

## 6

### Sistema de Medição

Neste trabalho foi empregada a técnica de sondagem em frequência para coletar as informações do canal. Esta técnica pode ser facilmente implementada através do uso do analisador vetorial. Esta técnica utiliza uma senoide de amplitude constante que varre uma determinada faixa de frequência para investigar o canal. O sinal recebido é multiplicado por um sinal transmitido e por uma versão do sinal transmitido com a fase deslocada de 90 graus. O produto dos sinais é passado por um filtro passa baixa e é normalizado em relação à amplitude do sinal transmitido, obtendo as estimativas das partes real e imaginária da resposta em frequência do canal. Assim, a atenuação e o deslocamento de fase (causado pelo ambiente de propagação) são obtidos para cada componente de frequência.

Para montagem do sistema de medidas, além do analisador vetorial, foram utilizados os seguintes componentes: dois arranjos de múltiplas antenas, um computador, dois *switches*, cabos e conectores.

- **Analisador vetorial**

O modelo analisador vetorial utilizado foi o Hewlett Packard HP1416ET, cujas especificações estão na Tabela 7. Nesse equipamento, o sinal que é enviado pela porta de transmissão promove uma varredura no dispositivo sob teste (DUT - *Device Under Test*) e retorna pela porta de recepção. Neste caso o canal rádio móvel mostrado na Figura 19 será o DUT do analisador.

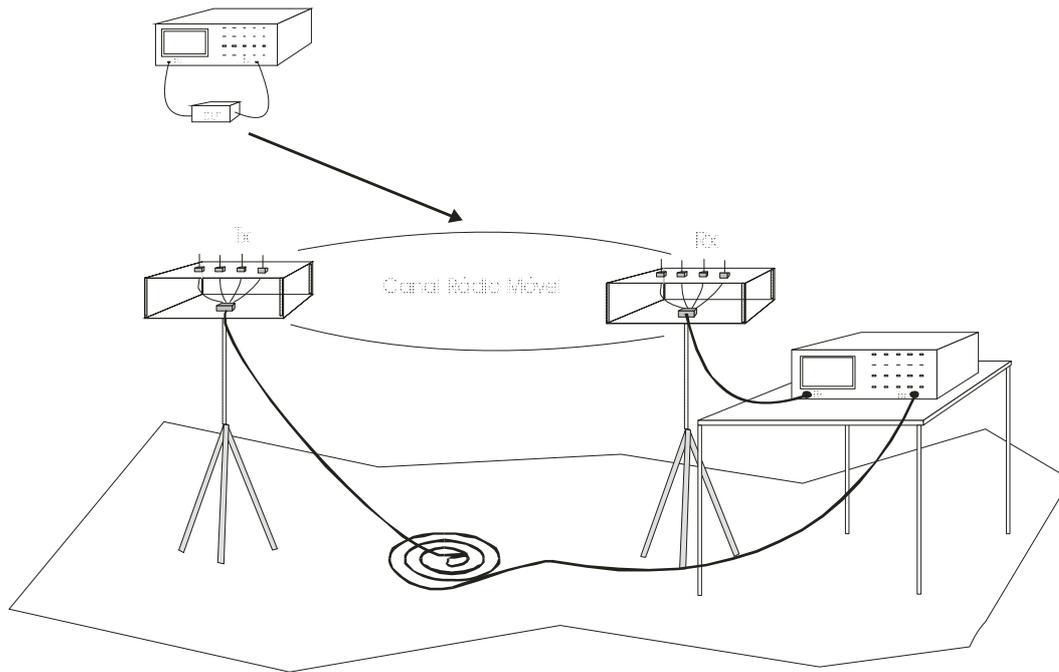


Figura 19 - Canal Rádio Móvel como DUT de um Analisador Vetorial

Como o sinal gerado é conhecido, informações de magnitude, além de fase e retardo de grupo para todos os parâmetros  $S$ , são disponibilizadas ao usuário conforme a Equação 1, com  $P_{IN}$  e  $P_{OUT}$  sendo as potências de entrada e saída, respectivamente.

$$S = 10 \times \log_{10} \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} \quad (1)$$

Como o analisador vetorial utilizado pode fornecer até duas informações distintas e o objetivo é medir a característica complexa do sinal para cada varredura da banda de interesse, são reportadas em canais diferentes e simultaneamente informações de magnitude e fase.

Apesar de criticada quanto a sua característica “não tempo real” [22], a técnica está em sintonia com a teoria e vem sendo utilizada com sucesso por outros autores [42, 24]. A crítica vem pelo fato que uma varredura completa da banda de interesse demanda algum tempo e, como o canal rádio móvel é variante no tempo, a resposta em frequência pode mudar rapidamente, fornecendo uma medida de resposta ao impulso errada. Porém, para pequenos intervalos de tempo ou para pequenos deslocamentos do móvel, o canal pode ser considerado estacionário no sentido amplo. Baseando-se nesta afirmativa, é possível atingir um

compromisso entre tempos de varredura suficientemente rápidos e garantia de integridade na resposta como realizado em [51].

A Tabela 7 apresenta as especificações técnicas do analisador utilizado.

<b>Resolução Máxima</b>	1Hz
<b>Potência de Saída</b>	+ 16dBm
<b>Tempo de Varredura</b>	40ms (ou maior)
<b>Range Dinâmico Máximo</b>	100dB
<b>Máxima Potência de Entrada</b>	26dBm

Tabela 7 - Analisador vetorial HP1614ET

- **Switches e Arrays**

Dois arranjos lineares foram construídos com seis antenas monopólos de um quarto de comprimento de onda, como mostra a Figura 20. Porém apenas quatro elementos eram utilizados para transmissão e recepção, os outros dois elementos inativos, um em cada ponta, são usados para balancear o efeito do casamento mútuo. Nos dois arranjos os seis monopólos do receptor e do transmissor eram separados igualmente por meio comprimento de onda (7,5cm).

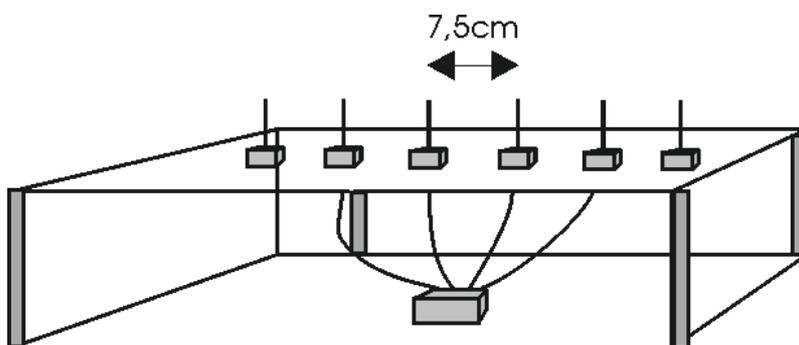
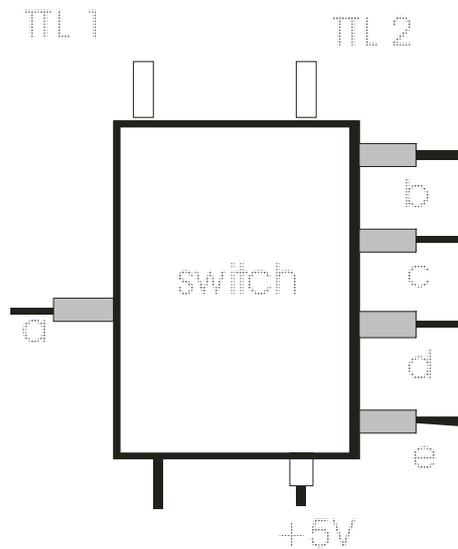


Figura 20 - Arranjo das antenas transmissoras e receptoras

Para possibilitar o uso dos arranjos, foram utilizados *switches* que permitem o direcionamento dos sinais (Figura 21). Os *switches* utilizados possuem uma porta de saída e quatro portas de entrada de RF (rádio frequência), um terminal para alimentação de +5V e duas portas de controle, que determinam, através da lógica TTL, qual das quatro portas (*b,c,d,e*) de entrada se comunicará com a porta de saída *a*.

Figura 21 - *Switch* utilizado

A Tabela 8 abaixo apresenta as características desse elemento e sua lógica TTL. Para o controle dos dois arranjos com quatro elementos foram necessários dois *switches*.

Marca	Mini-Circuits	Lógica TTL		
Modelo	ZSDR-425	Porta Seleccionada	TTL - 1	TTL - 2
Faixa de Freqüência	10-2500MHz	b	1	0
Isolação entre Portas	35dB	c	1	1
Perda	1,5dB	d	0	1
Tempo de Comutação	2,0 $\mu$ seg.	e	0	0
Tensão de Alimentação	+ 5 Volts			

Tabela 8 - Especificações do *Switch*

Para realização das medidas foi preciso fazer uma varredura da banda de interesse em cada um dos 4 elementos do arranjo (transmissor e receptor), utilizando para isso o computador que selecionava as antenas correspondentes através de uma seqüência de bits enviados pela porta paralela às portas de controle dos *switches* dos transmissores e receptores. Os *switches* fazem então a ligação elétrica entre a antena desejada e o analisador.

Esquematicamente, a Figura 22 apresenta a configuração para a montagem do sistema de medidas, considerando perdas e ganhos previamente dimensionados.

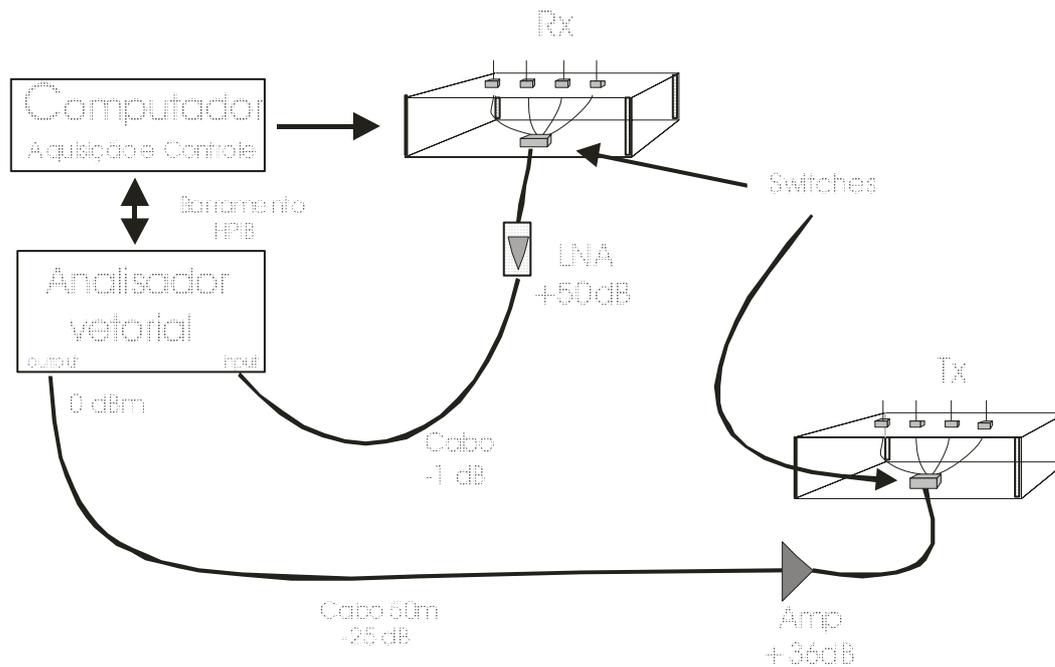


Figura 22 - Diagrama do sistema de medidas

Para obtermos uma varredura na banda de interesse, o analisador envia um sinal por um cabo coaxial de 50 m até ao arranjo das antenas transmissoras passando por um amplificador de potência. Na transmissão, o *switch* direciona os sinais nas antenas transmissoras, enquanto que na recepção, o sinal que chega no *array* é direcionado pelo uso de outro *switch* para um amplificador de baixo ruído (LNA) que, por sua vez, envia as informações para o analisador vetorial. O analisador simultaneamente envia os dados coletados para o computador através do barramento GPIB, que os armazena.

As especificações do amplificador de potência e do LNA estão na Tabela 9. O amplificador, o LNA e os *switches* são alimentados com tensão contínua, através do uso de fontes de tensão com +15V, + 15V e + 5V, respectivamente.

Marca	Modelo	Ganho [dB]	Faixa [MHz]	
MITEQ	AM - 5A - 0520 - N	50	500	2000
Mini-Circuits	ZEL - 1724 LN	36	1700	2400

Tabela 9 - Especificações do LNA e do amplificador

Durante as medidas, o receptor permaneceu apenas em um local de medidas, enquanto o transmissor foi posicionado nos diversos pontos de interesse. O computador é utilizado para controlar o início e o fim das varreduras, fazer o

armazenamento dos dados e controlar os *switches*. Todos os algoritmos desenvolvidos para controle e aquisição dos dados foram desenvolvidos em MATLAB.

A configuração final do sistema de medidas é mostrada na Figura 23.

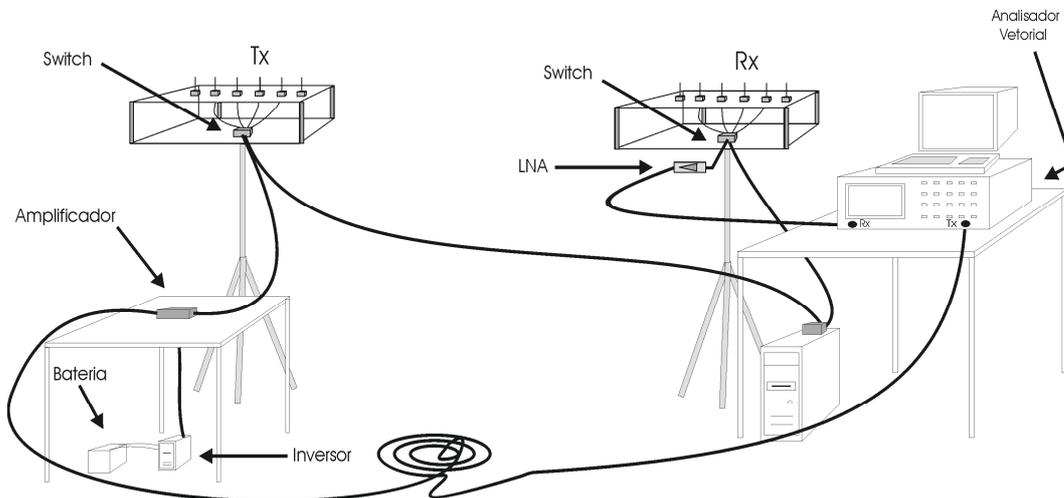


Figura 23 - Configuração final do sistema de medidas

## 6.1

### Calibração

Como foi explicado anteriormente, o analisador vetorial é um equipamento que realiza medidas através de comparação entre o sinal enviado, que é conhecido, e o sinal recebido. Logo, ele analisa o sistema que estiver entre suas duas portas.

Para a caracterização do canal é necessário o uso de cabos e conectores para interligar os arranjos de transmissão e recepção ao analisador. Estes componentes, apesar de estarem no sistema de medição, não devem influenciar na medida. No sistema de medição deste trabalho, além de cabos e conectores ainda se utilizou *switches*, amplificadores e dois arranjos de antenas, aumentando o problema de inserção de erros por parte de componentes externos a caracterização do canal. Assim, para garantir uma medida correta é necessário o procedimento de calibração.

O objetivo da calibração do sistema de medição, adotada de acordo com os trabalhos de [84, 85], é anular o efeito dos componentes físicos do sistema. O

analisador vetorial já prevê a necessidade de calibração, e portanto, possui circuitos que compensam o comportamento dos dispositivos que fazem a ligação do aparelho ao DUT. Para tanto, é preciso que os cabos e conectores sejam ligados diretamente, sem o DUT e sem as antenas, para que seu comportamento seja incorporado pelo analisador.

## 6.2

### Configuração do Analisador de Rede

Como explicado anteriormente, para cada frequência discreta da banda, o analisador de rede coleta as informações de amplitude e fase. Medidas sucessivas dessas informações de fase e amplitude para cada ponto discreto da banda revelam o comportamento da função de transferência variante no tempo,  $T(f, t)$ . O valor de  $T(f, t)$  é dado por:

$$T(f, t) = A(f, t) \times \left( \cos \left( F(f, t) \times \frac{\pi}{180} \right) + j \times \text{sen} \left( F(f, t) \times \frac{\pi}{180} \right) \right)$$

onde  $A(f, t)$  e  $F(f, t)$  representam as amplitudes e fases para cada ponto de frequência discreto medido da banda utilizada na sondagem do canal.

A resposta impulsiva do canal,  $h(t, \tau)$ , utilizando a técnica de sondagem do canal no domínio da frequência, é obtida de forma indireta, aplicando a transformada Fourier na função de transferência  $T(f, t)$ . Porém, a resolução nos domínios da frequência e dos retardos depende da configuração dos parâmetros do analisador de rede para a medição do canal. Parâmetros como largura de banda e o número de pontos tomados por varredura são os principais parâmetros que afetam a resolução em ambos domínios.

No domínio dos retardos, esses parâmetros irão determinar a resolução no domínio dos retardos ( $\Delta\tau$ ) e o retardo máximo ( $\tau_{MAX}$ ). A resolução nos domínios é dada por:

$$\Delta\tau = \frac{1}{B}$$

onde  $B$  é a largura de banda.  $\Delta\tau$  representa a resolução temporal mínima ou em outras palavras representa o tempo mínimo entre a chegada de dois raios para que estes possam ser distinguidos pelo sistema de medidas. Idealmente, quanto maior é a banda, melhor é a resolução no domínio dos retardos. Porém, maior é o tempo de varredura. Assim, é necessário um compromisso entre a resolução temporal e o tempo de varredura.

O retardo máximo é o maior retardo percebido e é dado por:

$$\tau_{MAX} = \frac{(N-1)}{B}$$

onde  $N$  é o número de pontos escolhidos para varrer a banda do canal.

No domínio da frequência, a largura de banda e o número de pontos tomados por varreduras irão determinar a resolução no domínio da frequência  $\Delta f$ , dada por:

$$\Delta f = \frac{B}{N-1}$$

Uma resolução ruim no domínio frequência impacta diretamente o cálculo da banda de coerência. Assim, idealmente quanto maior o número de pontos melhor é a resolução no domínio frequência, porém maior é o tempo de varredura. Desse modo, novamente é necessário um compromisso entre a resolução no domínio frequência e o tempo de varredura.

A literatura reporta que a combinação de uma largura de banda de 200 MHz e 801 pontos é um compromisso entre as resoluções no domínio da frequência e temporal e o tempo de varredura [84].

Desse modo, neste trabalho o analisador de rede vetorial foi configurado de acordo com a Tabela 10.

<b>Largura da Banda</b>	200 MHz
<b>Número de Pontos</b>	801
<b>Frequência Central</b>	2 GHz

Tabela 10 - Configuração básica do analisador de rede

Essa configuração resultou em uma separação em frequência de 0.25MHz entre os pontos discretos de amplitude e fase obtidos. Essa separação de frequência no domínio dos retardos representa uma resolução de 5ns, o que corresponde a componentes de multipercursos separados de 1,5m, que poderiam ser detectados pela sondagem em frequência do canal. O retardo máximo obtido foi de 4000 ns, ou seja, todas as componentes de multipercursos com percursos de até 1200 m poderiam ser detectadas pela sondagem em frequência do canal.

### 6.3

#### Ambiente de Medidas

Para analisar a capacidade do canal MIMO e caracterizar o canal, nove diferentes ambientes *indoor* de medidas foram escolhidos. Dos nove ambientes, sete foram escolhidos no campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e dois no campus da Universidade Federal Fluminense.

Foram acrescentados em alguns dos ambientes escolhidos placas de metais com objetivo de aumentar a quantidade de espalhadores efetivos.

As medidas foram realizadas sobre um grid quadrado horizontal, com 36 pontos separados por um comprimento de onda. As alturas do transmissor e receptor foram fixadas a 1,5m do chão. Para cada ponto, medidas das amplitudes e fases do sinal recebido para as 801 frequências de uma banda de 200 MHz foram coletadas.

A seguir, são apresentadas as descrições dos ambientes escolhidos, as posições do transmissor, receptor e do grid. Quando placas forem adicionais no ambiente, serão demonstradas as suas posições e a localização dos principais espalhadores.

- **CETUC**

No ambiente denominado CETUC, as medidas foram realizadas no CETUC, o receptor foi colocado no laboratório canal rádio móvel (LCM) e o transmissor deslocado para os laboratórios de propagação (LP) e radiômetro (LR), para a sala de número 5 (SL) e para o hall de entrada (HL). Em nenhuma dessas medidas existiu visada direta entre o transmissor o receptor.

Neste ambientes sete medidas diferentes foram realizadas devido ao deslocamento do transmissor e com inserção de algumas placas de metal para o aumento do grau de espalhadores.

O laboratório canal rádio móvel pode ser caracterizado como um ambiente com grande quantidade de objetos metálicos regulares e irregulares. Armários de madeiras e metálicos, estantes metálicas, equipamentos eletrônicos e de bancada e computadores são exemplos de objetos que pertencem a este ambiente.

O laboratório de propagação pode ser caracterizado como um ambiente sem objetos metálicos, com muita madeira e de possuir uma grande janela de vidro. Armários e mesas de madeira e computadores são de objetos presentes neste ambiente.

O laboratório radiômetro pode ser caracterizado como um ambiente com grandes objetos metálicos regulares. *Switch*, placas de metais e armários de madeiras são exemplos de objetos que pertencem a esse ambiente.

A sala de número 5 pode ser caracterizada como um ambiente com poucos objetos metálicos e uma grande janela de vidro. Alguns armários e mesas de madeira, algumas estantes metálicas e computadores são os objetos presentes neste ambiente.

O hall de entrada pode ser caracterizado como um ambiente com poucos objetos presentes. Cadeiras e uma bancada de madeira são exemplos de objetos presentes neste ambiente.

A primeira medida realizada foi entre LCM e o LP, e será referenciada como CT1. A segunda medida (CT2) foi realizada no mesmo ambiente, mas placas de metais foram adicionadas do lado do transmissor. A inserções de placas de metais tinham como objetivo aumentar o número de espalhadores neste ambiente. A terceira medida (CT3) foi realizada entre o LCM e o LR. A quarta (CT4) foi no mesmo ambiente e novamente placas foram adicionadas do lado do transmissor. A quinta medida (CT5) foi realizada entre LCM e o HL. A sexta medida (CT6) foi realizada entre o LCM e o SL. Placas de metais foram adicionadas a esta medida do lado do transmissor. A última medida (CT7) foi realizada no mesmo ambiente anterior, porém as portas dos dois ambientes foram abertas.

A Figura 24 apresenta o local de medidas, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

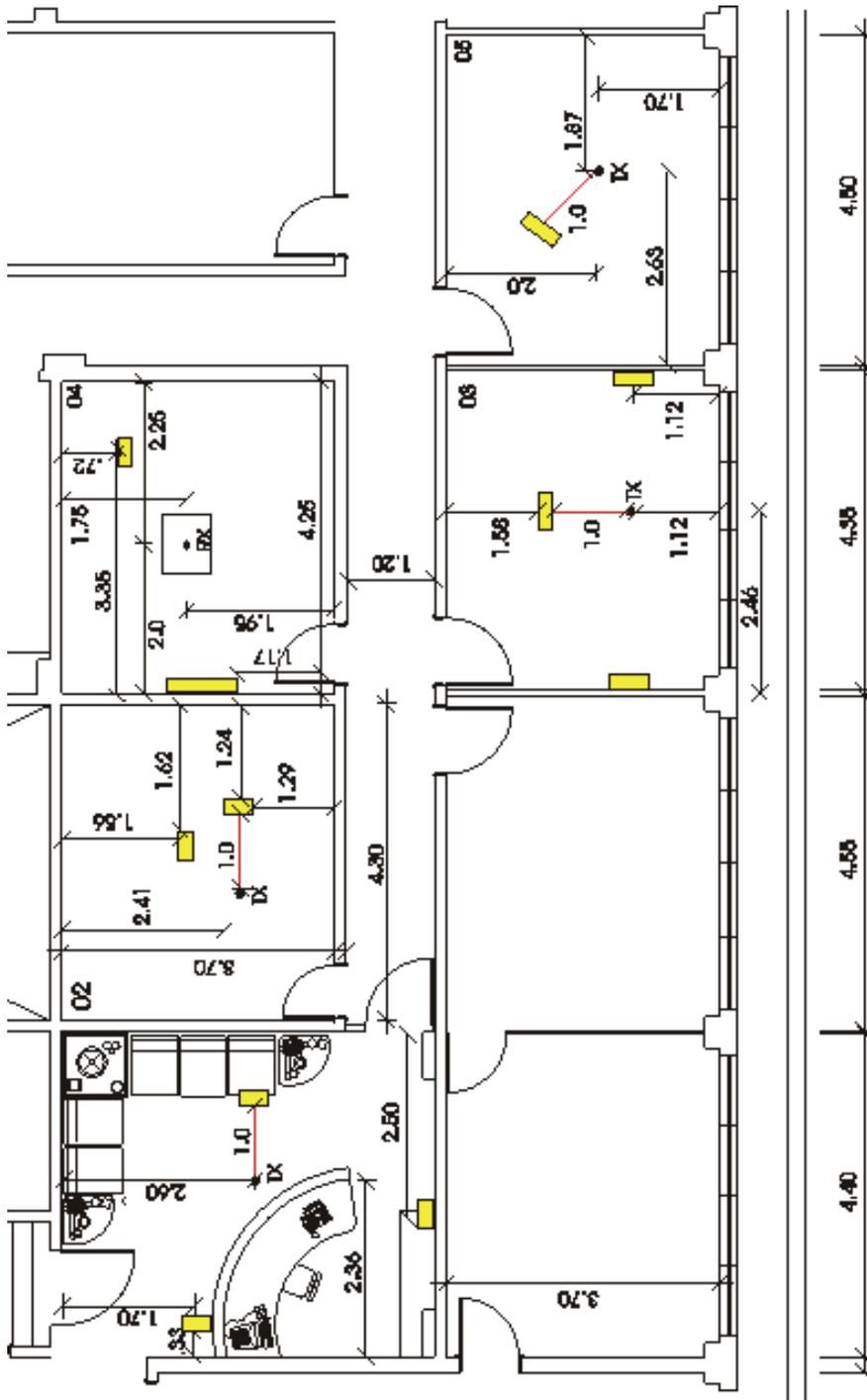


Figura 24 - Layout do CETUC

- **Laboratório de Sistemas**

Foram realizadas medidas no Laboratório de Sistemas (LS) localizado no CETUC. Neste ambiente, o transmissor ficou fixo e receptor foi deslocado para três diferentes posições no laboratório. Nestes ambientes foram analisadas situações com visada, parcialmente com visada e sem visada.

Este laboratório pode ser caracterizado por um ambiente com poucos objetos metálicos, por possuir uma grande janela, divisórias de vidro entre as bancadas dos computadores e de possuir inúmeros computadores.

O primeiro conjunto de pontos medidos (LS1) foi com visada direta. O segundo conjunto (LS2) foi com visada parcial. Uma parede e uma divisória de vidros obstruíam em alguns pontos do grid a visada entre o transmissor e receptor. E o último conjunto (LS3) foi sem visada, obstruída por uma parede e divisórias de vidros.

A Figura 25 apresenta o local, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

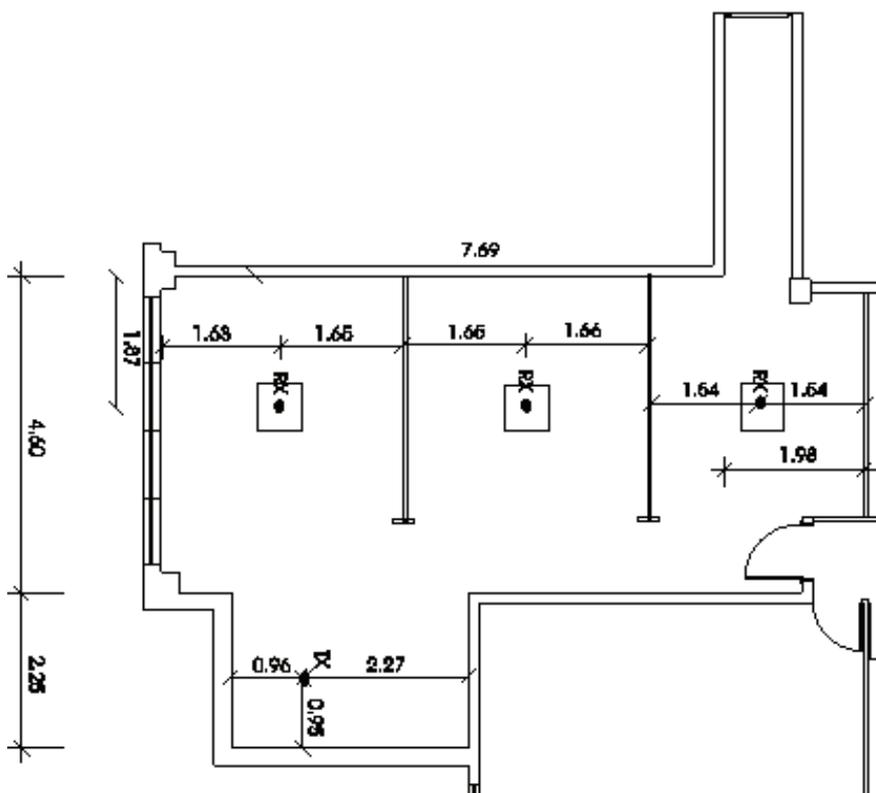


Figura 25 - Layout do Laboratório de Sistemas

### • Laboratório de Óptica

Foram realizadas medidas no Laboratório de Óptica (LO), localizado no CETUC. Neste ambiente, o transmissor ficou fixo e receptor foi deslocado para 3 diferentes posições no laboratório. Em nenhuma dessas medidas existiu visada direta entre o transmissor o receptor.

O Laboratório de Óptica pode ser caracterizado como um ambiente com grande quantidade de objetos metálicos regulares e irregulares. Armários e

estantes metálicas, equipamentos eletrônicos e de bancada e computadores são exemplos de objetos que pertencem a este ambiente. Além disso, LO possui uma grande janela de vidro.

As posições das medidas estão localizadas a Figura 26. As medidas LO de 1 a 3 foram realizadas com o ambiente natural e nenhuma placa de metal foi adicionada no lado do transmissor ou no receptor. A Figura 26 também apresenta as posições do grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

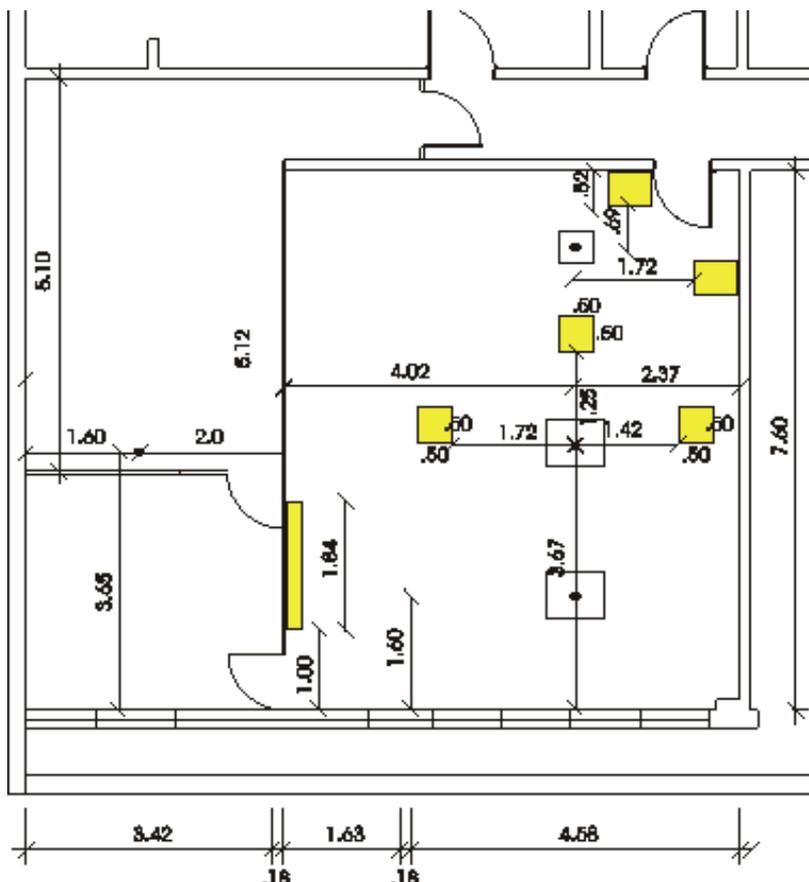


Figura 26 – Layout do Laboratório de Óptica

- **Corredor CETUC**

Foram realizadas medidas no corredor do CETUC (CC). Foram medidos nove pontos separados por um metro. Neste ambiente, o receptor ficou fixo e transmissor foi deslocado ao longo de nove pontos no corredor. Nestes ambientes foram analisadas situações apenas com visada e o grid não foi utilizado. Uma característica marcante deste corredor é a sua largura de 1,20 m, ou seja, se trata de um corredor bem estreito. O local de medidas é mostrado na Figura 27.

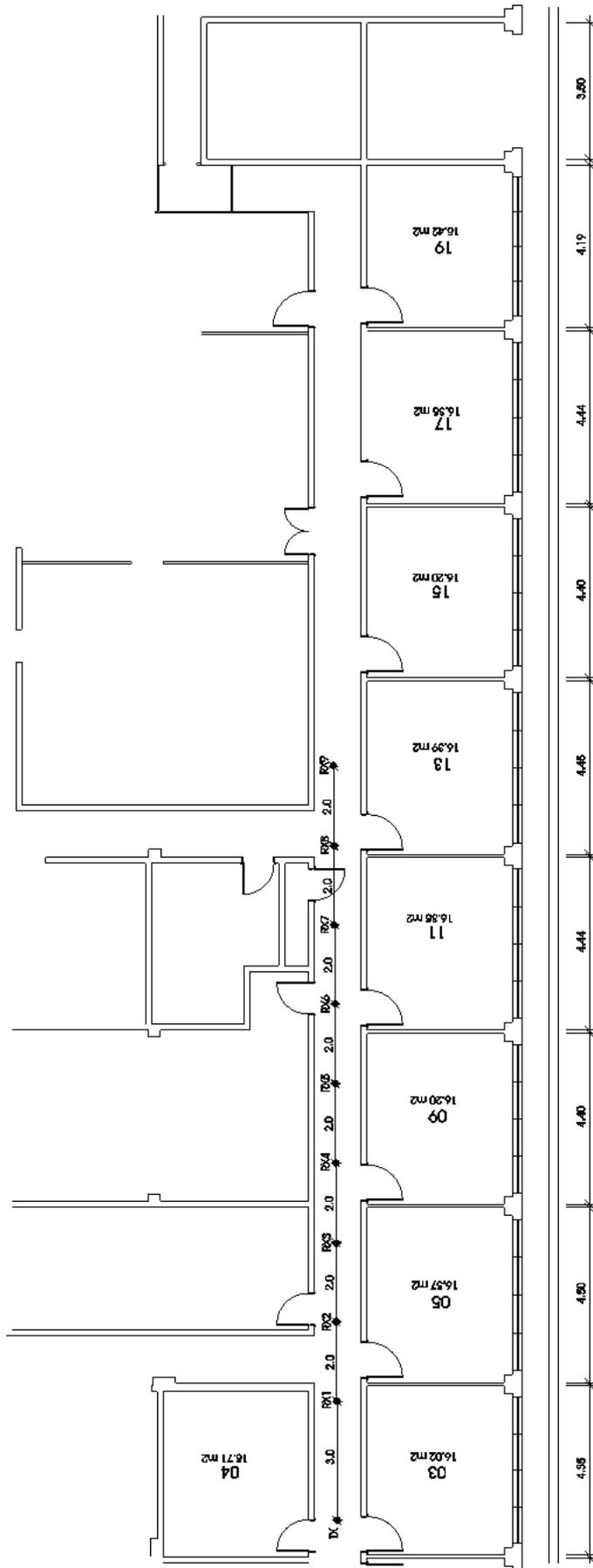


Figura 27 - Layout do Corredor CETUC

- **CETUC 2**

No ambiente denominado CETUC 2, as medidas foram realizadas no CETUC, o transmissor foi colocado no laboratório canal rádio móvel (LCM) e o receptor foi colocado na sala de número 13 e no corredor. Em nenhuma dessas medidas existiu visada direta entre o transmissor o receptor.

Como já foi dito, o laboratório canal rádio móvel pode ser caracterizado como um ambiente com grande quantidade de objetos metálicos regulares e irregulares. Porém, como tínhamos o objetivo de isolar a sala, grandes placas de metais foram colocadas em torno do transmissor.

A sala de número 13 pode ser caracterizada como um ambiente com poucos objetos metálicos e de possuir uma grande janela de vidro. Alguns armários e mesas de madeira, algumas estantes metálicas e computadores são de objetos presentes neste ambiente. Assim, para aumentar a quantidade de espalhadores neste ambiente, placas de metais também foram adicionadas do lado do receptor

Na primeira medida (CT2\_1), as portas do laboratório e da sala permaneceram abertas. Na segunda medida (CT2\_2), as portas do laboratório e da sala permaneceram semi-abertas. Na terceira medida (CT2\_3), as portas do laboratório e da sala permaneceram fechadas. Na quarta medida (CT2\_4), o receptor foi colocado no corredor de frente para a sala das medidas anteriores. Na última medida (CT2\_5), o receptor foi colocado no corredor de frente para sala de número 13.

A Figura 28 apresenta o local de medidas, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

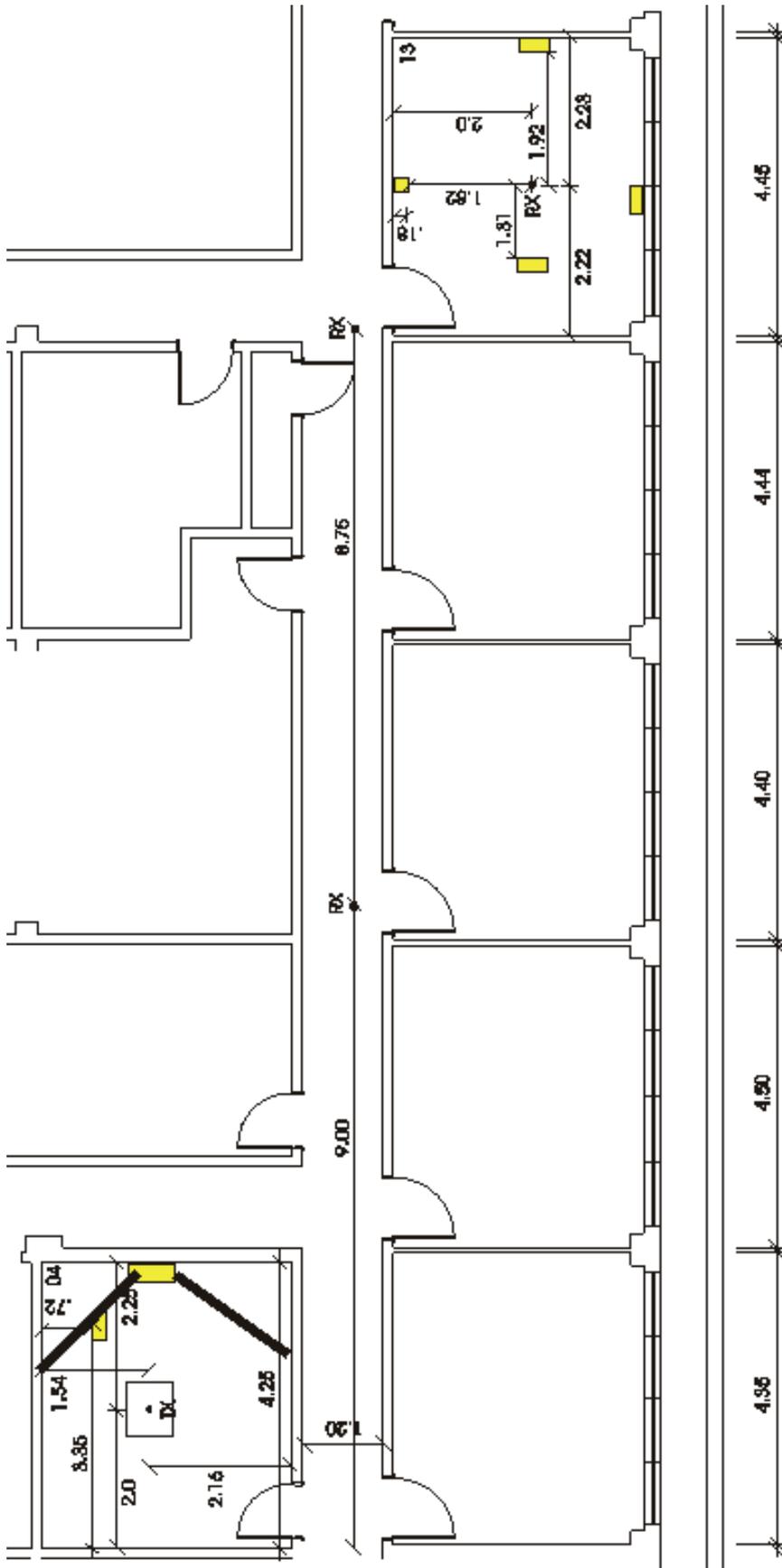


Figura 28 - Layout do CETUC2

- **Leme**

No segundo andar do prédio Cardial Leme da PUC-RIO foram realizadas medidas em cinco situações diferentes. Neste ambiente, o receptor e o transmissor foram deslocados de acordo com a situação considerada. Nestes ambientes foram analisadas situações com visada e sem visada direta.

Foram realizadas ao longo do corredor do Leme e em duas salas de aula. O corredor pode ser caracterizado por ter uma largura de 3m, possuir alguns armários metálicos, extintores de incêndio e bebedouros. As salas de aula caracterizam-se por ter cadeiras de madeira e por possuírem grandes janelas de vidro.

A primeira medida (LM1) foi realizada ao longo do corredor. Quarenta pontos separados por um metro foram medidos ao longo do corredor do Leme. A segunda e a terceira medidas (LM2 e LM3) foram realizadas sobre o grid nas posições 33 e 44 definidas na primeira medida. Na quarta medida (LM4), o transmissor ficou fixo no corredor e o receptor e o grid foram colocados em uma sala de aula (posição 27). Na última medida (LM5), o receptor e o grid permaneceram na mesma sala da medida anterior e o transmissor foi deslocado para uma sala localizada na posição 1.

A Figura 29 apresenta o local, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas para todas as situações de medidas citadas acima.

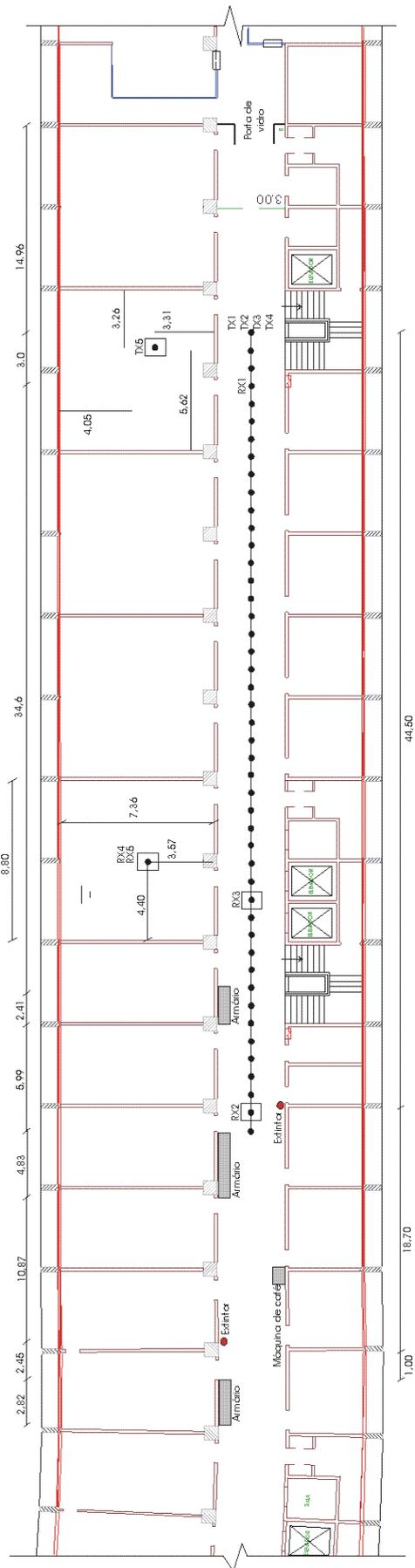


Figura 29 - Layout do Leme

- **Biblioteca**

Foram realizadas medidas na biblioteca do Campus de Engenharia da Universidade Federal em Niterói. Neste ambiente, o transmissor ficou fixo e receptor foi deslocado para três diferentes posições na biblioteca. Nestes ambientes foram analisadas apenas situações sem visada direta.

A biblioteca da UFF pode ser caracterizada como um ambiente com grande quantidade de estantes metálicas, colunas de concretos e mesas de madeiras. A Figura 30 apresenta o local de medidas, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

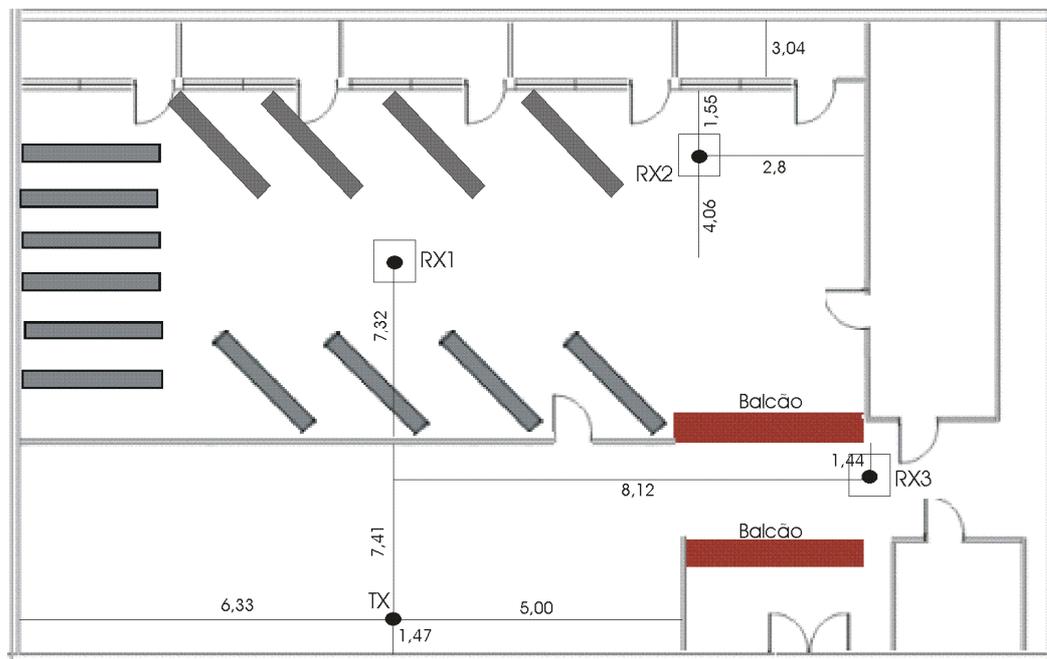


Figura 30 - Layout da Biblioteca

- **Indústria**

Foram realizadas medidas na oficina de Mecânica do Campus de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Neste ambiente, o transmissor ficou fixo e receptor foi deslocado para cinco diferentes posições na oficina. Nestes ambientes foram analisadas situações com visada, parcialmente com visada e sem visada.

A oficina de mecânica da UFF possui características semelhantes a um ambiente industrial, já que possui pequenos, médios e grandes espalhadores

metálicos. Além disso, esta oficina possui praticamente todas as características dos outros ambientes, como grandes janelas de vidro e objetos de madeiras.

A Figura 31 apresenta o local de medidas, as posições do transmissor, receptor, grid e dos objetos mais significativos dos ambientes de medidas.

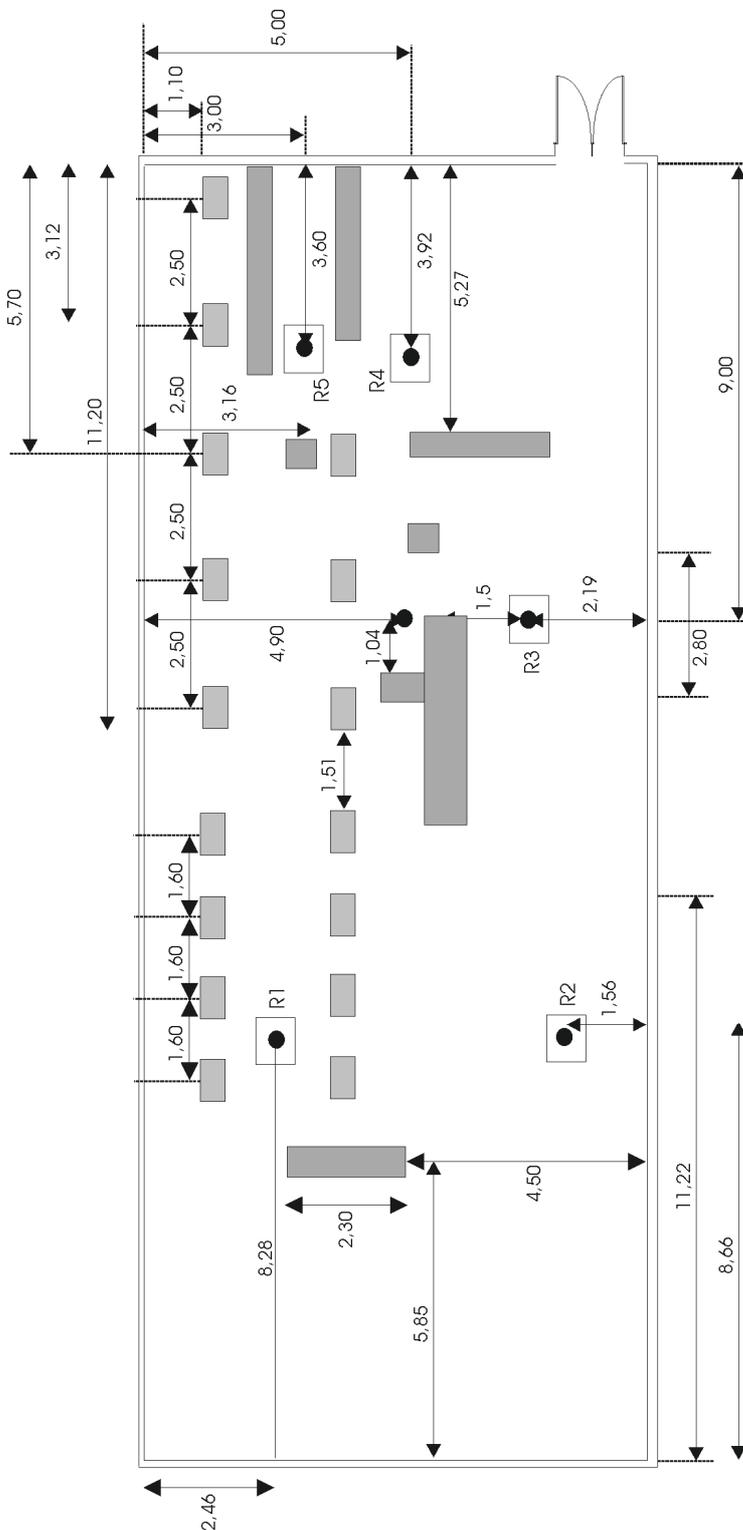


Figura 31 - Layout da Indústria