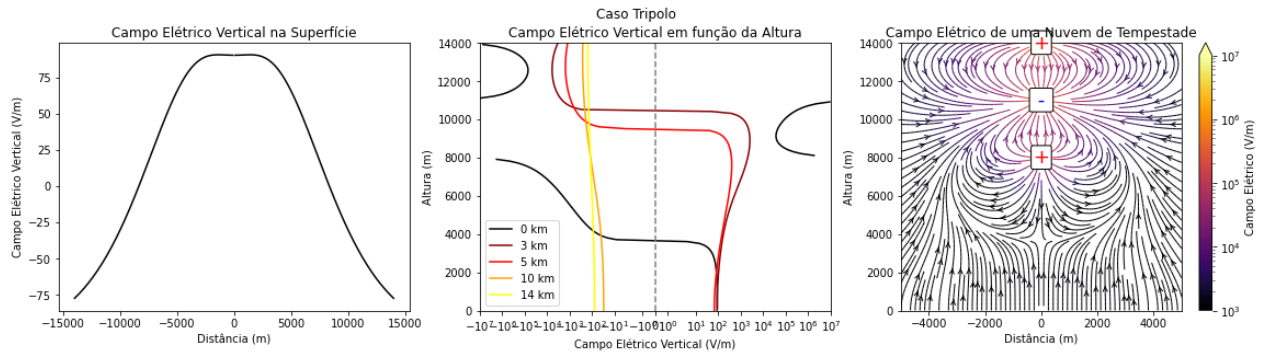
```



```

1 import numpy as np
2 h = [8, 11, 14]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -100
5 n_polos = 3
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```

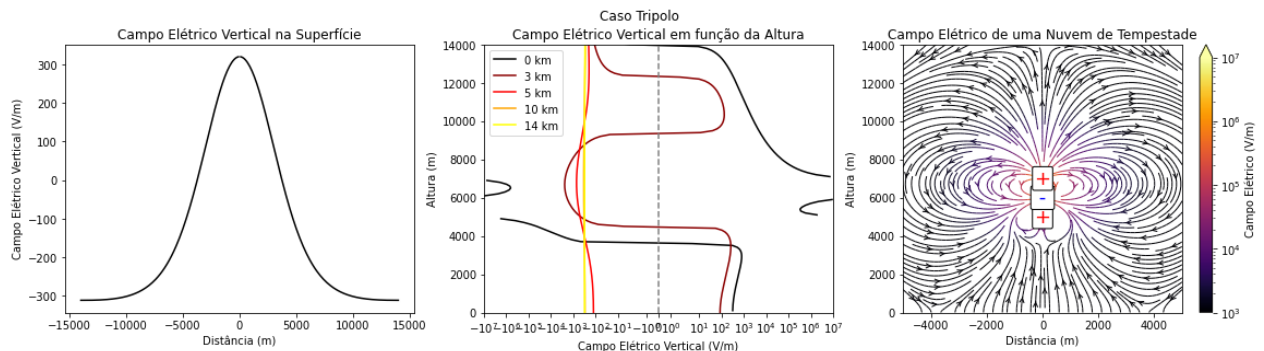


```

1
2 h = [5, 6, 7]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -300
5 n_polos = 3
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
#POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
#CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
#NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
#CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO

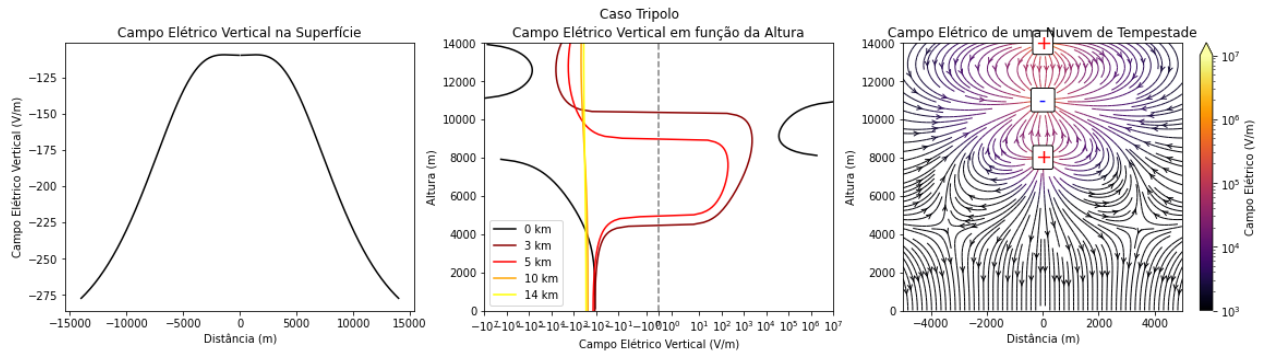


```

1 import numpy as np
2 h = [8, 11, 14]
3 dist_multip = 0
4 E_bomtempo = -300
5 n_polos = 3
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
#POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
#CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
#NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
#CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO

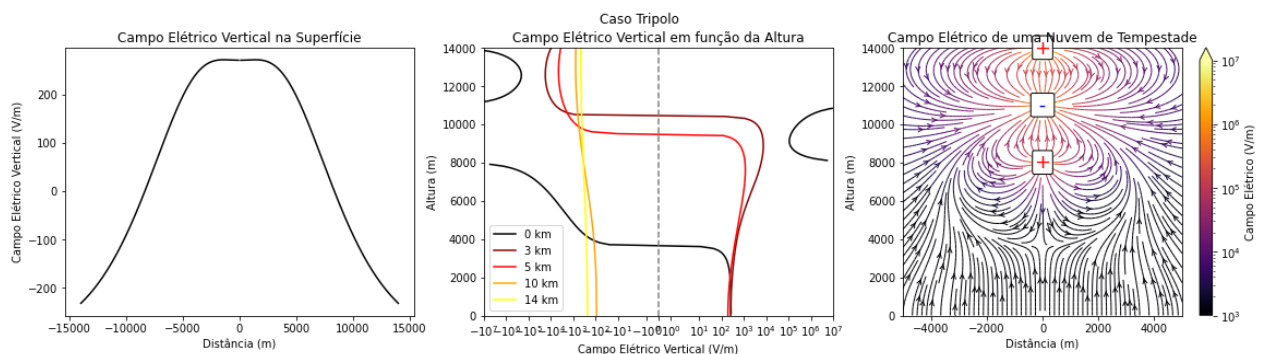


Para o gráfico do campo elétrico vertical pela distância horizontal observamos maior variação na curva, tanto em formato, quanto em intensidade ao variar altura dos centros de carga, do que ao alterar as condições iniciais de bom tempo. Lembrando que o campo elétrico tem dependência radial de $\frac{1}{r^2}$. Façamos uma alteração na intensidade das cargas:

```

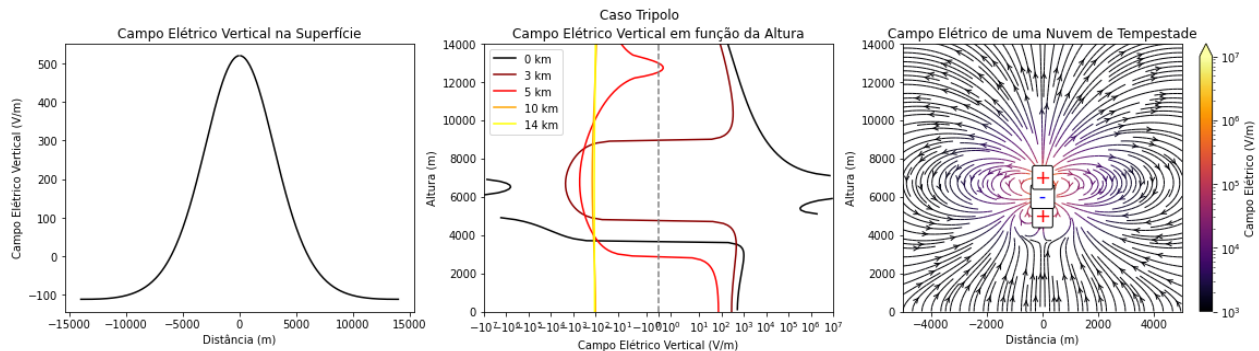
1 h = [8, 11, 14]
2 dist_multip = 0
3 E_bomtempo = -300
4 n_polos = 3
5 q_max = 30
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
  
```

#LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CARGAS
 #POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
 #CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
 #NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
 #CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO



Neste caso percebemos que a principal mudança acarretada na variação do valor total dos centros de carga é na intensidade do campo elétrico vertical, apesar de visível mudança também apresentada no campo elétrico horizontal. A variação da carga não alterou o formato das curvas no primeiro e terceiro gráfico, que pode refletir a dependência linear - mas não equipartida - do campo elétrico. Agora variaremos a posição horizontal do centro de cargas para o primeiro caso apresentado:

```
1 import numpy as np
2 h = [5, 6, 7]
3 dist_multip = 1000
4 E_bomtempo = -100
5 n_polos = 3
6 q_max = 10
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
```



Aparentemente não há mudança nas configurações dos campos, mas a depender da topografia regional, as cargas podem ter maior interação com a superfície.

Concluindo a análise de tripolos, observa-se alteração principalmente na intensidade dos campos ao alterar a intensidade das cargas, porém ao alterar a altitude dos centros de carga, observa-se mudanças na direção das linhas de campos, e para maiores alturas há maior estabilidade dos campos ao redor do centro da distribuição. Essa variação nítida na geometria dos campos ao se variar a altura, deve-se à mudança da interação entre as cargas atmosféricas e a superfície, uma vez que o espaçamento das cargas são mantidas constantes, mas não entre estas e a superfície. Para a configuração tripolar observa-se maior variação na forma de propagação, pois o sistema com mais cargas é mais complexo por somar as componentes de

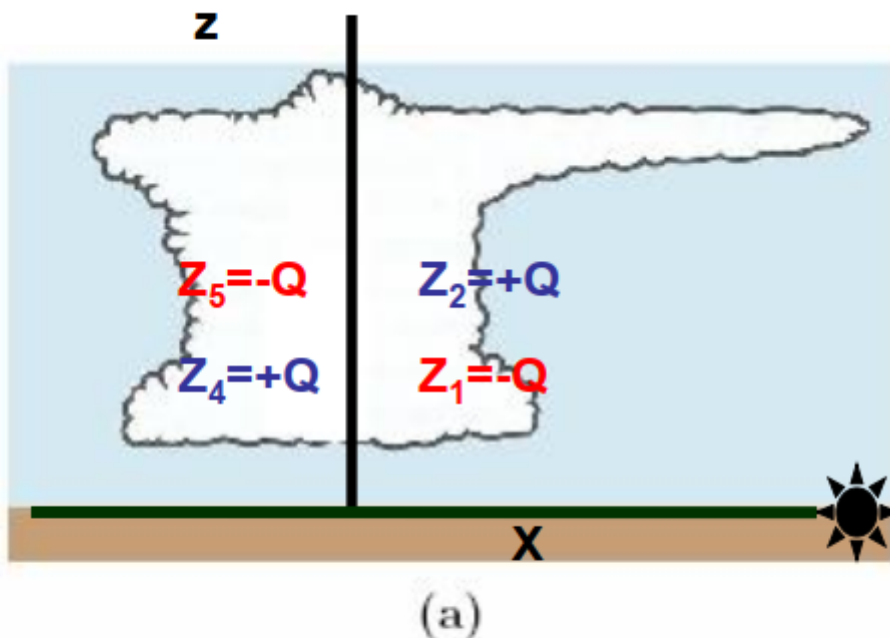
cada interação. Fica nítido que as pequenas variações são mais impactantes na configuração tripolar, que na configuração dipolar.

▼ Exercício 2 [5 pontos]

Simule um multipolo com dois centros verticais: um quadripolo principal e um tripolo secundário (similar ao primeiro exercício da Lista 2). Varie a distância entre eles. Como o campo elétrico na superfície na posição do quadripolo é influenciado pelo tripolo?

Multipolo analisado na Lista 2

Lembre que a configuração do script considera 7 polos e que um dos multipolos sempre estará em $x = 0$!



Onde, $z1 = z$, $z2 = 2z$ e

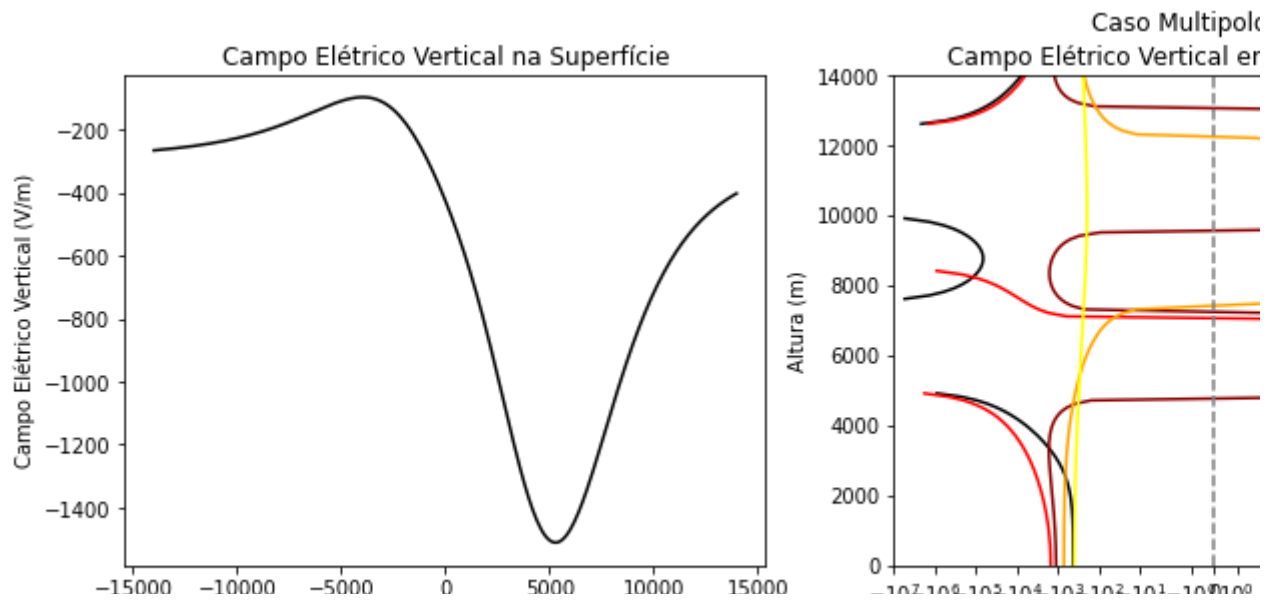
$z4 = z$, $z5 = 2z$

$Z1$ e $Z2$ estão em $x1$ e $Z4$ e $Z5$ em $-x1$

```

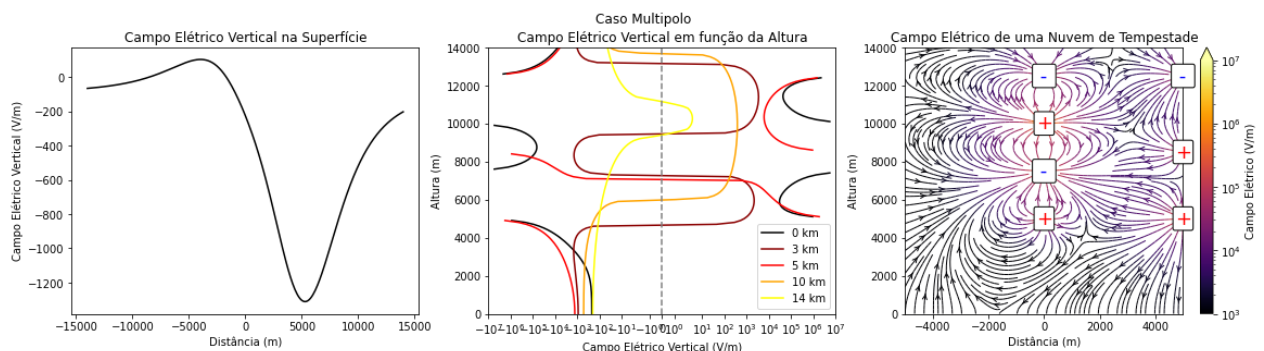
1
2 h = [5, 7.5, 10, 12.5, 8.5,12.5] #LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CAR
3 dist_multip = 5 #POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
4 E_bomtempo = -300 #CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
5 n_polos = 6 #NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
6 q_max = 10 #CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO
7
8 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSIÇÕES (x,z)
9 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```



Observa-se na terceira figura que a configuração quadripolar domina as linhas de campo para si, com poucas linhas em direção à configuração tripolar; pode ser por isso que a componente vertical seja sentida mais intensamente na superfície, quando alinhada à configuração tripolar em 5 km . As curvas do segundo gráfico parecem ser dominadas principalmente pelos dois dipolos da configuração quadripolar, com picos entre dipolos. Vamos alterar a condição de bom tempo:

```
1 h = [5, 7.5, 10, 12.5, 8.5, 12.5] #LISTAS DE ALTURAS DOS CENTROS DE CAR
2 dist_multip = 5 #POSIÇÃO HORIZONTAL DO CENTRO(?) DO MULTIPOLO
3 E_bomtempo = -100 #CAMPO ELÉTRICO DE BOM TEMPO
4 n_polos = 6 #NÚMERO DE POLOS ELÉTRICOS
5 q_max = 10 #CARGA MÁXIMA DO CENTRO DO POLO MAIS INTENSO
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSIÇÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)
```

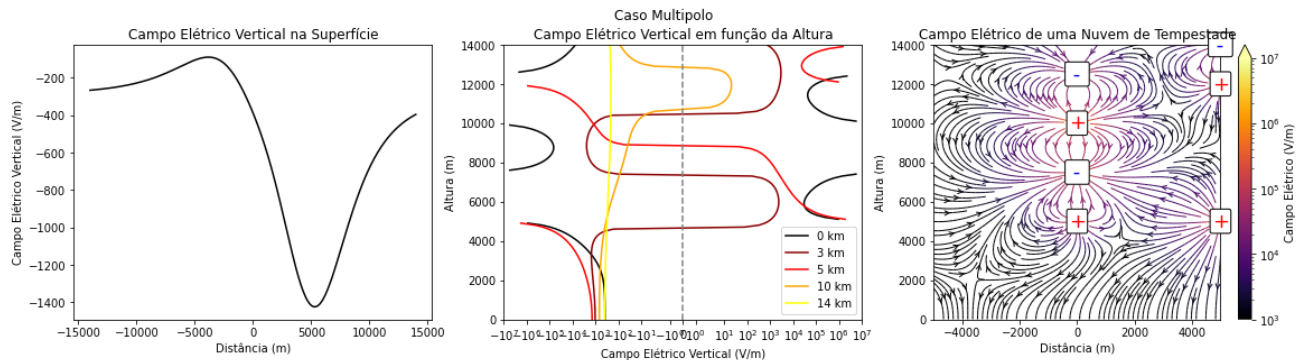


Assim como para as configurações dipolar e tripolar, essa mudança parece só afetar significativamente a intensidade do campo, como uma condição inicial. Variemos a altura do tripolo:

```

1 h = [5, 7.5, 10, 12.5, 12,14]
2 dist_multip = 5
3 E_bomtempo = -300
4 n_polos = 6
5 q_max = 10
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```



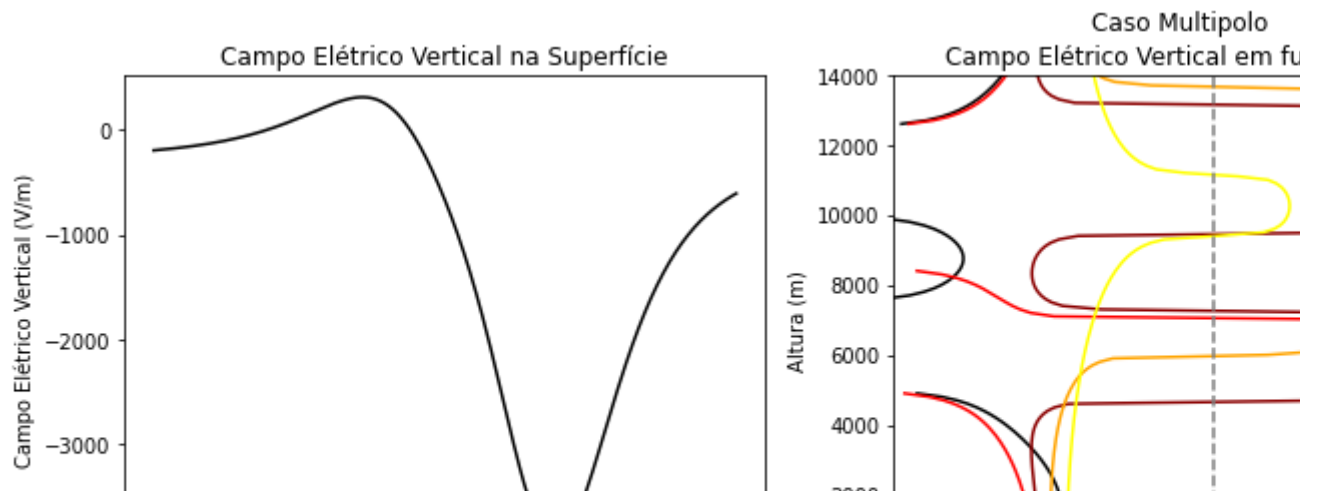
Nota-se o aumento da intensidade máxima do campo elétrico vertical, um afunelamento da curvas de 10km e o campo em 14km fica constante. Neste caso a carga tripolar de 5km parece interagir ainda mais com a configuração tripolar. Variemos a intensidade dos centros de carga:

```

1 h = [5, 7.5, 10, 12.5, 8.5,12.5]
2 dist_multip = 5
3 E_bomtempo = -300
4 n_polos = 6
5 q_max = 30
6
7 x, z, Ex, Ez = calc_campo_e(h, dist_multip, E_bomtempo, n_polos, q_max) #POSICÕES (x,z)
8 plota_campo_e(x, z, Ex, Ez, h, dist_multip, n_polos)

```





Aqui as cargas mais próximas da superfície parecem interagir mais entre si, parecendo formar uma célula mais acentuada antes de chegar à superfície. A curva para $14km$ volta a variar e a de $10km$ volta a ser quase coonstante entre $5km$ e $14km$. A intensidade do campo elétrico mais que duplica após aumentarmos o valor dos centros de carga, oir conta da dominância das cargas negativas.

As cargas nas duas configuração exercem muita influência umas sobre as outras, por isso as variações afetam muito as linhas de campos, mas interagem menos com a superfície, pois as cargas da configuração quadripolar, principalmente, interagem mais em pares, contribuindo menos com o exterior da configuração.