

```

%programa para calcular a imped. de um eletrodo vertical em um solo
%multicamadas e solos dependentes da frequencia
clc
close all
clear all
Ns=512*10;           % Qtde de pontos de frequencia
fi=log10(1e2);      % Frequencia inicial
ff=log10(1e7);      % Frequencia final
freq=logspace(fi,ff,Ns); % Vetor de frequencias

%=====

% Cálculo da impedância e admitância

% =====
% Dados do solo e geometria do eletrodo
% -----
epso=8.8541878176e-12; % Epsilon zero = permissividade do vácuo [F/m]
mio=4*pi*1e-7;        % permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
epsr=10 ;             % permissividade relativa
mir=1;                % permeabilidade relativa
eps=epso*epsr;        % permissividade do solo [F/m]
mi=mio*mir;           % permeabilidade do solo [H/m]

raio=12.5/1000;       % raio do eletrodo (~50mm^2) em [m]
                    % profundidade do eletrodo enterrado (m)

H1=3;% comprimento do eletrodo na camada 1
H2=1;%comprimento do eletrodo na camada 2
H3=13;%comprimento do eletrodo na camada 3

r01=1000;
r02=100;
r03=10;

% -----

% resistividade do solo na camada 1

for k=1:length(freq)
% Equacoes de Silverio e Visacro
    if freq(k)<=10000
        er(k)=192.2034;%%
        eps(k)=er(k).*epso;

    else
        er(k)=7.6e3.*freq(k).^(-0.4) + 1.3;%%
        eps(k)=er(k).*epso;
    end

    p1(k)=r01.*(1+(1.2e-6*r01.^(0.73)).*(freq(k)-100).^(0.65)).^(-
1);%resistividade 1

```

```

    p2(k)=r02.*(1+(1.2e-6*r02.^(0.73)).*(freq(k)-100).^(0.65)).^(-
1);%resistividade 2
    p3(k)=r03.*(1+(1.2e-6*r03.^(0.73)).*(freq(k)-100).^(0.65)).^(-
1);%resistividade 3

end

for k=1:length(freq)
    k
    length(freq)
    s(k)=i*2*pi*freq(k);

r1(k)=1.724e-8/(pi*raio^2)*0;           %resistência do cobre (eletrodo)
[Ohm/m]
R1(k)=(p1(k)./(2*pi*H1)).*(log(4.*H1./raio)-1); %resistência transversal
[Ohm.m]
C1(k)=(p1(k).*eps(k))./R1(k);
%capacitânciatransversal [F/m]
L1(k)=(mi.*H1./(2*pi)).*(log(2.*H1./raio)-1); %ind. long.(TL-image) [H/m]

gli(k)=1./(R1(k).*H1);
lli(k)=L1(k)./H1;
cli(k)=C1(k)./H1;
%
%
zli(k) = (r1(k)+s(k).*lli(k));
yli(k) = gli(k)+s(k).*cli(k);

zol(k)=sqrt(zli(k)./yli(k)); %impedância característica
gama1(k)=sqrt((r1(k)+s(k).*lli(k)).*(gli(k)+s(k).*cli(k))); %função de
propagação
za1(k)=zol(k).*coth(gama1(k).*H1); %imped. harmôn. do eletrodo (no term.
emissor z=Va/Ia)
%
%formacao de q1

a1(k)=cosh(gama1(k).*H1);
b1(k)= zol(k).*sinh(gama1(k).*H1);
c1(k)= (1./zol(k)).*sinh(gama1(k).*H1);
d1(k)=a1(k);

q1(:, :, k)=[a1(k) b1(k); c1(k) d1(k)];% formacao do quadripolo 1
Zeq1(k)=abs(a1(k)./c1(k));
fase1(k)=angle((a1(k)./c1(k)))*180/pi;
end
%
%
for k=1:length(freq)
    k

length(freq)
s(k)=i*2*pi*freq(k);
r2(k)=1.724e-8/(pi*raio^2)*1;           %resistência do cobre (eletrodo)
[Ohm/m]

```

```

R2(k)=(p2(k)/(2*pi*H2)).*(log(4.*H2./raio)-1); %resistência transversal
[Ohm.m]
C2(k)=(p2(k)*eps(k))/R2(k);
%capacitânciatransversal [F/m]
L2(k)=(mi.*H2./(2*pi)).*(log(2.*H2./raio)-1); %ind. long.(TL-image) [H/m]

g12(k)=1./(R2(k).*H2);
l12(k)=L2(k)./H2;
c12(k)=C2(k)./H2;

z12(k) = (r2(k)+s(k).*l12(k));
y12(k) = g12(k)+s(k).*c12(k);

zo2(k)=sqrt(z12(k)/y12(k)); %impedância característica
gama2(k)=sqrt((r2(k)+s(k).*l12(k)).*(g12(k)+s(k).*c12(k))); %função de
propagação
za2(k)=zo2(k).*coth(gama2(k).*H2); %imped. harmôn. do eletrodo (no term.
emissor z=Va/Ia)

%formacao de q2

a2(k)=cosh(gama2(k).*H2);
b2(k)= zo2(k).*sinh(gama2(k).*H2);
c2(k)= (1./zo2(k)).*sinh(gama2(k).*H2);
d2(k)=a2(k);

q2(:, :, k)=[a2(k) b2(k); c2(k) d2(k)]; % formacao do quadripolo 2
Zeq2(k)=abs(a2(k)./c2(k));
fase2(k)=angle((a2(k)./c2(k)))*180/pi;
end

% resistividade do solo na camada 3
for k=1:length(freq)

    k
length(freq)
s(k)=i*2*pi*freq(k);
r3(k)=1.724e-8/(pi*raio^2)*0; %resistência do cobre (eletrodo)
[Ohm/m]
R3(k)=(p3(k)/(2*pi*H3)).*(log(4.*H3./raio)-1); %resistência transversal
[Ohm.m]
C3(k)=(p3(k)*eps(k))/R3(k);
%capacitânciatransversal [F/m]
L3(k)=(mi.*H3./(2*pi)).*(log(2.*H3./raio)-1); %ind. long.(TL-image) [H/m]

g13(k)=1./(R3(k).*H3);
l13(k)=L3(k)./H3;
c13(k)=C3(k)./H3;
z13(k) = (r3(k)+s(k).*l13(k));
y13(k) = g13(k)+s(k).*c13(k);

zo3(k)=sqrt(z13(k)/y13(k)); %impedância característica
gama3(k)=sqrt((r3(k)+s(k).*l13(k)).*(g13(k)+s(k).*c13(k))); %função de
propagação

```

```
za3(k)=zo3(k).*coth(gama3(k).*H3); %imped. harmôn. do eletrodo (no term.
emissor z=Va/Ia)
```

```
%formacao de q3
```

```
a3(k)=cosh(gama3(k).*H3);
b3(k)= zo3(k).*sinh(gama3(k).*H3);
c3(k)= (1./zo3(k)).*sinh(gama3(k).*H3);
d3(k)=a3(k);
```

```
q3(:,:,k)=[a3(k) b3(k); c3(k) d3(k)];%formacao do quadripolo 3
```

```
Zeq3(k)=abs(a3(k)./c3(k));
fase3(k)=angle((a3(k)./c3(k)))*180/pi;
```

```
end
```

```
%
```

```
for k=1:length(freq)% formacao do quadripolo equivalente
```

```
Q(:,:,k)=q1(:,:,k)*q2(:,:,k)*q3(:,:,k);
%Q(:,:,k)=q1(:,:,k)*q2(:,:,k);
Q(:,:,k)=q1(:,:,k);
```

```
A(k)=Q(1,1,k);
C(k)=Q(2,1,k);
```

```
Zeq(k)=abs(A(k)./C(k));
fase(k)=angle(A(k)./C(k))*180/pi;
```

```
Yeq(k)= 1./Zeq(k);
fase_adm(k)=-1*fase(k);
```

```
end
```

```
fonte= 20;
```

```
figure(1)
semilogx(freq,Zeq,'r-.','linewidth',2)
xlabel('Frequency (Hz)','Fontweight','bold','FontSize',fonte)
ylabel('|Z(\omega)| (\Omega)','Fontweight','bold','FontSize',fonte)
set(gca,'FontWeight','bold')
set(gca,'FontSize',fonte)
grid
```

```
figure(2)
semilogx(freq,fase,'r-.','linewidth',2)
xlabel('Frequency (Hz)','Fontweight','bold','FontSize',fonte)
ylabel('\angle Z(\omega) (deg)','Fontweight','bold','FontSize',fonte)
set(gca,'FontWeight','bold')
set(gca,'FontSize',fonte)
grid
```