

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

# **Avaliação das Condições de Malha de Aterramento em Instalações Elétricas**

Trabalho de Conclusão de Curso

Aluno: Allan Sousa e Silva

Orientador: Tarso Vilela

Maio de 2009

# **Avaliação das Condições de Malha de Aterramento em Instalações Elétricas**

Aluno:

---

Allan Sousa e Silva

Orientador:

---

Tarso Vilela

**Campina Grande – Paraíba**

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	04
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	05
1.1. Motivação	06
1.2. Objetivos	05
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	07
2.1. Aterramento Elétrico	07
2.1.1. Conceitos Básicos	07
2.1.2. Funções Básicas	11
2.1.3. “Aterramento do Sistema” e “Sistema de Aterramento”	13
2.1.4. Requisitos Básicos de um Aterramento	14
2.1.5. Técnicas para Melhoria da Resistência de Aterramento	14
2.2. Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)	16
2.2.1. Conceitos Básicos	16
2.2.2. Métodos de Proteção	18
<b>3. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO</b>	23
3.1. Medição de Resistência de Aterramento	23
3.1.1. Método da Queda de Potencial (3 terminais)	24
3.2. Medição de Resistividade do Solo	28
3.2.1. Medição <i>in loco</i>	30
3.2.1.1. <i>O Método de Frank Wenner</i>	30
3.2.1.2. <i>Considerações de Ordem Prática para o Método Wenner</i>	32
<b>4. ESTUDO DE CASO</b>	36
4.1. Estratificação do Solo	36
4.2. Resistência da Malha de Aterramento	39
<b>5. CONCLUSÃO</b>	41
<b>6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b>	42
<b>7. ANEXOS</b>	44

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido saúde, força e coragem, que foi essencial para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço, em particular, a algumas pessoas que contribuíram diretamente para realização deste sonho:

Meus pais Nivaldo e Toinha, meus irmãos Alisson e Anni, minha tia Francisca, minha namorada Karol e a toda a minha família que, com todo carinho e apoio, não mediram esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

As secretárias Adail e Rosilda, pelos incentivos e pelos apoios constantes.

Ao professor Tarso Vilela e ao colega Gilvan Júnior pela paciência na orientação, o apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão deste relatório.

Aos colegas Felipe e João Marcelo pela colaboração na realização das medições e tratamento dos dados levantados.

Ao Engenheiro Eletricista Ricardo Amadeu por nos disponibilizar o Projeto de Aterramento e SPDA do Residencial Solar das Acácias, para que pudéssemos fazer o estudo comparativo.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Motivação**

Nos últimos anos, tem havido por parte das concessionárias de energia elétrica uma maior preocupação referente à qualidade da energia entregue aos consumidores. Dentro deste contexto, os sistemas de aterramento têm um papel importante, principalmente quando se leva em conta a segurança das pessoas e equipamentos ligados às linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica.

Toda instalação elétrica de alta e baixa tensão, para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra riscos de acidentes fatais, deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto.

Um sistema de aterramento visa:

- Segurança de atuação da proteção;
- Proteção das instalações contra descargas atmosféricas;
- Proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas da instalação energizada acidentalmente;
- Uniformização do potencial em toda área do projeto, prevenindo contra tensões perigosas que possam surgir durante faltas que envolvam a fase e a terra.

O Brasil é o país com o maior índice de incidência de descargas atmosféricas do mundo, segundo levantamento do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os raios podem atingir as pessoas diretamente (cerca de um em um milhão). A maioria das mortes e acidentes ocorre pelos efeitos indiretos, que acontecem nas proximidades do local da queda de um raio.

Não é possível proteger completamente uma estrutura contra descargas atmosféricas. Os pára-raios, tecnicamente chamados de SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), atuam na proteção contra incidência direta e, mesmo assim, sempre haverá riscos, ainda que substancialmente minimizados, de ocorrerem descargas na edificação. A função desses sistemas é receber o raio e encaminhá-lo para dissipação no solo pelo caminho mais curto e rápido.

O nível de proteção desejável para uma edificação é definido pela NBR 5419/2005 – Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas. Na Norma estão disponíveis tabelas que classificam a edificação conforme o tipo de ocupação, de

construção, do conteúdo, localização e topografia da região. Conforme for a classificação da estrutura, a Norma indicará a necessidade de haver ou não SPDA, além do nível de proteção e respectiva eficiência.

Sabendo que as descargas atmosféricas têm preferência pelos prédios mais altos e com maior massa, escolheu-se como estudo de caso, o condomínio residencial Solar das Acássias por ser atualmente o mais alto da cidade de Campina Grande – PB.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do sistema de aterramento de um condomínio residencial e apresentar os resultados das medições de resistência de aterramento e resistividade de solo.

As medições foram feitas usando um terrômetro digital, modelo 6472, fabricado pela *AEMS Instruments*. Utilizou-se também um software comercial para o projeto de malhas de aterramento, TecAt Plus 5.2<sup>©</sup>.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Aterramento Elétrico**

Os critérios de aterramento de instalações de baixa tensão encontram-se bem estabelecidos na Norma NBR-5410/2004 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão), os quais são complementados com as recomendações da Norma NBR-5419/2005 (Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas). A adoção dos padrões, critérios e recomendações destas Normas proporciona proteção adequada às pessoas e edificações, às instalações elétricas de baixa tensão e aos equipamentos.

#### **2.1.1. Conceitos Básicos**

O aterramento padrão consiste de uma estrutura condutora enterrada propositalmente e que garanta um bom contato elétrico com a terra. O aterramento constitui-se, basicamente, de três componentes:

- As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);
- Terra que envolve os eletrodos.

O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo pode ser de natureza variada. Dependendo da aplicação, ele pode constituir-se em uma trilha numa placa de circuito impresso, na carcaça de um motor ou de um computador, um transformador de potência ou ainda, no neutro de um sistema elétrico.

Os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, os eletrodos constituem-se em qualquer corpo metálico enterrado no solo e podem ser divididos em alguns tipos:

##### **a) Eletrodos existentes (naturais):**

Prédios com estruturas metálicas são normalmente fixados por meio de longos parafusos na base das fundações de concreto. Esses parafusos engastados no concreto servem como eletrodos, enquanto que a estrutura metálica funciona como condutor de aterramento (Figura 1<sup>a</sup>). Neste caso, deve-se assegurar perfeita continuidade entre todas as partes metálicas.

##### **b) Eletrodos fabricados:**

Normalmente, são hastes de aterramento (Figura 1b). Preferencialmente deve constituir um anel circundando o perímetro da edificação.

c) Eletrodos encapsulados em concreto:

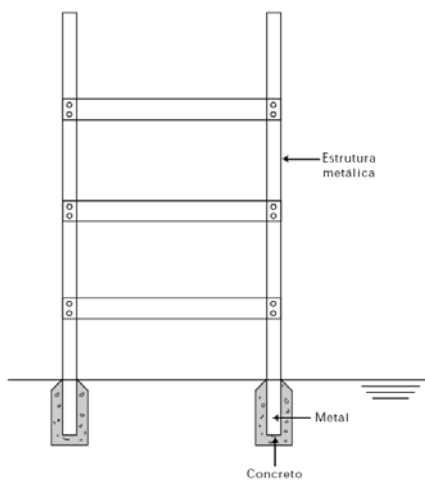
Uma vez que o concreto sob o nível do solo mantém sempre certo grau de umidade, seu valor de resistividade é baixo, na ordem de  $30\Omega\text{m}$  a  $20^\circ\text{C}$ , geralmente muito menor que o valor da resistividade do próprio solo onde está sendo construída a edificação ou estrutura.

Desta forma, o uso dos próprios ferros da armadura da edificação, colocados no interior do concreto das fundações (Figura 1c), representa uma solução pronta e de ótimos resultados. Qualquer que seja o tipo de fundação, deve-se assegurar a interligação entre os ferros das diversas “sapatas” (bases das estruturas de concreto), formando um anel. Essa interligação pode ser feita com o próprio ferro da estrutura, embutido em concreto ou por meio do uso de cabo cobre.

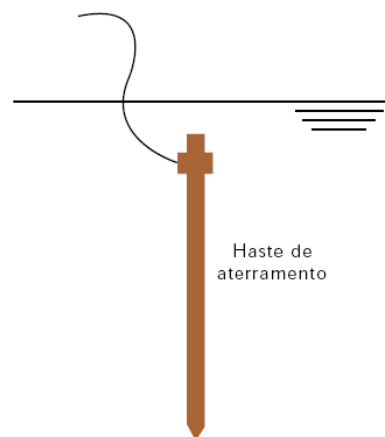
d) Outros eletrodos

Quando o terreno é muito rochoso ou arenoso, o solo tende a ser muito seco e de alta resistividade. Caso não seja viável o uso das fundações como eletrodo de aterramento, fitas metálicas ou cabos enterrados são as soluções técnica e economicamente adequadas (Figura 1d).

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve-se considerar que, em geral, uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para a terra. A perspectiva na qual o sistema “vê” o aterramento pode ser expressa através da sua impedância.

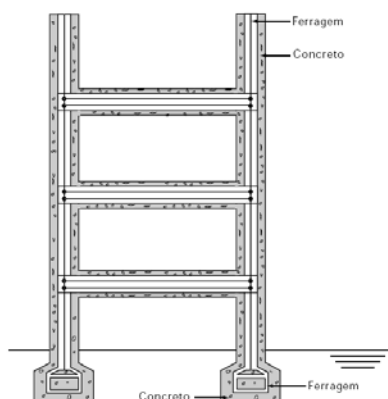


**Fig. 1a - Eletrodos existentes**

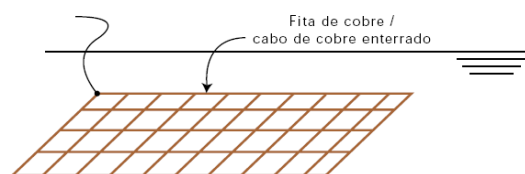


**Fig. 1b - Eletrodos Fabricados**





**Fig. 1c - Eletrodos encapsulados em concreto**

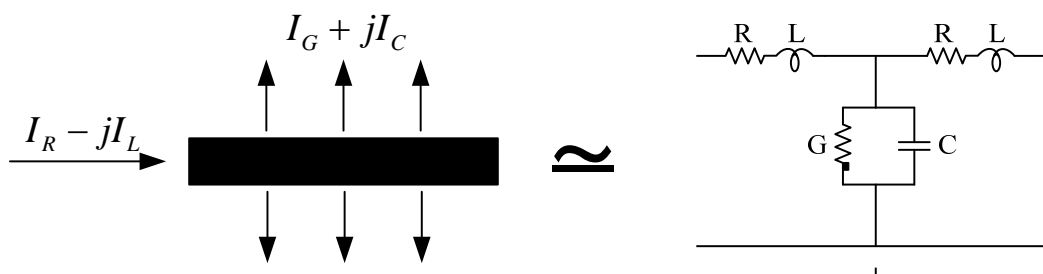


**Fig. 1d - Outros eletrodos.**

**Figura 1 - Esquemas dos tipos de eletrodos usados nos aterramentos.**

Essa impedância é denominada Impedância de Aterramento e pode ser definida como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos. Quantitativamente, ela é obtida através da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

Segundo Filho, S. V. (2005). A natureza da “Impedância de Aterramento” pode ser ilustrada pela Figura 2 que apresenta uma representação simplificada do aterramento por meio de um circuito equivalente.



**Figura 2 - Componentes de corrente no solo.**

Considerando uma porção limitada do eletrodo, observa-se que a corrente dissipada para o solo é composta por quatro componentes representadas na Figura 2. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. Em termos de um circuito equivalente, o cálculo das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série.

Por outro lado, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade  $\rho$  e permissividade  $\epsilon$ ) determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A

relação entre tais correntes não depende da geometria dos eletrodos, e sim da relação  $\sigma/\omega\epsilon$ , onde  $\sigma$  refere-se à condutividade do solo e  $\omega$  à frequência angular. A energia associada ao fluxo das correntes transversais pode ser computada por meio de uma condutância e uma capacitância, colocadas em paralelo no circuito equivalente.

Adicionalmente, devem ser considerados os efeitos mútuos (capacitivos, condutivos e indutivos) entre os diversos pontos dos eletrodos de aterramento. O equacionamento dessa questão contém certa complexidade, devido aos efeitos da propagação no solo.

Muitas aplicações não se referem à impedância de aterramento, mas a sua resistência devido aos efeitos reativos serem reduzidos para baixas frequências. Assim, a configuração resultante para o circuito equivalente se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo. Esse é o caso de ocorrências próximas às condições de regime em sistemas de potência, como curtos-circuitos.

O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada a um aterramento e a corrente resultante (neste caso, entende-se por tensão o potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito):

$$R_T = V/I. \quad (1)$$

Assim, é considerado como “Resistência de Terra” a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de um aterramento. Para se estabelecer uma idéia da ordem de grandeza, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui alta resistividade.

A presença do aterramento se manifesta na perspectiva do sistema quando flui corrente pelos seus eletrodos. Na ausência da mesma tem-se um potencial nulo nos eletrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas. Primeiramente, através de uma influência ativa, o seu valor pode ser determinante na limitação do valor de corrente que flui para o solo. Por outro lado, numa perspectiva passiva, deve-se considerar que o fluxo de corrente pelo aterramento resulta em uma elevação de potencial no solo, transmitido ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor da elevação de potencial  $V_T$  é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento.

$$V_T = R_T \cdot I. \quad (2)$$

### **2.1.2. Funções Básicas**

O aterramento pode desempenhar varias funções em um sistema e também assumir configuração muito diversificada em termos do posicionamento dos seus eletrodos no solo e de sua dimensão. Entretanto, suas aplicações estão sempre associadas a dois fatores fundamentais:

- Desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado;
- Questões de segurança (de seres vivos) e proteção (de equipamentos).

No primeiro caso, pode-se citar o uso do solo como condutor efetivo de retorno, quando uma corrente alternada ou contínua é injetada no aterramento ou, ainda, as funções associadas à proteção do sistema. No segundo caso, o aterramento pode ser um fator de segurança, por permitir o escoamento para a terra de cargas ou de correntes de descarga e, ainda, ao promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo, quando é injetada corrente em seus eletrodos.

É possível caracterizar um conjunto de aplicações em que se recorre ao uso do solo como condutor de eletricidade, associando-se às mesmas os aspectos de maior interesse, (Filho, S. V., 2005):

- a)** Uma ligação à terra pode constituir-se em um fator de segurança, por permitir o escoamento de cargas ou correntes de descarga. Consegue-se, por meio de tal prática, evitar ou pelo menos minimizar os efeitos indesejáveis de:
  - Energização (acidental ou por falha de isolamento) de partes metálicas de sistemas, expostas ao contato de pessoas e animais;
  - Carregamento de cargas estáticas em corpos ou equipamentos industriais, cuja descarga pode originar arcos elétricos ou irradiação eletromagnética. Pode-se citar o caso das fábricas de tecidos, onde o atrito entre materiais diferentes costuma carregar estaticamente os equipamentos, com risco de incêndio, na eventualidade de ocorrência do arco;
  - Descargas atmosféricas (pelo uso do pára-raios).
- b)** É possível limitar os níveis de potenciais ou a distribuição dos seus patamares a níveis seguros, por meio de práticas adequadas de aterramento:

- Tensões induzidas em corpos metálicos por fenômenos atmosféricos ou linhas energizadas próximas (por exemplo, tensões induzidas em cercas de arame por linha de transmissão paralela às mesmas) podem ser minimizadas pela conexão dos mesmos ao solo;
- Pode-se alcançar uma minimização dos gradientes de potencial na superfície do solo, por ocasião do fluxo de corrente no aterramento, pelo posicionamento adequado dos eletrodos no solo, com redução dos riscos para pessoas e animais presentes ao local, durante essas ocorrências.

**c) Uso da terra como um condutor de retorno.**

Em diversas aplicações, recorre-se ao solo como um condutor efetivo no circuito de alimentação. Podem ser citados, como exemplos, o sistema *MRT* (Monofásico com Retorno pela Terra), empregado na distribuição rural, os sistemas de transmissão em corrente contínua (CC) e diversos sistemas de tração elétrica. Nesses casos, são necessários cuidados especiais nos aterramentos, que constituem no ponto de injeção de corrente no solo.

**d) O aterramento de certos pontos do sistema, para influenciar no desempenho do mesmo.**

Essa prática, no caso de sistemas eletrônicos, pode resultar no estabelecimento de um potencial de referência para os circuitos.

Particularmente, a prática de se aterrar o neutro de sistemas polifásicos pode apresentar diversos aspectos de interesse, associados à filosofia de proteção do sistema. Quando ocorre uma falta no sistema, o desequilíbrio resultante gera correntes no solo, entre os pontos de aterramento. A proteção dos sistemas baseia-se justamente na detecção dessas correntes, que sensibilizam os dispositivos adequados, permitindo isolar prontamente os circuitos ou equipamentos faltosos.

O aterramento do neutro permite, ainda, em certos casos, limitar a níveis inferiores as sobretensões surgidas no sistema de alimentação, em relação à condição de sistema isolado. A definição dos níveis de solicitação do sistema é um importante fator econômico, em função do custo associado ao nível de isolamento.

### 2.1.3. “Aterramento do Sistema” x “Sistemas de Aterramento”

Segundo Filho, S. V. (2005), é possível estabelecer a distinção entre “Sistema de Aterramento” e “Aterramento de Sistema”. Enquanto o primeiro termo se relaciona ao sistema físico referido anteriormente, a expressão “aterramento de sistema” corresponde à forma como o sistema elétrico é conectado ao solo. Nesse caso, existem basicamente três tipos de práticas:

- *Sistema isolado*

Não existe conexão condutiva proposital entre o sistema elétrico e o solo. O acoplamento entre ambos é fraco e se faz prioritariamente de forma capacitiva. O nível máximo das sobretensões possíveis nesse tipo de sistema é elevado e existem dificuldades na localização de eventuais faltas para terra. Esta forma é utilizada nas aplicações em que interessa priorizar a continuidade de serviço.

- *Sistema solidamente aterrado*

Alguns pontos do sistema elétrico são conectados diretamente à terra, procurando-se um caminho de mínima impedância à passagem de eventual corrente de falta para o solo. Os valores elevados da corrente resultante nessa eventualidade sensibilizam os dispositivos de proteção, os quais prontamente comandam o desligamento da parte faltosa do sistema. Muitas vezes, a intensidade das correntes as torna muito destrutiva para os componentes do sistema. As sobretensões são controladas mais facilmente neste caso, sendo a forma mais usual de aterramento de sistemas no Brasil.

- *Sistema aterrado por impedância*

Neste caso, é interposta propositalmente uma impedância (resistência ou reatância) entre o sistema elétrico e seu aterramento físico, que procura limitar o valor da corrente de eventual falta, sem eliminar a ligação condutiva do sistema ao solo. Tal forma de aterramento tenta implementar uma condição intermediária entre as duas alternativas citadas anteriormente, reunindo as vantagens de cada qual. Modernamente, com o avanço da tecnologia digital para detecção de baixas correntes de falta, tem crescido significativamente a aplicação deste tipo de aterramento, principalmente o de aterramento por alta impedância. Algumas projeções apontam que essa tendência deve prevalecer para o aterramento de sistemas industriais, num futuro próximo.

#### **2.1.4. Requisitos Básicos de um Aterramento**

Segundo Filho, S. V. (2005) um aterramento deve apresentar basicamente três características:

- Capacidade de condução;
- Baixo valor de resistência;
- Configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial.

De uma forma geral, espera-se que um aterramento tenha suficiente capacidade de dispersão para o solo de determinados valores de corrente, sem, contudo, permitir que os potenciais na superfície deste solo atinjam níveis comprometedores à segurança do pessoal, por ocasião de uma falta. Nessa perspectiva, é possível agrupar os aterramentos em: “aterramentos de serviço”, quando desempenham efetivamente uma função elétrica no sistema ou circuito elétrico, e “aterramento de segurança”, quando sua finalidade é evitar riscos para a vida no local.

Em qualquer projeto, deve ser assegurado que todos os tipos de proteções necessárias (choque, descarga atmosférica direta, sobretensões, equipamentos eletrônicos, descargas eletrostáticas) se juntem em um único ponto de aterramento garantindo, assim, a tão desejada e fundamental equipotencialidade. Este ponto de convergência do sistema de aterramento de uma instalação elétrica é o chamado TAP (Terminal de Aterramento Principal).

Em algumas situações, não é possível alcançar valores reduzidos de resistência de aterramento, para as restrições impostas em condições práticas (por exemplo, valores elevadíssimos de resistividade do solo e restrições na dimensão da planta onde o aterramento deve ser instalado). Nesses casos, o valor absoluto da resistência de aterramento deixa de ser o fator mais importante, logo é possível assegurar o desempenho eficiente do sistema, através da adoção de abordagens mais abrangentes de proteção, que podem incluir práticas de equipotencialização e o recurso a técnicas e dispositivos específicos, como transformadores isoladores e supressores de surto.

#### **2.1.5. Técnicas para Melhoria da Resistência de Aterramento**

Muitas vezes, após a instalação de um aterramento, observa-se através de medições que o valor da sua resistência é superior ao valor desejado. Nesses casos empregam-se normalmente algumas técnicas capazes de melhorar (diminuir) o valor da resistência de terra. Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistividade do

solo nas proximidades do eletrodo, ou alterando as condições dos eletrodos de aterramento, ou ainda, fazendo aplicação dessas duas possibilidades simultaneamente.

Pode-se conseguir diminuir bastante a resistência de aterramento aumentando o número de eletrodos em paralelo. Contudo, deve-se lembrar que os eletrodos devem estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A partir de certo número de eletrodos em paralelo, a colocação de novos eletrodos torna-se ineficaz.

Quando o solo apresenta camadas mais profundas de menor resistividade, o aprofundamento dos eletrodos se torna uma técnica bastante eficaz, pois com a emenda de hastes verticais consegue-se atingir camadas de melhor condução. Se o solo é homogêneo, a eficácia da técnica é reduzida para profundidades superiores a 3,5 m.

Muitas vezes, aplicadas estas técnicas, não se consegue diminuir a resistência do terra significativamente. Somente nessa situação devemos pensar em tratar quimicamente o solo.

O tratamento químico tem uma grande desvantagem em relação às demais técnicas, pois a terra, aos poucos, absorve os elementos adicionados. Com o passar do tempo sua resistência volta a aumentar, o que faz dessa técnica a última alternativa a ser utilizada.

Temos vários produtos que podem ser colocados no solo antes ou depois da instalação de hastes para diminuirmos a resistividade do solo. A Betonita e o Gel são os mais utilizados. De qualquer forma, o produto a ser utilizado para essa finalidade deve ter as seguintes características:

- Não ser tóxico;
- Deve reter umidade;
- Bom condutor de eletricidade;
- Ter pH alcalino (não corrosivo);
- Não deve ser solúvel em água.

Vale salientar que é proibido (por norma), no que se refere a instalações de baixa tensão, o tratamento químico do solo para equipamentos a serem instalados em locais de acesso público. Essa medida visa à segurança das pessoas nesses locais.

## **2.2. Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**

O raio é um fenômeno da natureza que desde os primórdios vem intrigando o homem, tanto pelo medo provocado pelo barulho, quanto pelos danos causados.

Após várias civilizações o homem acabou descobrindo que o raio é um fenômeno de natureza elétrica e por isso deve ser conduzido o mais rapidamente possível para o solo, a fim de minimizar seus efeitos destrutivos.

O primeiro cientista a perceber que se tratava de um fenômeno elétrico foi Benjamin Franklin (1752), que na época afirmou que após a colocação de uma ponta metálica em cima de uma casa, esta atrairia os raios para si e a edificação estaria protegida contra raios, caindo estes na ponta metálica.

Após alguns anos, tomou conhecimento de edificações que tinham sido atingidas e o raio não havia caído na ponta metálica. Assim sendo, reformulou sua teoria e afirmou que a ponta metálica seria o caminho mais seguro para levar o raio até o solo com segurança caso a ponta seja atingida por um raio. A partir daí começou-se a definir a região até onde esta ponta teria influência (séc. XVIII – Gay Lussac) e começou-se a esboçar os primeiros cones de proteção, cuja geratriz era função de um ângulo pré definido, resultando num cone com um raio de proteção. Este ângulo foi reduzido com o passar dos anos e hoje é função do grau de exposição da edificação, bem como dos riscos materiais e humanos envolvidos.

### **2.2.1. Conceitos Básicos**

A descarga elétrica atmosférica (raio) é um fenômeno da natureza absolutamente imprevisível e aleatório, tanto em relação às suas características elétricas (intensidade de corrente, tempo de duração, etc.), como em relação aos efeitos destruidores decorrentes de sua incidência sobre as edificações.

Nada em termos práticos pode ser feito para se impedir a "queda" de uma descarga em determinada região. Não existe "atração" a longas distâncias, sendo os sistemas, prioritariamente, receptores. Assim sendo, as soluções internacionalmente aplicadas buscam minimizar os efeitos destruidores a partir da colocação de pontos preferenciais de captação e condução segura da descarga para a terra.

Um sistema completo destinado a proteger uma estrutura contra os efeitos das descargas atmosféricas é composto de um sistema externo de proteção, que consiste em subsistemas de captadores, condutores de descidas e de aterramento; e outro interno, que



consiste num conjunto de dispositivos que reduzem os efeitos elétricos e magnéticos da corrente de descarga atmosférica dentro do volume a proteger.

A instalação de um pára-raios, tecnicamente chamado de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), é a prevenção mais adequada para proteger uma edificação e as pessoas que estejam em seu interior. Tem como objetivo encaminhar a energia do raio, desde o ponto que ele atinge a edificação até o aterramento, o mais rápido e seguro possível.

O SPDA tem como principais funções:

- Neutralizar, pelo poder de atração das pontas, o crescimento do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, por meio do permanente escoamento de cargas elétricas do meio ambiente para a terra.
- Oferecer à descarga elétrica que for cair em suas proximidades um caminho preferencial, reduzindo os riscos de sua incidência sobre as estruturas.

Não é função do sistema de pára-raios proteger eletro-eletrônicos (comando de elevadores, interfones, portões eletrônicos, centrais telefônicas, subestações, etc), pois mesmo uma descarga captada e conduzida a terra com segurança, produz forte interferência eletromagnética, capaz de danificar equipamentos.

Mesmo com a instalação de um sistema de pára-raios, há sempre a possibilidade de falha desse sistema, podendo a construção protegida, neste caso, ser atingida por uma descarga atmosférica. A partir dessa premissa, a IE-1024-I, determina quatro diferentes níveis de proteção, com base nos quais devem estar tomadas decisões de projeto mais ou menos severas. Esses níveis de proteção estão assim definidos:

- *Nível I:* é o nível mais severo quanto à perda de patrimônio. Refere-se às construções protegidas, cuja falha no sistema de pára-raios pode provocar danos às estruturas adjacentes, tais como as indústrias petroquímicas, de materiais explosivos, etc.
- *Nível II:* refere-se às construções protegidas, cuja falha no sistema de pára-raios pode ocasionar a perda dos bens de estimável valor ou provocar pânico aos presentes, porém sem nenhuma consequência para as construções adjacentes. Enquadram-se neste nível os museus, teatros, estádios, etc.
- *Nível III:* refere-se às construções de uso comum, tais como os prédios residenciais, comerciais e industriais de manufaturados simples.

- *Nível IV*: refere-se às construções onde não é rotineira a presença de pessoas. São feitas de material não inflamável, sendo o produto armazenado nelas de material não combustível, tais como armazéns de concreto para produtos de construção.

### **2.2.2. Métodos de Proteção**

Uma vez feita a análise de necessidade de proteção de uma determinada estrutura, e determinado o nível de proteção necessária, o primeiro passo é se escolher o sistema de proteção.

Qualquer que seja o sistema de proteção escolhido, sempre existirá os três componentes a seguir:

- *Sistema de Captores* – Tem como função receber os raios, reduzindo ao mínimo a probabilidade da incidência ser diretamente na estrutura. Deve ter a capacidade térmica e mecânica suficiente para suportar o calor gerado no ponto de impacto, bem como os esforços eletromecânicos resultantes. Além disto, o ataque por poluentes deve ser levado em conta na hora de seu dimensionamento;
- *Sistema de descida* – Tem como função conduzir a corrente de descarga até o sistema de aterramento, reduzindo ao máximo a incidência de descargas laterais e de campos eletromagnéticos no interior do volume protegido. Deve ainda ter a capacidade térmica e mecânica suficiente para suportar o calor gerado pela passagem da corrente.
- *Sistema de Aterramento* – Tem como função dispersar no solo a corrente recebida pelos captores e conduzida pelos condutores até o solo, reduzindo ao mínimo o risco de ocorrência de tensões de passo e de toque. Deve resistir ao calor gerado e deve resistir ao ataque corrosivo dos diversos tipos de solos.

Existem basicamente três métodos de proteção contra descargas atmosféricas, são eles: Eletromagnético, Franklin e Gaiola de Faraday.

#### **a) Método Eletromagnético:**

Este método consiste em fazer rolar uma esfera, que terá um raio definido em função do nível de proteção, por toda edificação. Os locais onde a esfera tocar a edificação são os locais mais expostos a descargas, ou seja, os locais onde a esfera toca, o raio também pode tocar, devendo estes serem protegidos por elementos metálicos (captors Franklin ou condutores metálicos).

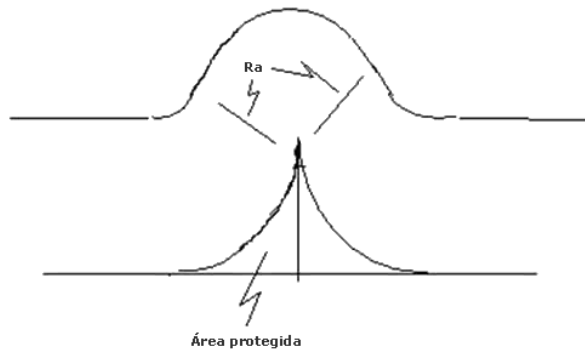
Se considerarmos um captor como uma haste vertical de altura H sua zona de proteção será definida pela equação de uma esfera que define a superfície de proteção:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 . \quad (3)$$

Onde:  $x_0$  e  $y_0$  – coordenadas de um ponto genérico da superfície

$x$  e  $y$  – coordenadas do centro da esfera

$R$  – raio da esfera (distancia de atração) conforme Figura 3.



**Figura 3 - Esquema da proteção de uma haste por uma esfera fictícia.**

Pela norma NBR 5419/2005 o Raio de atração ( $Ra$ ) é dado pela Tabela 1:

**Tabela 1 - Raio de atração.**

Nível	I	II	III	IV
<b>Raio da esfera (m)</b>	20	30	45	60

Assim, toda estrutura a ser protegida tem que estar dentro do volume formado pelo deslocamento da esfera pelo condutor.

### **b) Método de Franklin**

O método proposto por Franklin tem por base uma haste elevada em forma de ponta que produz, sob a nuvem carregada, uma alta concentração de cargas elétricas, juntamente com um campo elétrico intenso. Isto produz a ionização do ar, diminuindo a altura efetiva de nuvens carregadas, o que propicia o raio através do “rompimento” da rigidez dielétrica da camada de ar. Também utiliza a propriedade das pontas metálicas

de propiciar o escoamento das cargas elétricas para a atmosfera, chamado de *poder das pontas*.

Assim, este método consiste em determinar o volume de proteção propiciado por um cone, cujo ângulo de geratriz com a vertical varia segundo o nível de proteção desejado e para uma determinada altura da construção. A Tabela 2, conforme NBR 5419/2005, fornece o ângulo máximo de proteção para uma altura da construção não superior a 20 m.

**Tabela 2 - Ângulo de proteção.**

Nível de Proteção	Ângulo de Proteção (°)
I	25
II	35
III	45
IV	55

Já a Tabela 3, conforme NBR 5419/2005, fornece o ângulo de proteção contra descargas atmosféricas tomando como base diferentes alturas de construção.

**Tabela 3 - Ângulo de proteção (°) e altura da construção.**

Nível de Proteção	Altura da construção (m)				
	20	30	45	60	> 60
I	25				
II	35	25			
III	45	35	25		
IV	55	45	35	25	



Não é permitida a proteção pelo método de Franklin

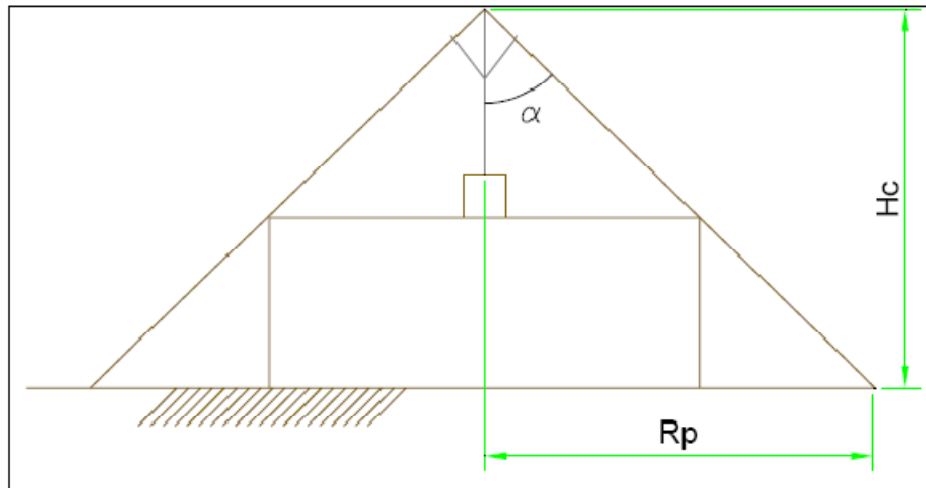
O pára-raios oferece uma proteção dada por um cone cujo vértice corresponde à extremidade superior do captor e cuja geratriz faz um ângulo  $\alpha$  com a vertical, propiciando um raio de base do cone de valor dado pela equação (4), conforme se observa na Figura (4).

$$R_p = H_c \times \tan \alpha . \quad (4)$$

Onde:  $R_p$  – raio de base do cone de proteção, em m;

$H_c$  – altura da extremidade do captor, em m;

$\alpha$  – ângulo de proteção com a vertical dado na Tabela 3. Se houver mais de um captor, pode-se acrescentar  $10^\circ$  ao ângulo  $\alpha$ .



**Figura 4 – Ilustração da zona de proteção.**

Deve-se estabelecer uma proteção de borda da parte superior da edificação, através de um condutor pondo a malha de interligação dos captores.

**c) Método de Faraday**

Este método consiste em envolver a parte superior da construção com uma malha captora de condutores elétricos nus, cuja distância entre eles é função do nível de proteção desejado e dado pela Tabela 4, conforme NBR 5419/2005.

**Tabela 4 – Dimensões máximas (Gaiola de Faraday).**

<p><math>b \leq 2 \times a</math></p>	<b>Nível de Proteção</b>	<b>Largura da malha (a)</b>
	I	05 m
	II	10 m
	III	15 m
	IV	20 m

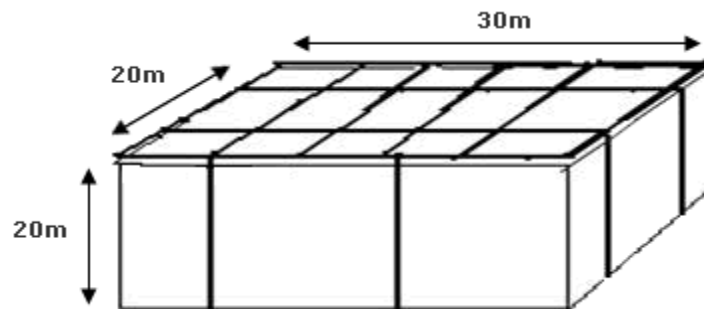
O número de condutores da malha ( $N_{CM}$ ) pode ser determinado para qualquer dimensão da malha, pela equação (5):

$$N_{CM} = \frac{D_M}{D_{CO}}. \quad (5)$$

Onde:  $D_M$  – dimensão da área plana da malha captora no sentido da largura e do comprimento, em m;

$D_{CO}$  – distancia entre os condutores, em m (Tabela 4);

É prudente a instalação de hastes verticais ligadas ao longo da malha de proteção e distanciadas de cerca de 8 m. o comprimento das hastes verticais deve ser de 50 cm, no mínimo. Na Figura 5 pode ser observado um volume protegido por uma malha 5 x 10 em método de Faraday.



**Figura 5 – Esquema do volume protegido por uma malha 5 x 10 em método de Faraday.**

O método de Faraday tem recebido, ultimamente, a preferência dos projetistas. No método de Franklin a interligação das hastes suportes dos captadores pode conduzir a uma malha no topo da construção de dimensões tais, que resultam praticamente nas dimensões necessárias à aplicação do método de Faraday.

### **3. Técnicas de Medição**

#### **3.1. Medição de Resistência de Aterramento**

A medição da resistência de aterramento pode ser quantificada pela razão entre o potencial do sistema de aterramento em relação a um ponto infinitamente afastado e a corrente que flui entre o aterramento e o ponto.

A medição da resistência de aterramento é feita usando corrente alternada, para evitar a interferência dos efeitos galvânicos no solo na detecção da queda de tensão resistiva.

A resistência de aterramento pode ser obtida indiretamente pelo cálculo da relação  $R_T = V/I$ . A diferença desse método em relação aos instrumentos de medição de resistência de aterramento consiste no fornecimento direto do valor da resistência, já estabelecendo a relação entre as grandezas tensão e corrente.

Na aplicação de métodos de medição, recomenda-se que o sistema a ser medido esteja desenergizado por questões de segurança (NR-10, 2004). Ainda nessa condição, são necessários cuidados especiais, pois o operador que realiza as medições pode estar em contato com condutores aterrados em pontos distantes. Eventualmente, a existência de diferença de potencial entre tais pontos pode gerar o fluxo de corrente através dos condutores. Ao fazer as conexões para medição, o operador pode efetuar, com o seu corpo, o fechamento do circuito para circulação da corrente, o que pode submetê-lo à condições severas de risco.

Além disso, devem ser observadas certas condições para realização das medições. Por exemplo, elas não devem ser efetuadas em solo úmido, pois a umidade tende a diminuir o valor de resistência. É aconselhável registrar a temperatura ambiente, umidade do ar, profundidade dos eletrodos de prova, dimensões e forma do sistema de aterramento, distâncias e direções das medições, dentre outras.

Apresenta-se a seguir o método usual para realização da medição da resistência de aterramento. Como critério principal, utiliza-se o método para malhas de aterramento desenergizadas. Porém dependendo do isolamento do terrômetro, torna-se possível a realização deste tipo medição com a subestação energizada.

### 3.1.1. Método da queda de potencial (3 terminais)

Para implementação do método da queda de potencial com 3 terminais, faz-se uma montagem conforme Figura 6. Estabelece-se uma tensão entre o sistema de aterramento representado pelo eletrodo  $X$  e o eletrodo de corrente  $C$ , fincado no solo a uma distância do aterramento  $X$  bem maior que as dimensões lineares do sistema. Isto resulta no fluxo de uma corrente  $I_T$  entre os eletrodos. A corrente provoca uma queda de potencial no solo e parte dessa queda é detectada pelo voltímetro através da haste sonda  $P$ , fincada no solo entre  $X$  e  $C$ , alinhado com os mesmos.

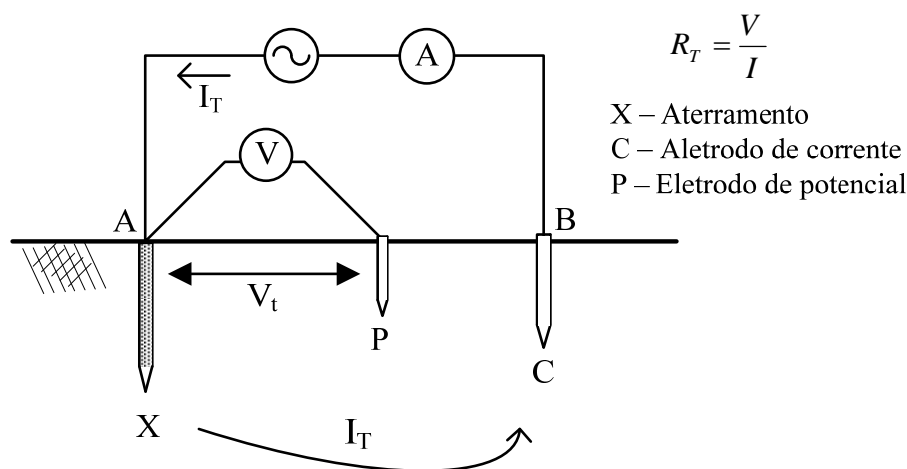
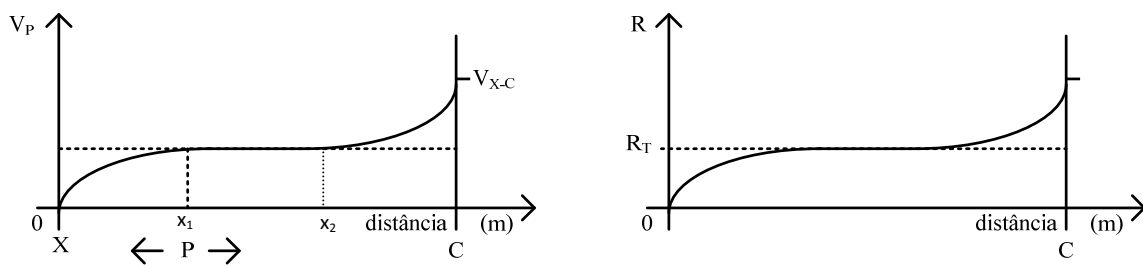


Figura 6 – Esquema da montagem da medição pelo Método da Queda de Potencial.

Ao se deslocar o eletrodo de potencial entre  $X$  e  $C$ , registrando-se a cada ponto a indicação do voltímetro, obtém-se o perfil de potencial entre os dois eletrodos (Figura 7). Estabelecendo-se a razão entre a queda de tensão detectada e a corrente que flui entre os eletrodos  $X$  e  $C$ , obtém-se um valor de resistência. Considerando-se que a corrente que flui entre os eletrodos tem valor eficaz constante, observa-se que a curva da resistência medida em função da distância tem exatamente a mesma forma do perfil de potencial. Isso se deve ao fato da curva da resistência ter sido construída ponto a ponto a partir da divisão da tensão do ponto correspondente na curva do perfil de potencial pela intensidade da corrente.

Conforme definição apresentada anteriormente, identifica-se na curva o valor da resistência do aterramento como a resistência correspondente à região do patamar de potencial, onde se localiza aproximadamente o “terra remoto”.





**Figura 7 – Perfil de potencial e sua relação com a corrente em função da distância**

Na parte inicial da curva (entre X e  $x_1$ ), o potencial é sensivelmente crescente. A maior parte da resistência de um aterramento localiza-se na terra mais próxima ao mesmo. À medida que se afasta do eletrodo, a área de condução de corrente vai se ampliando e a resistência da “fatia” do solo correspondente a esta superfície vai diminuindo cada vez mais. Para pontos muito distantes tal resistência torna-se desprezível. Os pontos da curva correspondem justamente à somatória da queda de tensão que ocorre na resistência de cada elemento de volume desde o ponto X até o ponto  $x_1$  em consideração. Ponderando-se que a corrente que atravessa cada superfície é a mesma e que a resistência das fatias elementares de solo vai diminuindo à medida que se afasta do aterramento, conclui-se que a queda de tensão é cada vez menor para os volumes elementares, embora a somatória destas seja ainda crescente. Isso justifica o formato da curva antes do patamar (crescente e com derivada decrescente entre X e  $x_1$ ).

Entre os pontos  $x_1$  e  $x_2$ , a área de seção de condução é tão ampla que resulta numa densidade de corrente diminuída, sendo, então, a queda de tensão desprezível entre os dois pontos. Esta região é conhecida como patamar de potencial. A diferença de potencial entre os pontos nas extremidades do patamar correspondem a menos de 2% do potencial obtido entre X e  $x_1$ . Em termos práticos, pode-se dizer que se localiza nesse patamar o “terra remoto” (ponto ao qual se atribui potencial zero e que está infinitamente afastado do aterramento), pois quase toda a diferença de potencial entre o eletrodo X e um ponto infinitamente afastado se localiza até o patamar (cerca de 98%).

A partir de  $x_2$ , as áreas de condução começam a diminuir, pois, ao convergir para o eletrodo C, a corrente tem de atravessar superfícies hemisféricas centradas nesse eletrodo de área cada vez menor. Conseqüentemente, a resistência dos elementos de volume correspondente aumenta com a aproximação de C. Isso justifica não apenas a

característica crescente da curva, mas também a característica crescente de sua derivada, à medida que se aproxima de C.

Observa-se nesta curva uma separação bem nítida entre a queda de tensão no aterramento X e aquela no aterramento de C, separação esta constituída pelo patamar de potencial. Isto ocorre porque os eletrodos X e C foram considerados suficientemente afastados.

- *Considerações de ordem prática para o método da queda de potencial*

Na aplicação do método da queda de potencial, o eletrodo de corrente C deve ser colocado a uma distância do centro elétrico do aterramento (aproximadamente igual ao centro geométrico) superior a 3 ou 4 vezes a maior dimensão linear do aterramento. Aconselha-se que a distância não seja inferior a 40 metros para pequenos aterramentos e a 100 metros no caso de malhas. O eletrodo de potencial P, colocado a aproximadamente 60% da distância entre o centro elétrico da malha e o eletrodo de corrente e em linha com estes, normalmente está na região do patamar. O eletrodo de potencial tem sua localização gradativamente variada ao longo da direção, efetuando-se uma medição para cada posição, de forma a gerar uma curva semelhante àquela da Figura 7, da qual se obtém o valor da resistência do aterramento, IEEE STD 80 (1986). Na prática, são necessárias apenas três medições para se avaliar o posicionamento sobre o patamar. Variando-se de 10% (de XC) a posição da haste de potencial em torno do ponto inicial de medição, verifica-se se o valor de resistência medido tem uma variação compatível com sua eventual localização no patamar de potencial (variação de resistência inferior a 2%). Nesse caso, toma-se o valor médio como a Resistência de Aterramento.

No caso da curva gerada não apresentar o patamar, isto se deve possivelmente devido à excessiva proximidade entre o eletrodo de corrente e a malha, havendo superposição nas suas regiões de aterramento. Assim, recomenda-se um aumento do afastamento do eletrodo de corrente e a repetição do processo até que sejam obtidos resultados satisfatórios. Para algumas malhas são necessárias distâncias superiores a 500 metros.

Existe, entre diversos autores, uma discussão acerca da posição inicial do eletrodo de potencial (50 ou 62% da distância XC). O posicionamento do patamar depende fortemente das características do solo, que em princípio não são conhecidas no

momento da medição. As medições devem ser efetuadas no patamar, o que pode ser determinado facilmente pelas recomendações anteriores.

Os eletrodos de prova devem estar firmemente cravados no solo. No caso do eletrodo de corrente (*C*), o mesmo deve atingir uma profundidade superior a 0,50 m, para se assegurar uma baixa resistência de aterramento para o mesmo. Isso é importante, pois o valor dessa resistência é usualmente, muito superior àquele da resistência do aterramento sob teste, o que pode torná-lo um elemento limitador da corrente fornecida pelo instrumento de medição, com possível comprometimento dos resultados alcançados. Quanto ao eletrodo de potencial, a corrente que o percorre é muito reduzida, de forma que a queda de tensão no seu aterramento não é importante, não sendo necessário cravá-lo tão profundamente.

A aplicação do processo em mais de uma direção é aconselhável o que aumenta a confiabilidade dos resultados. A comparação dos resultados obtidos para a resistência nas diferentes direções permite verificar a consistência dos mesmos. Em algumas situações identifica-se, por tal comparação, uma falsa identificação do patamar de potencial, associada à presença de um condutor no solo, estendido na direção de medição e que poderia levar a valores errados de resistência. O condutor no solo modifica a distribuição de potencial, tendendo a “equipotencializar” a região próxima ao seu comprimento.

É necessário um cuidado especial nas medições de grandes sistemas de aterramento, que possuem geralmente valores baixos de resistências. Nesses casos são sempre necessárias grandes distâncias entre os eletrodos de corrente e potencial e, conseqüentemente, condutores longos. Como usualmente, os três eletrodos são posicionados em linhas, os condutores longos necessariamente estarão estendidos próximos, podendo apresentar um valor apreciável de impedância mútua, possível fonte de erros nas medições.

Quando se considera que a resistência medida é da ordem de  $0,1 \Omega$ , fica evidente a importância da consideração dos efeitos citados para evitar erros, Endrenvy, J. (1962). Uma solução recomendada para tais medições é a colocação de eletrodo de potencial do lado oposto ao do eletrodo de corrente e preferencialmente na mesma reta que contém os pontos *X* e *C*. Observa-se que a curva obtida ao se deslocar o eletrodo *P* na direção escolhida tende para um patamar, pois não inclui o efeito das quedas de tensão na área do aterramento do eletrodo de corrente, IEEE STD 80 (1986). O posicionamento do

eletrodo de potencial numa direção ortogonal ao segmento  $X-C$  é, também, uma prática adotada para minimização dos efeitos mútuos.

Outro aspecto comprometedor no caso de sistemas muito extensos (por exemplo, grandes subestações) é a demanda de longas distâncias para posicionamento dos eletrodos auxiliares de corrente e tensão. Como a corrente e a tensão geradas pelos instrumentos de medição são relativamente baixas, com o aumento das distâncias a diferença de potencial por unidade de comprimento vai se reduzindo, aumentando a importância relativa de sinais intrusos (ruídos ou harmônicos), eventualmente presentes no solo, os quais podem interferir na medição. Nesse caso, uma alternativa que tem sido adotada, na aplicação do método é a energização da malha diretamente a partir de uma subestação próxima que funcionará como fonte de tensão, usando os próprios condutores da linha de transmissão para conduzir e injetar valores elevados de corrente na malha de aterramento. Consegue-se, dessa forma, ampliar significativamente os níveis de potencial no solo, facilitando-se a localização do patamar de potencial e minimizando-se o efeito de interferência de sinais intrusos.

O método de medição da queda de potencial é mais empregado, o que se deve primordialmente a dois fatores: sua exatidão e, principalmente, a avaliação imediata da consistência dos seus resultados. A exatidão é decorrente de praticamente não haver queda de tensão nos condutores do circuito voltimétrico, pois a corrente que percorre o circuito é desprezível e a resistência interna do circuito é muito elevada se comparada àquelas dos condutores de ligação e do aterramento do eletrodo sonda  $P$  (a corrente principal não passa pelo circuito voltimétrico, mas pelo amperimétrico).

### **3.2. Medição de Resistividade do Solo**

Ao se projetar um sistema de aterramento, alguns fatores são decisivos para o seu bom desempenho. Por isso, cuidado especial é necessário. Segundo Mattos, M. A. (2004), partindo do princípio que o aterramento atua como um casador de impedâncias, o conhecimento das características intrínsecas do solo, onde a estrutura projetada será instalada, torna-se de extrema valia. De forma mais abrangente, tais características podem ser representadas pela resistividade do solo, que por definição, é a resistência elétrica ( $R$ ) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias,

preenchido pelo solo a ser analisado, Kindermann, G. (2002), satisfazendo a seguinte equação:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l}. \quad (6)$$

Onde:  $\rho$  – resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ );

$R$  – resistência elétrica ( $\Omega$ );

$A$  – área de uma face do cubo em  $m^2$ ;

$l$  – o comprimento das arestas do cubo em metros.

Alguns fatores influenciam diretamente na resistividade do solo, entre eles destaca-se a umidade do solo, que é um fator determinante na variação da condução de cargas elétrica. Em baixas frequências a condução é realizada por mecanismos eletrolíticos. Dessa forma, à medida que a umidade aumenta, os sais presentes no solo dissociam-se, de maneira a formar um meio eletricamente favorável à passagem de corrente elétrica. Portanto, a exposição de um mesmo tipo de solo à situações adversas de umidade traduz diferentes valores na resistividade do solo. Medições (em campo) da resistividade são aconselhadas em períodos de estiagem, ou seja, dias nos quais o solo apresenta maiores valores de resistividade (dificilmente encontram-se solos perfeitamente secos), retratando assim, o pior caso possível.

Teoricamente, a resistividade do solo é calculada através da equação (6). Entretanto, a composição da grande maioria dos solos é estratificada, ou seja, formada por subcamadas, cada qual, com seu valor de  $\rho$  específico. O solo apresenta ainda outras características interessantes, dentre elas a anisotropia (característica própria de certos minerais que se manifesta de modo diferente, conforme a direção cristalográfica considerada). Falhas geológicas ou camadas mais profundas que afloram, provocando descontinuidade na superfície são exemplos típicos de solos anisotrópicos. Dessa forma, a resistividade pode assumir diferentes valores à medida que diferentes sentidos de medição são realizados. Para contornar tal problema, é calculado um valor médio de resistividade (calculada em algumas direções), denominada resistividade efetiva do solo, Filho, S. V. (2005). Outros fatores, tais como, temperatura, granulidade e compactação (causada pela pressão exercida no solo), também afetam a resistividade.

O comportamento da resistividade em casos reais não se faz de maneira tão simples, pois fatores como a umidade e a temperatura estabelecem uma relação entre todos os fatores. Portanto, o projeto de um sistema de aterramento deve estar baseado em valores de resistividade coletados no local de implantação da estrutura.

Existem basicamente duas maneiras de se medir a resistividade do solo: a medição por amostragem, que é realizada em laboratório através de pequenas quantidades do solo desejado (coletados a certa profundidade, onde o terreno é mais imune as alterações ambientais); a medição *in loco*, cujos detalhes são apresentados.

### **3.2.1. Medição *in loco***

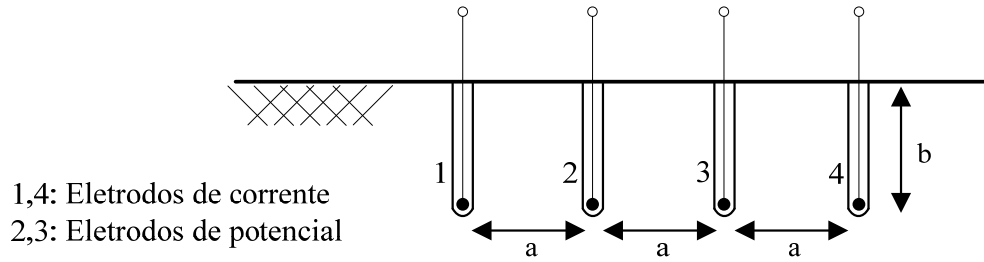
Os inconvenientes do processo de medição por amostragem fazem da medição *in loco* o tipo mais empregado.

Se a terra fosse um corpo de dimensões bem definidas, a medição da resistividade do solo no local seria simples: injetaria-se no solo uma corrente de valor conhecido, detectando-se a queda de tensão resistiva causada no solo. Estabelecendo-se a relação entre tensão e corrente, obter-se-ia a resistência  $R$  do solo. Conhecendo-se a resistência do solo e as suas dimensões lineares, obter-se-ia o valor da sua resistividade para uma configuração cilíndrica mostrado por (6). Porém, a terra é um corpo tridimensional que não apresenta dimensões definidas para o percurso de corrente.

A despeito das dificuldades, *Frank Wenner* desenvolveu um método simples de medição, no qual ele mostra que a resistividade do solo ( $\rho$ ) tem uma relação proporcional com o valor de resistência  $R$  medida no solo, através de uma constante geométrica determinada a partir da configuração de eletrodos de medição utilizada na implementação do método.

#### *3.2.1.1. O método de Frank Wenner*

Na implementação do método de *Frank Wenner*, quatro hastes cilíndricas igualmente espaçadas e dispostas em linha devem ser cravadas no solo. O diâmetro das hastes não deve exceder a um décimo do espaçamento e a profundidade atingida pelas hastes deve ser a mesma, conforme esquema mostrado na Figura 8.



**Figura 8 – Configuração dos eletrodos no Método de Frank Wenner.**

Pelos terminais externos (1 e 4), injeta-se corrente no solo. A queda de tensão causada pela corrente é detectada entre os terminais internos (2 e 3). Estabelecendo-se a relação entre a tensão e a corrente medidas, obtém-se um valor da resistência  $R$  no solo entre 2 e 3.

*Frank Wenner* mostrou que existe uma relação linear entre o valor da resistividade do solo e a resistência medida:

$$\rho = K \cdot R. \quad (7)$$

O valor da constante  $K$  depende da geometria empregada nas medições. Sendo  $a$  o espaçamento entre as hastes,  $b$  a profundidade das mesmas e  $R$  a resistência medida entre os terminais internos (2 e 3), tem-se:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}. \quad (8)$$

Na formulação da constante geométrica  $K$ , percebe-se que, nas condições usuais de aplicação, o valor do denominador da fração varia entre 1 e 2, dependendo da relação entre a profundidade das hastes e do espaçamento. Isso implica simplificações na formulação:

Se  $b$  é muito grande comparado com  $a$ , o denominador se aproxima da unidade, resultando:

$$\rho \cong 4 \cdot \pi \cdot a \cdot R. \quad (9)$$

Se  $b$  é pequeno comparado com  $a$ , o denominador tende a 2, ficando:

$$\rho \cong 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R. \quad (10)$$

Na realidade, *Wenner* considera o solo homogêneo. Assim, o produto entre o valor  $R$  medido pela aplicação do método (para cada espaçamento) e o fator geométrico  $K$  corresponde à resistividade do solo. O fator geométrico varia com o espaçamento, mas o produto deve permanecer constante e igual ao valor da resistividade do solo. Entretanto, numa abordagem geral, o solo pode ser estratificado e, assim, o valor do produto deve, também, variar ao se mudar o espaçamento. Logo, os dados obtidos a partir da aplicação do método não fornecem efetivamente o perfil da resistividade do solo, mas são utilizados para alcançar o perfil.

Num solo homogêneo, quando se faz uma medição a um determinado valor  $a$  de afastamento entre as hastes, deve-se considerar que o valor de resistividade obtido corresponde aproximadamente à resistividade do solo em uma profundidade de mesmo valor de  $a$ . Isso é facilmente compreendido, quando se pensa que as superfícies equipotenciais aproximam-se de hemisférios (para distância entre eletrodos da ordem dos espaçamentos usuais). Ao se variar o valor do afastamento entre as hastes segundo uma direção, anotando-se as indicações sucessivas da resistividade medida, pode-se construir uma curva da resistividade do solo em função de sua profundidade. Quanto maior o afastamento  $a$ , mais profundos são os caminhos predominantes de corrente.

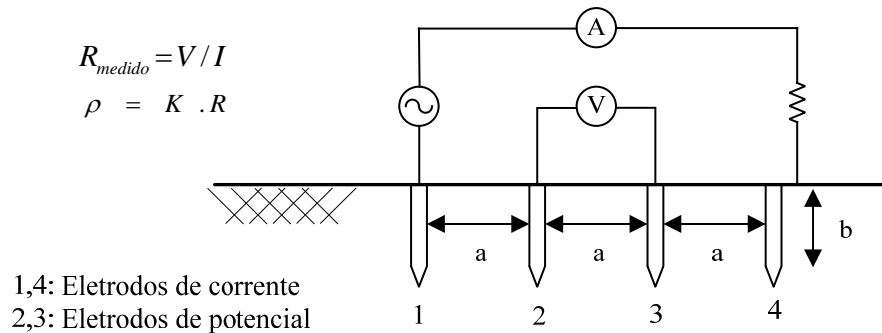
Entretanto, raramente existem solos realmente homogêneos. Na maior parte dos casos, os solos podem ser aproximados por um meio estratificado em duas camadas horizontais (e menos usualmente em três camadas). Nesse caso, ao se aplicar o método, considerando-se pequenos espaçamentos entre os eletrodos, a corrente vai fluir bem superficialmente e os dados de medição são influenciados praticamente apenas pela resistividade da camada mais superficial do solo. Quanto maior o espaçamento, mais profundos são os caminhos de corrente no solo e portanto, maior é a influência nos resultados de medição da resistividade do solo nas camadas mais profundas. Portanto, o valor do espaçamento “guarda” uma relação com a profundidade, embora a relação não seja linear.

### 3.2.1.2. *Considerações de ordem prática para o método de Wenner*

Deve-se observar o espaçamento idêntico entre as quatro hastes verticais colocadas em linha e a uma mesma profundidade. As duas hastes externas injetam a corrente alternada no solo (de valor eficaz  $I$ ) e as duas hastes internas detectam a queda



de tensão ( $V$ ) que ocorre entre elas devido à corrente. Estabelecendo-se a relação  $V/I$ , obtém-se o valor da resistência entre os eletrodos internos. Os instrumentos providos de quatro terminais (2 de corrente e 2 de tensão) fornecem diretamente o valor de  $R$ . Apresenta-se na Figura 9 o método de medição e o cálculo da resistividade:



**Figura 9 – Implementação prática da configuração de Wenner.**

Na implementação do método de *Wenner*, as hastes verticais devem estar firmemente cravadas, assegurando-se que a superfície condutora esteja em contato com o solo em toda sua extensão. A profundidade recomendada para as hastes é da ordem de 50 cm, sendo aconselhável um valor maior para terrenos arenosos, aterros e brejos, de forma a assegurar um contato íntimo eletrodo-solo. No caso de terrenos de grande resistência mecânica, algumas vezes é difícil alcançar o valor, sendo aceitável profundidade um pouco menor, Medeiros, S. F. (1981).

Cada haste apresenta uma resistência própria de aterramento, cujo valor é próximo ao valor da resistividade do solo onde está colocada. No caso das hastes de corrente o problema é mais sério (1 e 4). As possíveis soluções para a questão podem residir no emprego de fontes de tensão de valor mais elevado, uma configuração alternativa, ou, em último caso, é o emprego de práticas do tipo umedecimento do solo nas proximidades das hastes de corrente. Os cuidados não são tão críticos com relação às hastes de potencial (internas: 2 e 3), pois as mesmas não são percorridas pela corrente principal do circuito. Devido às altas impedâncias do circuito de medição de tensão, a corrente que circula pelo mesmo é muito reduzida, e a queda de tensão no aterramento de cada haste é desprezível em relação àquela que ocorre no circuito de medição.

Na aplicação do método, podem ser utilizadas hastes de aterramento nos diâmetros comerciais, pois a resistência  $R$  depende fundamentalmente da distância

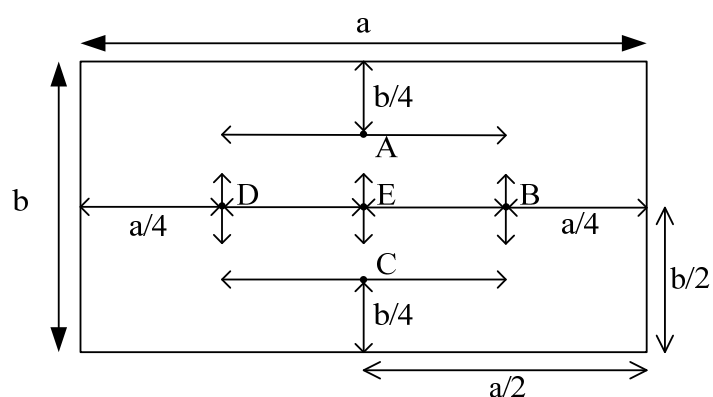
entre os eletrodos, da profundidade e da resistividade do solo, sendo pouco influenciada pelas dimensões dos eletrodos, IEEE Std 81 (1983).

Na prática são usualmente adotados valores múltiplos sucessivos de afastamento para medição em uma dada direção: 1, 2, 4, 8, 16, 32 e 64 m. Assim, para cada espaçamento medido, é possível manter fixas as posições da primeira e da terceira haste da medição anterior e deslocar apenas as duas outras, pois os afastamentos sucessivos têm valor duplo do valor utilizado na operação precedente. Outra sequência usual é: 1,5; 3; 6; 9; 18; 36; 72 m. No caso de projeto de instalações de grande porte, podem ser usados valores superiores de espaçamento. A Tabela 5 apresenta valores calculados da constante  $K$  para as distâncias e profundidades mais comuns.

**Tabela 5 - Valores da constante  $K$  em função do espaçamento e da profundidade.**

Espaçamento $a$ (m)	K		
	Profundidade - $b$ (m)		
	0,4	0,5	0,6
2	13,39	13,81	14,29
4	25,56	25,80	26,08
8	50,48	50,60	50,75
16	100,64	100,70	100,77
32	201,11	201,14	201,18
64	402,11	402,11	402,11

Devido às características anisotrópicas e heterogêneas do solo, para se obter a resistividade do solo em determinada região é necessário efetuar vários grupos de medições sucessivas (variando o afastamento), cobrindo toda a área de interesse. No caso de uma área retangular de 10.000 m<sup>2</sup>, recomenda-se um mínimo de seis medições sucessivas, conforme indicado na Figura 10.



**Figura 10 – Pontos de Medição: A, B, C, D, E. Direção de medição: x, y.**

Se a geometria da área é diferente, deve-se traçar um retângulo imaginário circunscrito à mesma e locar os cinco pontos como é representado na Figura 10. Sugere-se, para área superior a  $10.000 \text{ m}^2$ , a sua divisão em retângulos menores, procedendo da mesma maneira para medir cada subárea. Em aterramentos pontuais devem ser efetuadas duas medições ortogonais. Para linhas de transmissão, as medições devem ser efetuadas na direção ao longo do seu percurso. Outras disposições podem ser empregadas em função dos resultados obtidos, inclusive quando se detecta erros, como por exemplo, aqueles causados por condutores enterrados, NBR-7117 (1981). Para cada uma das direções pode-se traçar uma curva de resistividade em função do espaçamento.

## 4. ESTUDO DE CASO

Como objeto de estudos selecionou-se o projeto de SPDA e Aterramento do Condomínio Solar das Acássias. Trata-se de um condomínio residencial, situado na cidade Campina Grande – PB, com trinta e dois andares (110 m de altura). Em função da altura do prédio, segundo a norma NBR 5419/2005, projetou-se um SPDA constituído de uma “Gaiola de Faraday”, onde foram utilizadas as ferragens das colunas e lajes para sua formação.

O sistema possui um pára-raios tipo Franklin (Figura 11), uma malha sobre a cobertura, além de um anel de cintamento em cabo a cada vinte metros de altura, todos interligados. Ainda possui caixas de equalização (Figura 12), onde é feito a interligação de todo o sistema de aterramento, visando garantir a equipotencialidade. Os detalhes do sistema de aterramento e SPDA da edificação são apresentados no Anexo 1.



Figura 11 – Pára-raios tipo Franklin

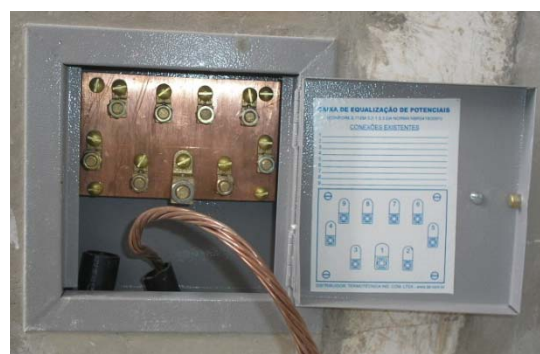


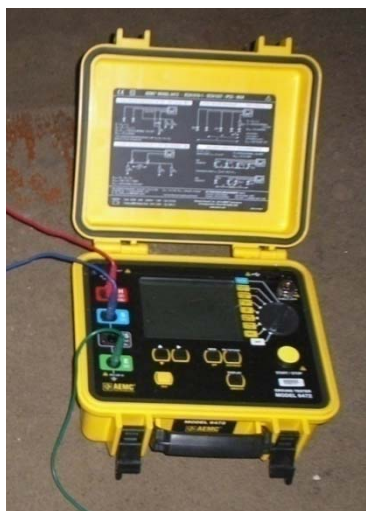
Figura 12 – Caixa de equalização

### 4.1. Estratificação do Solo

A fim de levantar as características do solo no qual o Residencial Solar das Acássias foi construído, realizaram-se medições de resistividade do solo. Conforme a NBR 7117, a existência de uma massa metálica pode interferir nas medições de resistividade do solo nas suas proximidades, provocando erros nos valores obtidos. Como já havia uma malha de terra no local, optou-se por realizar as medições de

resistividade do solo num local mais afastado da área onde já haviam hastes enterradas. O local escolhido apresentava a mesma estrutura geológica do solo do edifício.

As medições foram realizadas no dia 20 de maio de 2009 utilizando um terrômetro digital, modelo 6472, fabricado pela *AEMS Instruments* (Figura 13). O solo encontrava-se compactado e úmido devido ao fato do mesmo estar sendo utilizado para construção civil, o que pode reduzir o valor da resistividade do solo.



**Figura 13 - Fotografia do terrômetro AEMS - modelo 6472.**

Seguindo o método de *Wenner* as medições foram realizadas em apenas uma direção, devido o fato da edificação estar com a malha de aterramento praticamente concluída.

Devido às dimensões do terreno, só foram possíveis espaçamentos entre hastes de 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 metros em uma única direção (Figura 14).



**Figura 14 - Esquema do circuito de medição de resistividade do solo.**

Ao total foram realizadas seis medições e os valores de resistência obtidos estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Medições da resistência do solo em  $\Omega$  de acordo com o Método de Wenner (NBR 7117).**

<b>d (m)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>
1,0	3.45
1,5	2.45
2,0	1.79
2,5	1.51
3,0	1.19
3,5	1.28

De acordo com o método *Wenner*, a resistividade do solo pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{4.\pi.d.R}{1 + \frac{2.d}{\sqrt{d^2+4.h^2}} - \frac{d}{\sqrt{d^2+h^2}}}. \quad (11)$$

Onde:  $\rho$  – resistividade do solo;

$d$  – espaçamento entre as hastes;

$R$  – resistência medida;

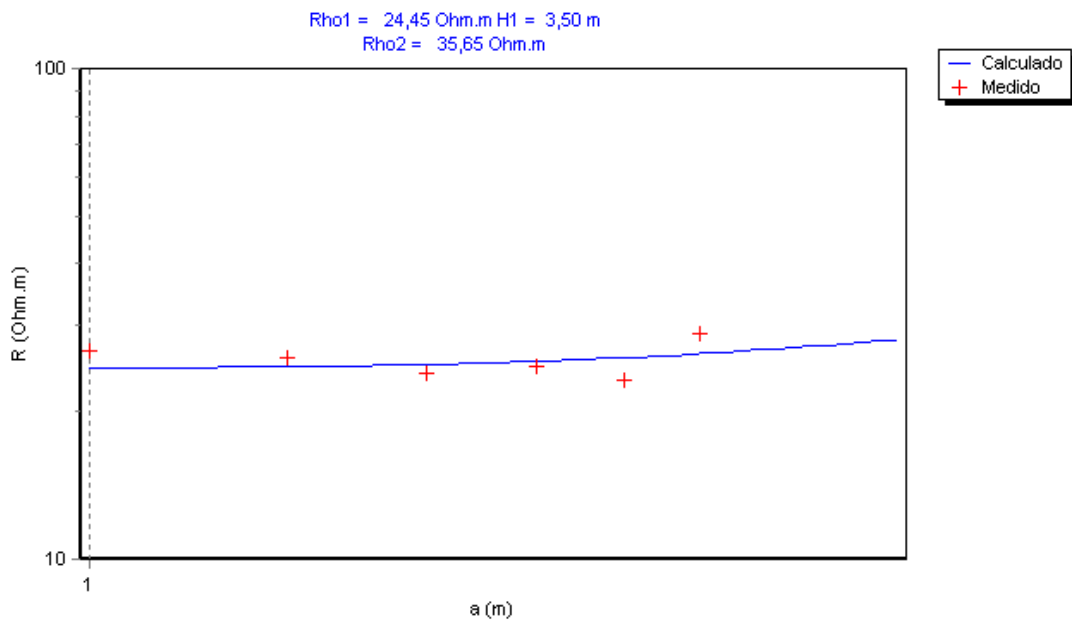
$h$  – profundidade da haste.

Devido às características do terreno, estipulou-se que as hastes seriam fincadas a uma profundidade de 0,40 metros. Os valores de resistividade obtidos para cada espaçamento, apresentados na Tabela 7, foram calculados pelo software TecAt Plus 5.2<sup>©</sup> que utiliza a equação (11).

**Tabela 7 - Resistividade Média.**

<b>ESPAÇAMENTO (m)</b>	<b>RESISTIVIDADE MÉDIA (<math>\Omega.m</math>)</b>
1,0	26,54
1,5	25,68
2,0	23,97
2,5	24,74
3,0	23,11
3,5	28,78

Com estes valores o software TecAt Plus 5.2<sup>®</sup> gerou a curva de estratificação apresentada na Figura 15.



**Figura 15 - Curva de estratificação do solo gerada pelo TecAt Plus 5.2<sup>®</sup>.**

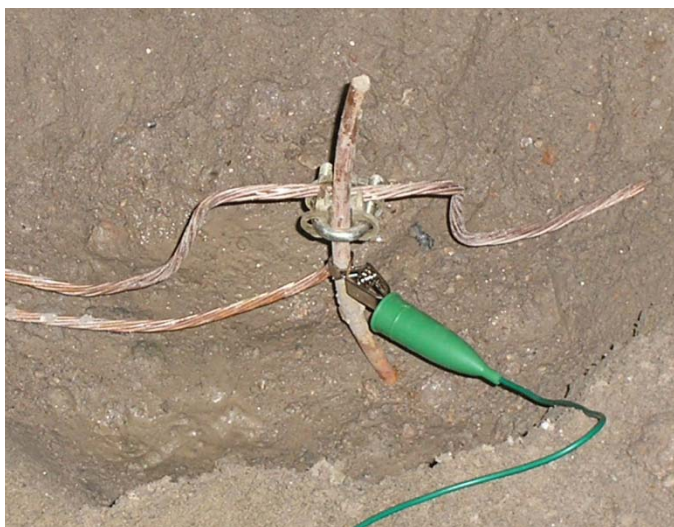
O software estratificou o solo em duas camadas: a primeira apresentando resistividade de 24,45  $\Omega$ .m com profundidade de 3,50 m e a segunda apresentando resistividade de 35,65  $\Omega$ .m.

#### **4.2. Resistência da Malha de Aterramento**

Para o cálculo da resistência da malha de aterramento, utilizou-se o método da queda de potencial.

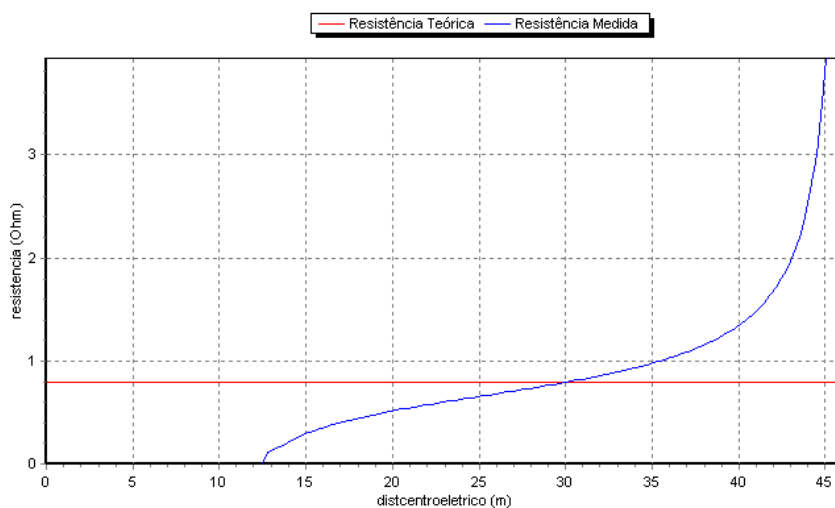
O procedimento adotado na medição da resistência da malha foi realizado conforme Normas IEEE Std. 80 e IEEE Std 81.2. A medição foi realizada através de uma das hastes da malha de aterramento. A partir da haste da malha de aterramento (Figura 16), conectou-se o terminal de corrente  $E(X)$  do terrômetro digital *AEMC Instruments*. O segundo eletrodo de potencial foi fincado no solo a uma distância de 30 m da haste de referência e conectado no terminal  $S(Y)$  do terrômetro através de um fio de cobre 2,5 mm<sup>2</sup>. Por fim, o terceiro eletrodo de corrente foi fincado no solo a uma distância de 50 m da haste de referência e conectado no terminal  $H(Z)$  do equipamento também com um fio 2,5 mm<sup>2</sup>. Assim, o segundo eletrodo de potencial encontra-se na região de

patamar entre a malha de terra e o eletrodo de corrente, próximo ao ponto ótimo para a determinação da resistência da malha.



**Figura 16 – Haste de referência.**

Após a ligação dos terminais do terrômetro aos eletrodos de corrente e potencial, foram realizadas as medições da resistência da malha de terra da edificação. O valor da resistência obtido situou-se em torno de **0,67  $\Omega$** , valor próximo de **0,79  $\Omega$** , mostrado na curva de resistência (Figura 17), simulado através do software TecAt Plus 5.2<sup>©</sup>.



**Figura 17 – Gráfico da resistência de aterramento.**

No dia durante o qual foram realizadas as medições, verificou-se que o solo estava úmido devido à ocorrência de chuva no período próximo a medição, o que resulta na redução da resistividade do solo e conseqüentemente, na redução da resistência da malha de terra. Esta constatação justifica o fato do valor medido ser inferior ao valor de **0,79  $\Omega$** , valor obtido em simulação utilizando-se o software TecAt Plus 5.2<sup>©</sup>.



## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os conceitos fundamentais sobre os Aterramentos Elétricos, mostrando os principais métodos adotados para a medição de resistência de malhas de terra.

Para a medição de resistividade de solo apresentou-se o método de quatro pontos desenvolvido por *Frank Wenner*. No método são mostradas as principais características de cálculo adotadas para a estratificação do solo.

Assim, foi apresentado um estudo de casos, com a finalidade de mostra uma avaliação do desempenho da malha de aterramento de um condomínio residencial situado na cidade de Campina Grande-PB. Como consequência, obtiveram-se, através de medições de resistividade do solo e resistência de aterramento, valores coerentes com os simulados através do software TecAt Plus 5.2<sup>©</sup>.

É importante destacar ainda a oportunidade de utilização do terrômetro digital, modelo 6472, fabricado pela AEMS instruments, consolidando os conhecimentos adquiridos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

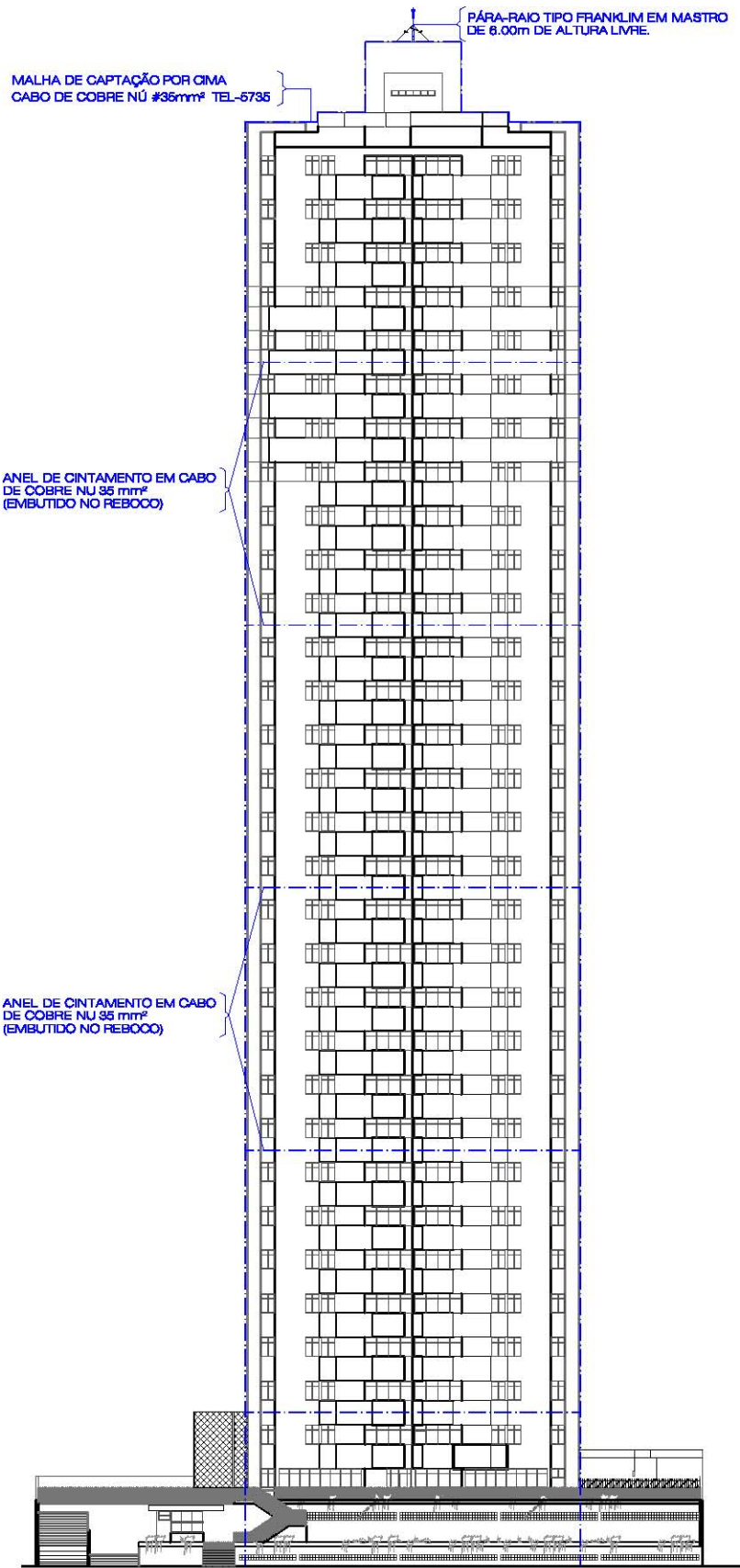
- ARAÚJO, H. X., *Proposta de novas técnicas de modelagem para estudo da redução dopotencial de passo e aterramento por elementos de circuito*, Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica) – Sistemas de Potência, Universidade Federal do Pará, Belém Ago, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *Medição de Resistividade do Solo: Método dos Quatro Pontos*, ABNT NBR-7117, Dez. 1981.
- ENDRENVY, J., *Evaluation of Resistivity Testsfor Desing of Station Grounds in Nonuniiform Soil*, AIEE Trans., paper 63-159, 1962.
- FILHO, S. V., *Aterramentos Elétricos*, Artliber Editora Ltda, 2005.
- GERI, A., *Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation*, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14, no. 13, pp. 1008-1017, July 1999.
- GRCEV, L., DAWALIBI, F., *An eletromagnetic model for transients on grounding system*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, 1993.
- GUO, J., ZUO, J., ZHANG, B. AND GUAN, Z. C., *An Interpolation Model to accelerate the Frequency-Domain Response Calculation of Grounding Systems Using the Method of Moments*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, nº 1, 2006.
- IEEE Std 81 - 1983, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*;
- INTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, *Guide for Measuring Ground Resistances ans Potential Gradients in the Earth*, IEEE STD 80, 1976 (Revised 1986).
- KINDERMANN, G., *Aterramento Elétrico*, Ed. Sagra Luzatto, 2002.
- MATTOS, M. A., *Técnicas de Aterramento*. Okime Eletromagnetismo Aplicado, 2004.
- MEDEIROS, S. F., *Fundamentos de Medidas Elétricas*, Ed. Guanabara dois, Rio de Janeiro, 1981.
- NEKHOUL, B., LABIE, P., ZGAINSKI, F. X., AND MEUNIR, G., *Calculating the impedance of a grounding systems*, IEEE Trans. Magnetics, vol. 33, no. 3, pp. 1509-1512, 1996.

- NR-10 Norma Regulamentadora, ***Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade***, Portaria n.º 598, de 07/12/2004.
- SAKIS MELIOPOULOS, A. P., XIA, F., JOY, E. B. AND COKKINIDES, G. J., ***An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis***, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº 1, 1993.
- SOUZA, K. T., MOURA, R. F., CINTRA, G., ***Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica***, II CONNEPI 2007, João Pessoa 2007.
- TANABE, K., ***Novel method for analyzing the transient behavior of grounding systems based on the finite difference time-domain method***, CRIEPI Report, Tokyo, 2001.

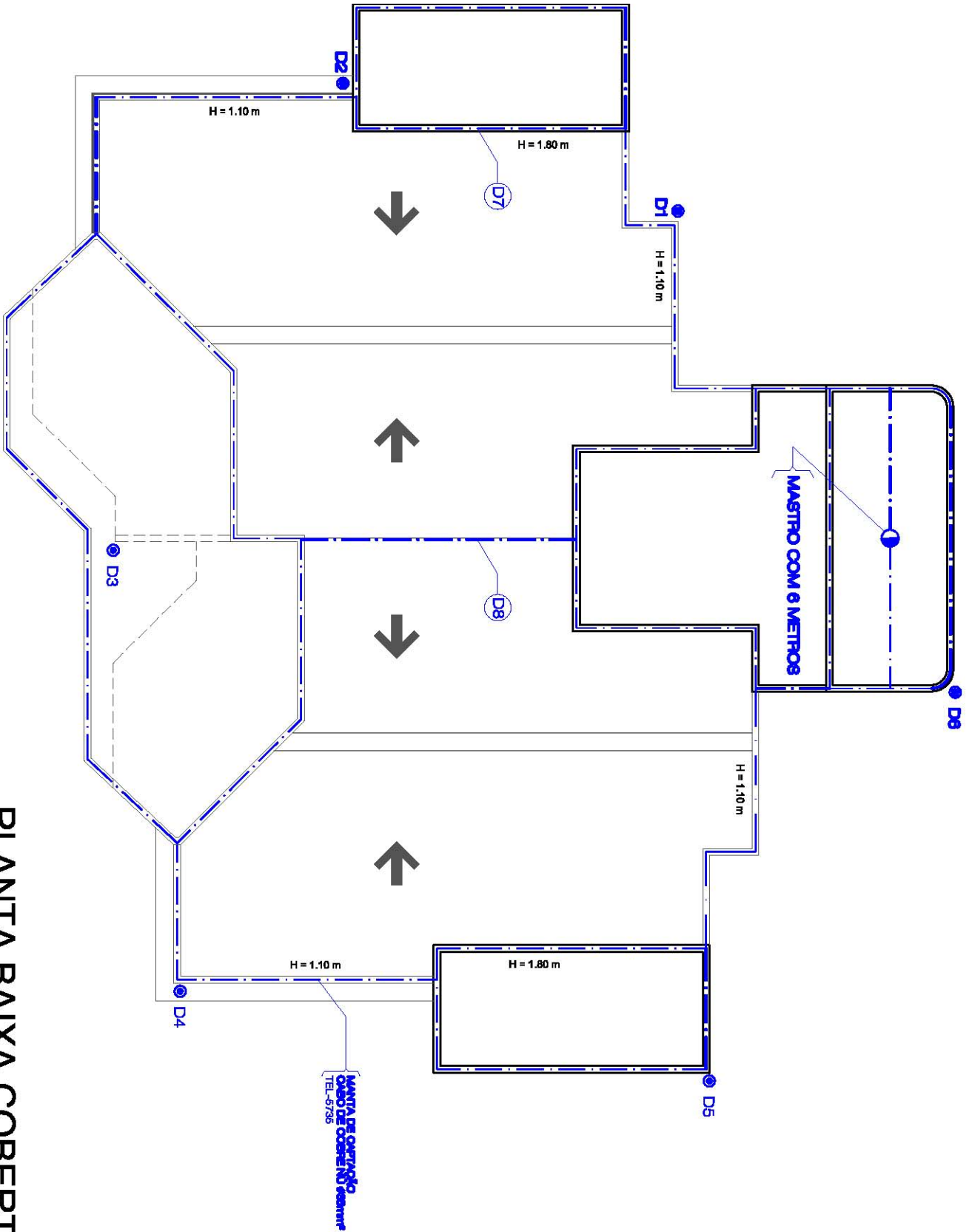
## 7. ANEXOS

# ANEXO 1

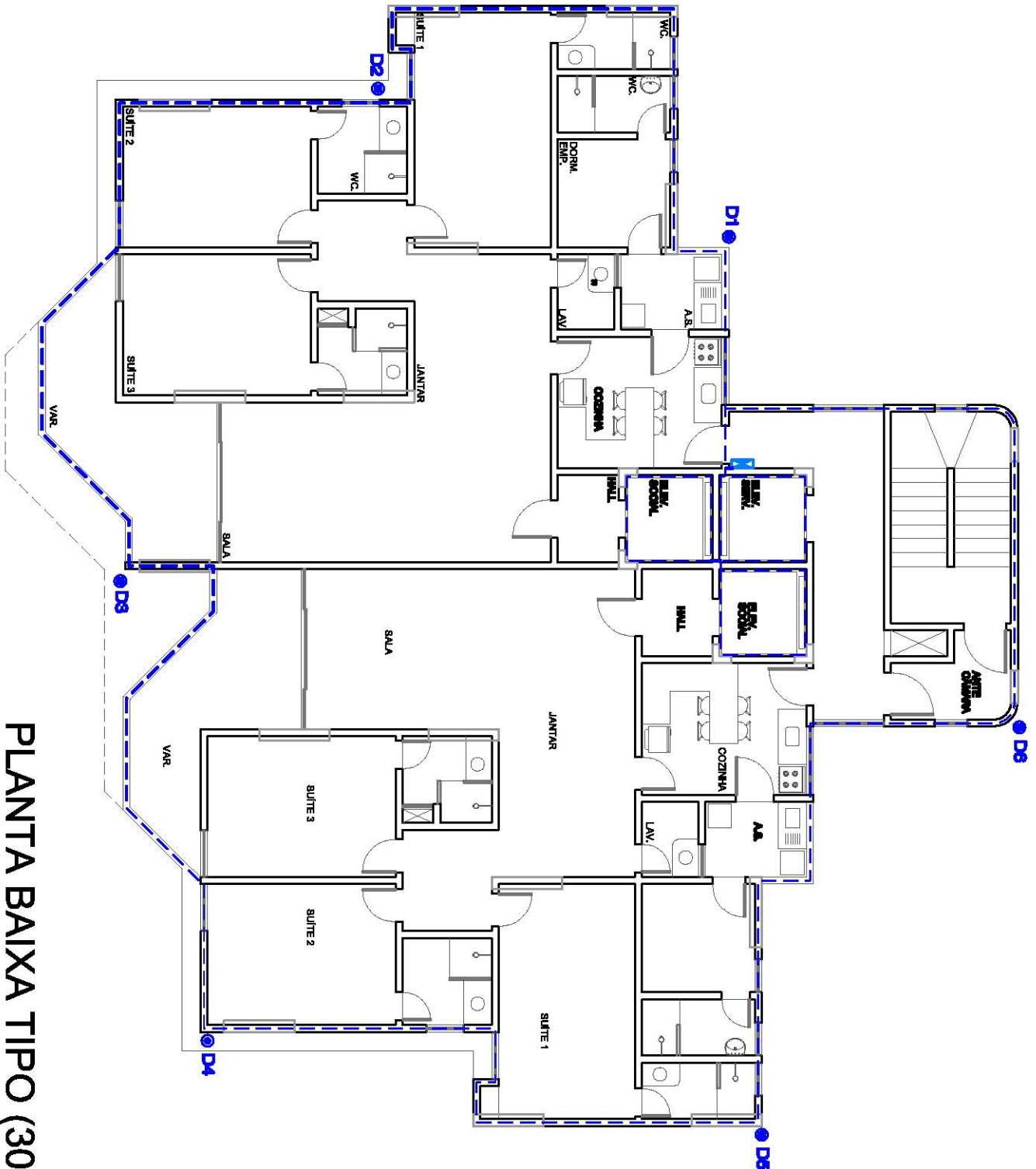
- Prumada de Aterramento (Frontal)
- Planta Baixa Coberta
- Planta Baixa Tipo
- Planta Baixa Subsolo 2
- Detalhes



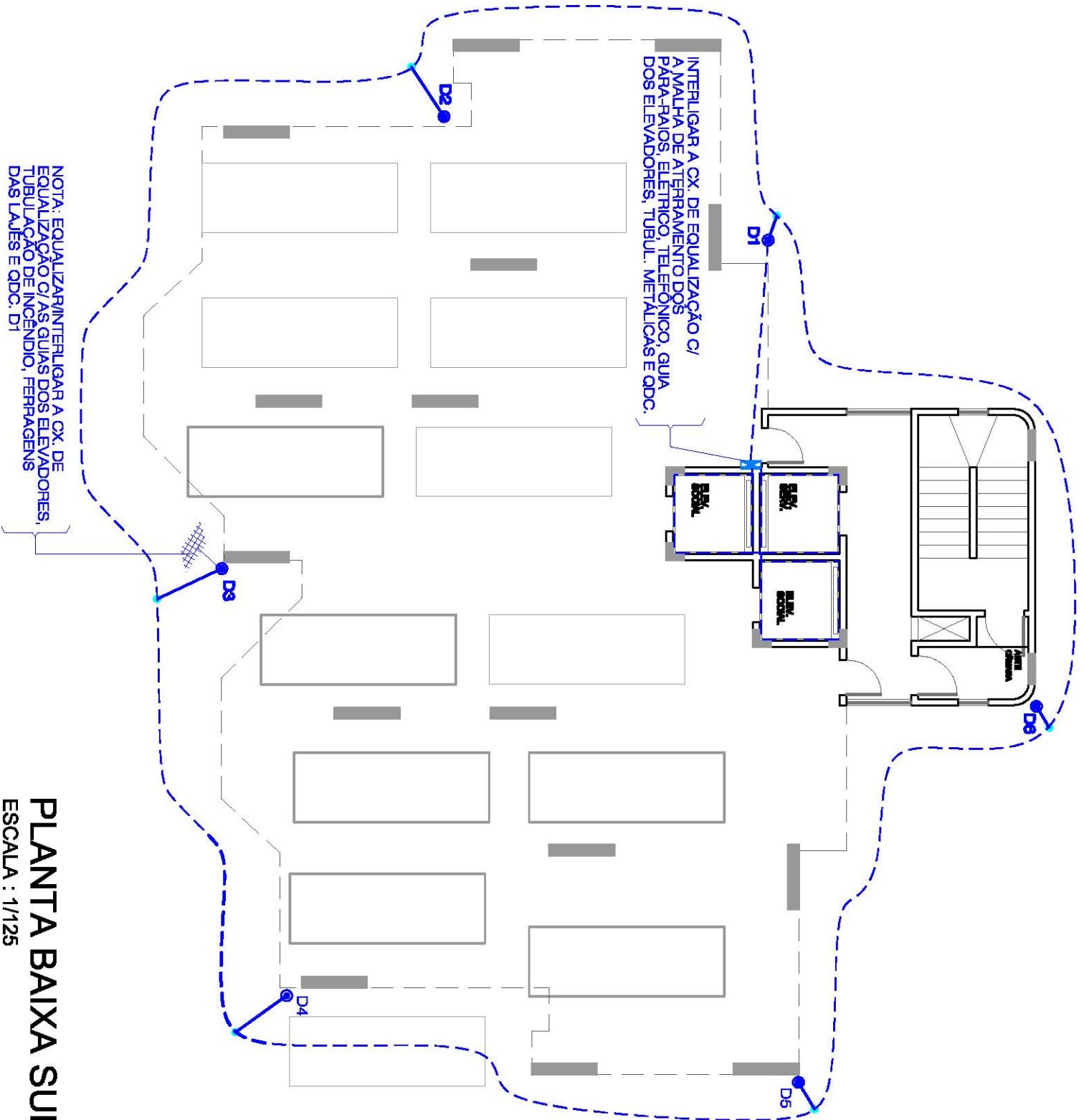
**PRUMADA DE ATERRAMENTO (FRONTAL)**  
 ESCALA 1:250



**PLANTA BAIXA COBERTA**  
**ESCALA 1:125**



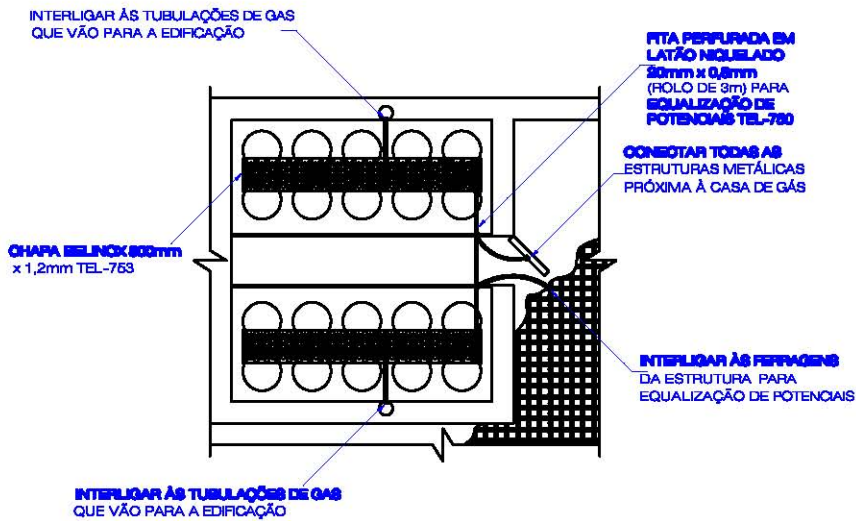
**PLANTA BAIXA TIPO (30 x)**  
 ESCALA : 1/125



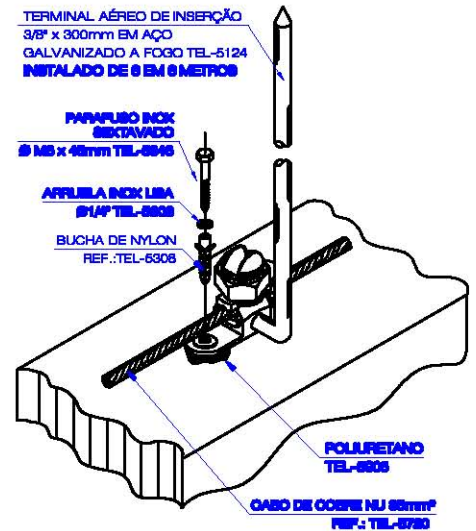
**PLANTA BAIXA SUBSOLO 2**  
 ESCALA : 1/125



**D1** DETALHE DE EQUALIZAÇÃO DA CENTRAL DE GÁS

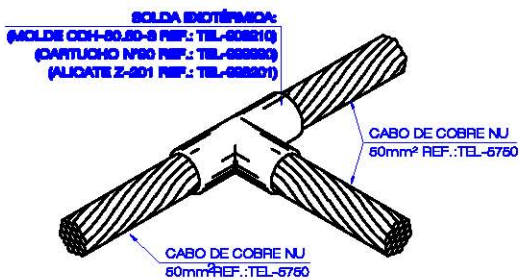


**D4** DETALHE DE FIXAÇÃO DO CABO DE ALUMÍNIO NA ALVENARIA  
DETALHE A212

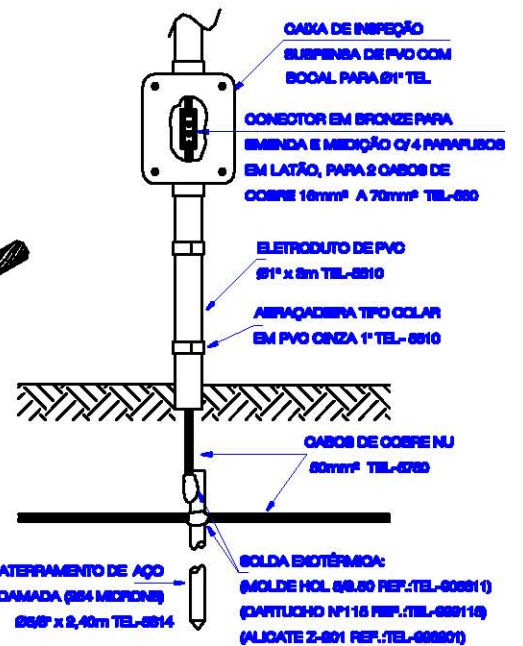


DETALHE DE CONEXÃO ENTRE DEBSCIDA E ATERRAMENTO

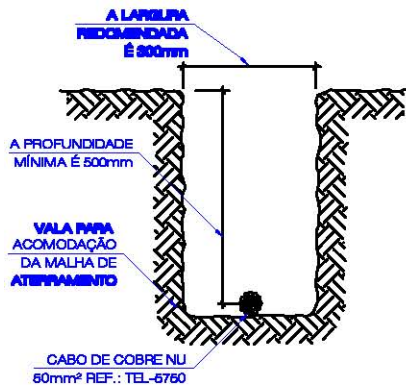
**D2** DETALHE DE SOLDA EXOTÉRMICA ENTRE CABOS 50mm² EM "T"  
DETALHE C005



**D3** DETALHE DE CONEXÃO E SOLDA DA HASTE DE ATERRAMENTO  
DETALHE C002



**D6** DETALHE DA VALA DA MALHA DE ATERRAMENTO  
DETALHE C006



**D8** DETALHE DA DEBSCIDA DO CABO DE COBRE NA ALVENARIA  
DETALHE A191

