



PIBIC/CNPq/UFPG-2011



SISTEMAS DE ANTENAS INTELIGENTES USANDO RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE

João Vinicius Gomes Alves¹, Glauco Fontgalland²

RESUMO

Uma antena convencional possui suas características elétricas, tais como ganho, diretividade e diagrama de irradiação, entre outras, fixas, às quais dependem da sua geometria, da forma de alimentação e da frequência de operação. Por outro lado, antenas inteligentes possuem esse nome devido à possibilidade de terem as características citadas anteriormente mudadas de acordo com o ambiente eletromagnético às quais estão inseridas. Esta inteligência advém do fato de que o sinal recebido pelas antenas, ou arranjo de antenas, é digitalizado e posteriormente utilizado por um processador digital de sinais, o qual, por meio de *softwares* adequados, permite a variação das características do arranjo de modo a atender o objetivo específico de cada aplicação. Neste trabalho, o arranjo é composto de duas antenas dispostas linearmente; o processamento digital de sinais é realizado por um Rádio Definido por *Software* (RDS); e o algoritmo utilizado para estimação dos pesos necessários à cada elemento do arranjo é o Least Mean Square (LMS), de modo que se possa estimar a posição de um usuário móvel e com isso orientar o diagrama de irradiação do arranjo a este.

Palavras-chave: Antenas Inteligentes, LMS, Rádio Definido por *Software*

SMART ANTENNA SYSTEM USING SOFTWARE DEFINED RADIO

ABSTRACT

A conventional antenna has fixed some electrical characteristics like gain, directivity and radiation pattern, among others, which depend on their geometry, form of power supply and operating frequency. On the other hand, smart antennas is named like that because of the possibility of having the characteristics mentioned above changed according to the electromagnetic environment in which they belong. This intelligence comes from the fact that the signal received by the antenna, or antenna array, is scanned and subsequently used by a digital signal processor, which, through appropriated softwares, allows the variation of the arrangement to meet the specific purpose of each application. In this work, the array consists of two antennas linearly arranged; the digital signal processing is performed by a Software Defined Radio (SDR); and the algorithm used to estimate weights required for each element of the array is the Least Mean Square (LMS), in order to estimate the position of a mobile user and thereby to guide the radiation pattern of the arrangement to the user position.

Keywords: Smart Antennas, LMS, Software Defined Radio

INTRODUÇÃO

Apesar do intenso interesse obtido na última década, especialmente acerca de algoritmos adaptativos e de estimação da direção de chegada, do inglês *Direction-of-Arrival* (DOA), as antenas inteligentes datam desde antes da segunda guerra mundial, com o formador convencional de feixe Bartlett (BALANIS, 2005). O termo

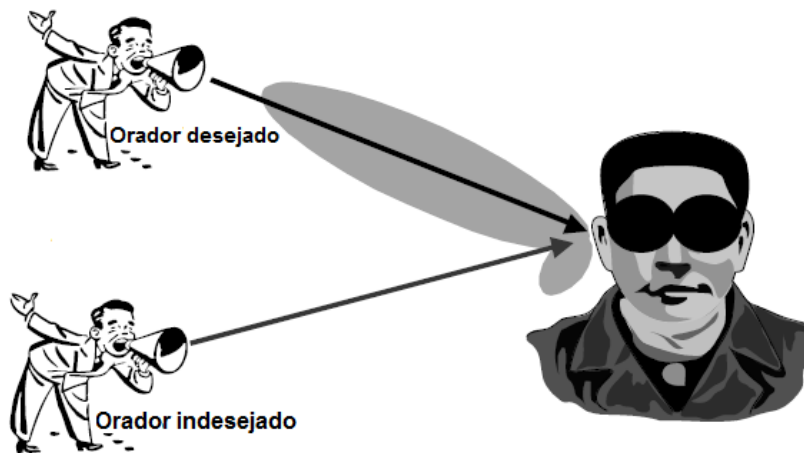
¹Aluno do Curso de Engenharia Elétrica, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: joao.gomes@ee.ufcg.edu.br

²Engenheiro Eletricista, Professor. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: fontgalland@dee.ufcg.edu.br

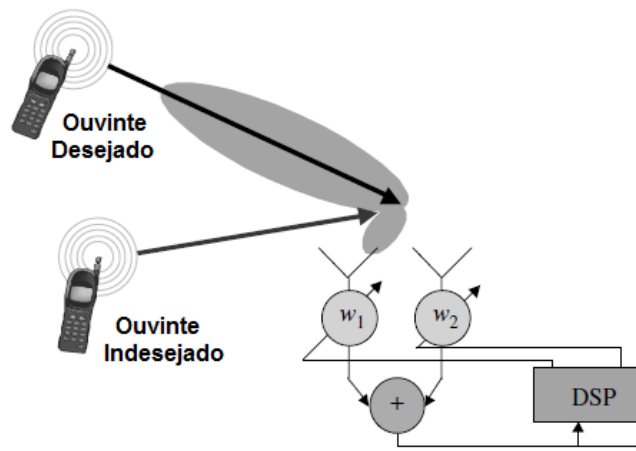
inteligente implica o uso de processamento de sinais de modo a modelar o diagrama de irradiação de acordo com certas condições. Além disso, ser inteligente neste caso significa ter um controle computacional do desempenho do arranjo (GROSS, 2005).

Antenas inteligentes são promessas para a melhoria de sistemas de radar, de aumento de capacidade em sistemas móveis sem fio e para as comunicações sem fio em geral a partir da implementação da *Space Division Multiple Access* (SDMA) (GROSS, 2005). Além disso, tal interesse se justifica, pois à medida que o número de usuários e a demanda por serviços baseados em redes sem fio crescem numa taxa exponencial, fazem-se necessárias maiores área de cobertura e qualidade de transmissão.

O objetivo do presente trabalho será explicado com o auxílio de uma analogia com o sistema do corpo humano. Para tal, com o intuito de se entender como um sistema de antenas inteligentes funciona, imaginem-se duas pessoas conversando dentro de uma sala escura, como pode ser visto na Figura 1 (a). O ouvinte entre as duas pessoas é capaz de discernir a localização do orador em movimento dentro da sala, pois a voz deste chega a cada sensor acústico, o ouvido, em tempos diferentes. O processador de sinais humano, o cérebro, estima a direção do orador a partir das diferenças temporais ou atrasos da voz recebida pelos dois ouvidos. Feito isso, o cérebro adiciona a força dos sinais obtidos em cada ouvido de modo que se foque no som oriundo da direção estimada. Além disso, se oradores adicionais se juntarem à conversa, o cérebro pode ignorar estes interferentes indesejados e concentrar-se em apenas uma conversa por vez. Ademais, o ouvinte pode responder à pessoa que fala na mesma direção estimada anteriormente, orientando o transmissor (a boca) na direção deste.



(a) Analogia humana



(b) Equivalente Elétrico

Figura 1. Analogia Antenas Inteligentes. (a) Analogia humana; (b) Equivalente Elétrico (BALANIS, 2005).

Sistemas elétricos com antenas inteligentes funcionam exatamente da mesma forma, porém no lugar de ouvidos, usam-se antenas e no lugar do cérebro, um processador digital de sinais, como pode ser visto na

Figura 1 (b). Além disso, depois que o processador de sinais mede os atrasos dos sinais oriundos de cada uma das antenas, aquele estima a DOA do sinal de interesse, do inglês *signal-of-interest* (SOI), e ajusta as excitações (ganhos e fases dos sinais enviados às antenas) de modo a produzir um diagrama de radiação que foque apenas, idealmente, no SOI, enquanto se elimina os sinais interferentes (BALLANIS, 2005).

Com relação ao presente trabalho e ainda lançando mão da analogia expressa acima, o ouvido ou o arranjo de antenas é composto por duas antenas enquanto que o cérebro ou processador de sinais é composto pelo algoritmo *Least Mean Squares* (LMS) e pela *Universal Software Radio Peripheral* (USRP), a qual representa a plataforma necessária ao rádio definido por *software*, do inglês *Software Defined Radio* (SDR). Desse modo, tem-se por objetivo personalizar o diagrama de radiação do arranjo de antenas de acordo com a posição de um usuário móvel.

MATERIAL E MÉTODOS

Material

- Infraestrutura de *Hardware*:

- 03 Antenas Omni Direcional Multilaser REAI5DBSMAML. Faixa de frequências: 2.4 – 2.5 GHz;; Ganho (Pico): 5dBi; Impedância: 50 Ω nominal; VSWR: 1.93 máx.; Perda de retorno máxima: - 10 dB; Radiação: Direcional; Potência Admitida: 1 W; Polarização: Linha vertical.

- Microcomputador Intel Core 2 Duo E7300 2.66 GHz. HD de 320 GB;

- 2 USRP 1 Ettus;

- Placas filhas USRP: 01 Flex 900, utilizada na transmissão; 02 DSBRX-LF, usadas na recepção.

- Analisador de espectro MAS – 700/ MAS – 710 Minipa. Faixa de frequência: 100 KHz a 1000 MHz; Impedância de saída: 50 Ω ; Tensão de entrada DC: 20 V máximo; Faixa mostrador de tela: 80 dB (10 dB/div).

- Infraestrutura de *Software*:

- GNU Radio 3.4;

- GNU Radio *Companion* 3.4git;

- Sistema Operacional: Ubuntu 11.04;

- MATLAB® versão 10.a.

Métodos

Rádio Definido por *Software*

Seja a citação abaixo proferida por Eric Blossom, um dos fundadores do GNU Radio. De acordo com ele, Rádio Definido por *Software* (*Software Defined Radio* - SDR) pode ser definido como:

“Rádio Definido por *Software* é a técnica de aproximar o código o máximo possível à antena. Com isso, problemas de *hardware* tornam-se problemas de *software*.” (FÄHNLE, 2010).

Em princípio, um *hardware* aplicável de maneira universal realiza a interface entre o sinal em banda básica e em rádio frequência (RF). A forma de onda do sinal transmitido é totalmente gerada através de *software*, assim como também o sinal recebido é totalmente processado e demodulado em algoritmos de *software*. Num SDR, a força computacional necessária para o processamento do sinal é requerida do computador.

Um benefício importante em escala industrial ao uso de SDR é a possibilidade de se mudar completamente etapas de processamento ou esquemas de modulação a partir de uma atualização de *software*. Isso resulta economia de tempo e dinheiro para novas pesquisas de *hardware*.

A estrutura universal de SDR com o software específico (GNU Radio) e hardware (USRP) é mostrada na Figura 2.

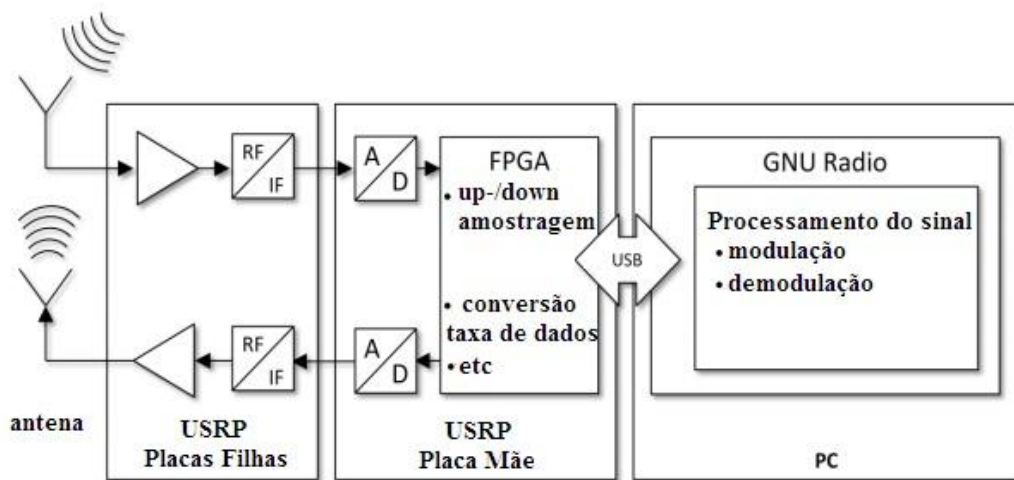


Figura 2. Diagrama de Blocos de um SDR (FÄHNLE, 2010).

Na Figura 2, a estrutura de um SDR é dividida em três blocos. O bloco mais à esquerda empreende o *front-end* de RF do *hardware*, que serve como interface ao domínio analógico RF. No segundo bloco, a inteligência da parte de *hardware* é implementada, formando a interface entre o mundo digital e analógico. No terceiro bloco, o processamento completo do sinal é feito, o qual é completamente desempenhado em *software*.

Em mais detalhes, a interface ao mundo analógico é dada, como mencionado, no lado esquerdo da Figura 2. Um sinal em RF analógico pode ser recebido ou transmitido pelas antenas do *front-end* de RF chamado de placas filhas. A flecha da esquerda para a direita, direcionada à placa mãe representa o caminho de recepção (Rx) enquanto que a da direita para a esquerda, o de transmissão (Tx). Os dois caminhos podem operar simultaneamente.

A possível faixa de frequências de operação é bem flexível (desde DC até 5.85 GHz), de acordo com a disponibilidade das placas filhas para a USRP. As placas filhas formam o *front-end* em RF da USRP e são conectadas à placa mãe da USRP. Na placa mãe da USRP, os sinais analógicos são convertidos em amostras digitais e transladados para banda básica dentro da FPGA. Além disso, também se realiza uma decimação.

No diagrama apresentado na Figura 2, os dados amostrados pela FPGA são enviados ao computador pela USB. Conectado ao computador (bloco à direita na Figura 2), o ambiente GNU Radio controla todas as capacidades de processamento do sinal digitalizado. GNU Radio é um ambiente de código livre, fornecendo vários blocos de processamento e análise de sinais já prontos ao desenvolvimento do rádio definido por *software*, além da possibilidade de criação de blocos adequados a uma aplicação específica.

No ambiente GNU Radio, Python e C++ são utilizados como principais linguagens de programação assim como uma aplicação de controle de grafos chamada GNU Radio Companion (GRC).

Estimação da DOA

A incidência do sinal em cada elemento do arranjo acontece com um atraso fixo entre elementos vizinhos. Estes atrasos podem ser convertidos em diferença de fase do sinal. A chave para se determinar o ângulo de chegada de sinais é a análise de suas fases, uma quantidade que cresce linearmente de zero até 2π a cada comprimento de onda λ ao longo do caminho da fonte emissora até o receptor, como mostra a Figura 3 (a). Isso significa que os elementos do arranjo recebem sinais com um acréscimo de fase determinado pelo comprimento do caminho d até a fonte emissora (JAMIESON & XIONG, 2010).

Em sistemas que realização a amostragem complexa do sinal analógico - i.e., em fase e em quadratura (I – Q) e o representam em forma de gráfico, como mostrado na Figura 3 (b), onde o ângulo medido no eixo I indica a fase - como o faz os rádios definidos por *software*, a fase torna-se particularmente fácil de ser analisada. A partir deste gráfico (I – Q), percebe-se que a distância d provoca um acréscimo de fase de $2\pi d/\lambda$, como é mostrado pelo ângulo medido do eixo I até o ponto x_1 , o qual representa o sinal recebido na antena 1. Além disso, no ponto de acesso com duas antenas retratado na Figura 3 (c), a distância ao longo de um caminho de chegada com abertura θ é uma fração de comprimento de onda maior para a segunda antena do que é para a primeira, com esta fração dependendo de θ , o ângulo de chegada.

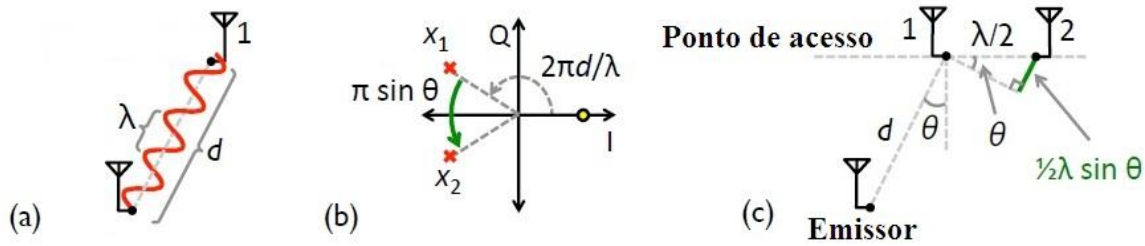


Figura 3. Princípio da estimação do ângulo de chegada: (a) A fase do sinal passa por um ciclo de 2π a cada comprimento de onda de rádio λ . (b) A representação complexa dos sinais emitidos (ponto cheio) e enviados (cruzes) nas duas antenas em (c). A fase corresponde ao ângulo medido da parte positiva do eixo I . (c) Um sinal chegando com abertura θ nas duas antenas (JAMIESON & XIONG, 2010).

Estes fatos sugerem uma maneira particularmente simples de determinar θ com um ponto de acesso composto por duas antenas sem levar em conta o efeito do multipercusso. Primeiro, usa-se um rádio definido por *software* para medir x_1 e x_2 diretamente, adquire-se a fase de cada um ($\angle x_1$ e $\angle x_2$) e então se resolve para θ ($\angle x_1 - \angle x_2$ está entre $-\pi$ e π) como:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\angle x_2 - \angle x_1}{\pi}\right) \quad (1)$$

LMS

A formação de feixe adaptativo pode ser obtida a partir de arranjos de antenas inteligentes, nas quais os pesos dos elementos componentes do arranjo são ajustados de modo a filtrar sinais interferentes oriundos de fontes indesejadas, assim como priorizar o sinal de interesse da fonte desejada. Algoritmos para formação adaptativa de feixe são caracterizados em termos de suas complexidade e capacidade de convergência. Um dos algoritmos adaptativos mais simples e práticos é o LMS, o qual não apresenta a necessidade de inversão da matriz de covariância ou de medidas acuradas das funções de correlação dos sinais envolvidos, como é mostrado na Figura 4 (SHUBAIR et al, 2005).

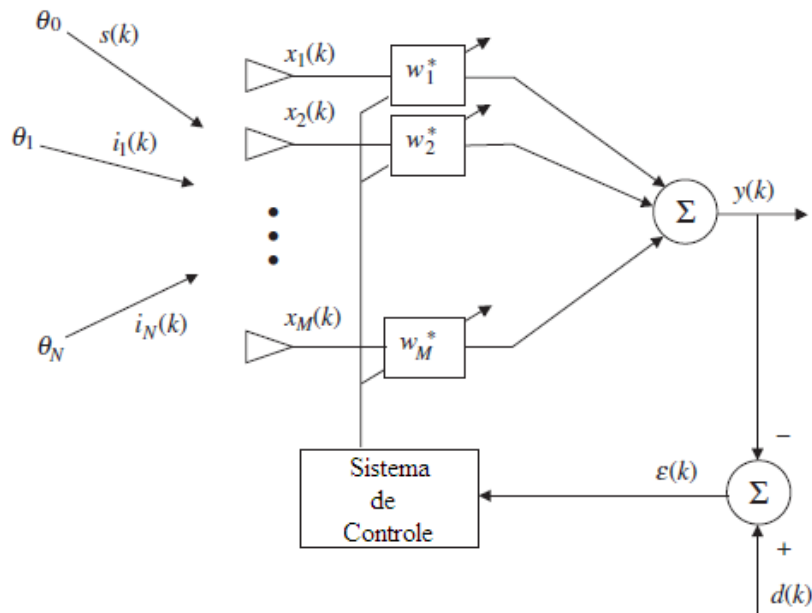


Figura 4. Sistema adaptativo para o LMS (GROSS, 2005).

O algoritmo LMS é baseado no método *steepest-descent*, o qual recursivamente adquire e atualiza o vetor de pesos do arranjo. É intuitivamente claro notar que correções sucessivas sobre o vetor de pesos na direção contrária ao vetor gradiente deveria levar ao erro médio quadrático mínimo, ponto a partir do qual o vetor de

pesos atingiria seu valor ótimo. Na versão padrão do algoritmo LMS, o vetor de pesos do arranjo w é inicializado arbitrariamente e é atualizado de acordo com a equação característica deste algoritmo:

$$w(n+1) = w(n) + \mu x(n) e^*(n) \quad (2)$$

onde $w(n+1)$ denota o vetor de pesos obtido na iteração $n+1$ e μ é o tamanho do passo adaptativo necessário ao algoritmo LMS, o qual é uma constante positiva que controla quão rápido o vetor de pesos estimados alcança sua solução ótima. Isso é feito a partir da minimização do arranjo de erro $e(n)$ o qual é definido como:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3)$$

onde $d(n)$ é o sinal de referência e $y(n)$ o sinal de saída do arranjo. Com o intuito de garantir a estabilidade e a convergência do algoritmo, o passo adaptativo deve ser escolhido entre a faixa especificada abaixo:

$$0 < \mu < 1/\lambda_{\max} \quad (4)$$

onde λ_{\max} é o máximo autovalor na matriz de entrada de covariância definida como:

$$R = \sum_{n=1}^K x(n)x^H(n) \quad (5)$$

Para o problema proposto neste trabalho, algumas simplificações foram consideradas. Como a matriz de autocorrelação é positiva definida, todos seus autovalores são positivos. Além disso, se os sinais interferentes forem apenas ruído e se houver apenas um SOI, a condição expressa na equação 5 pode ser aproximada por (GROSS, 2005):

$$0 \leq \mu \leq 1/2 \cdot \text{traço}(R) \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No estudo das antenas inteligentes, considera-se que as antenas são excitadas do mesmo modo, isto é, o(s) sinal (is) de interesse (s) possui (em) a mesma amplitude, porém fases diferentes, quando este (s) incide (m) no arranjo de antenas, de modo que o diagrama de irradiação da antena transmissora pode ser considerado omnidirecional no plano do arranjo das antenas, na região de campos distantes. Além disso, na ausência de fontes interferentes, com a presença de apenas um SOI e desprezando-se os efeitos de multipercurso e desvanecimento, o ângulo de chegada deste (s) sinal (is) pode ser estimado como mostrado anteriormente.

Para o presente trabalho, criou-se o bloco LMS no ambiente GRC, tendo como argumento de entrada o ângulo de chegada de modo que o vetor de pesos possa ser estimado de acordo com este ângulo e lançando-se mão de todas as simplificações e considerações descritas acima.

Deste modo, como representação do único usuário de interesse no sistema apresentado neste trabalho concebeu-se o diagrama de blocos no ambiente GRC apresentado na Figura 5, onde este usuário é simulado por meio de um seno na frequência de 934 MHz, valor este que apresentou o maior ganho no analisador de espectro para o sistema concebido, o qual pode ser visto na Figura 6.

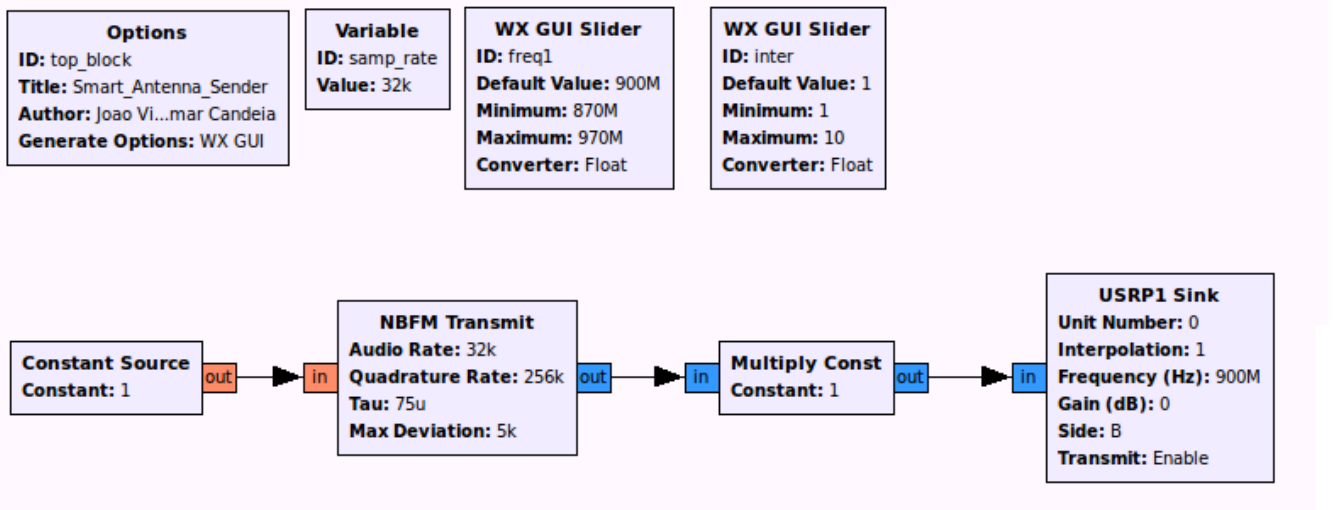


Figura 5. Sistema de antenas inteligentes usando o GRC - Transmissão

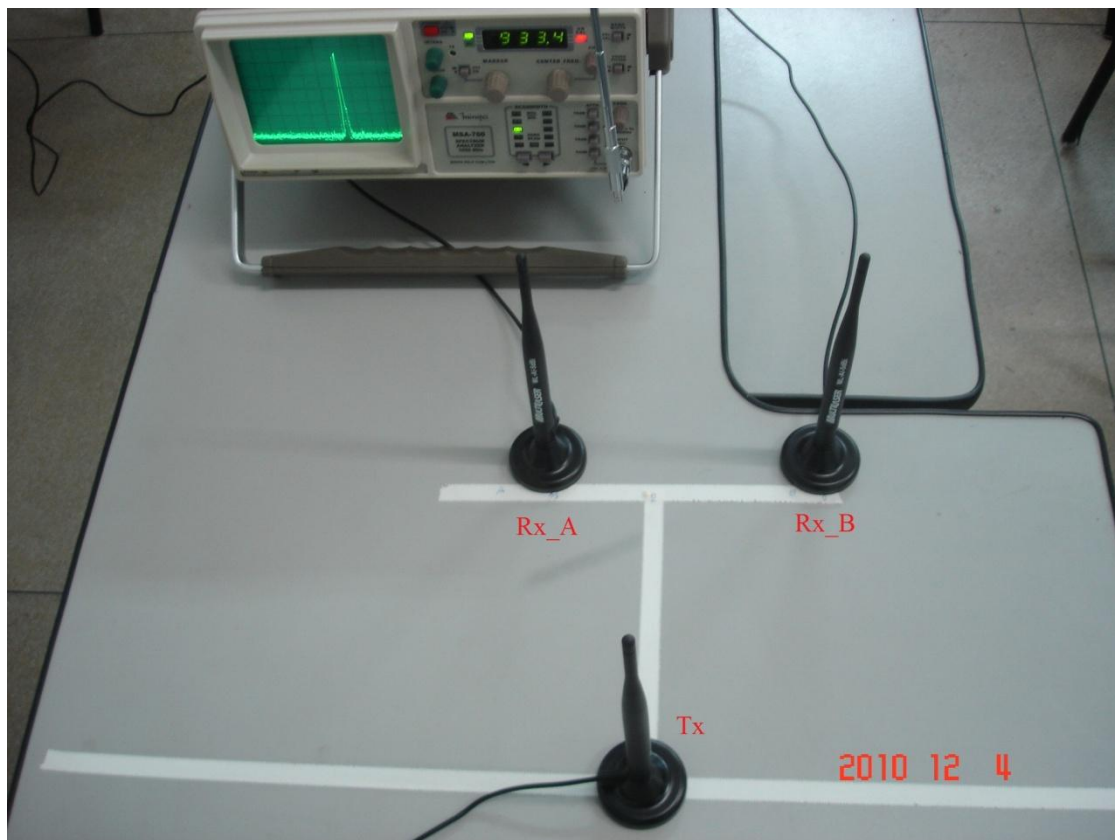
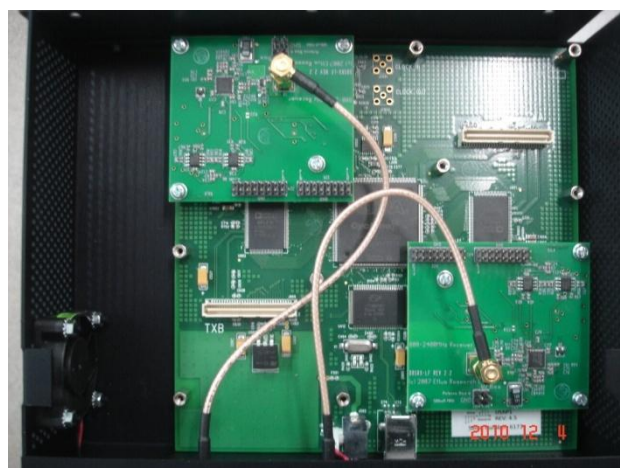


Figura 6. Sistema de antenas inteligentes

Na Figura 6, percebem-se que as duas antenas que compõem o arranjo, nomeadas Rx_A e Rx_B, estão separadas por meio comprimento de onda entre si e por meio comprimento de onda da antena transmissora, nomeada Tx. Para a frequência de operação escolhida, esta separação é de 16.06 cm. As placas USRP, com as placas filhas adequadas, usadas na transmissão e na recepção são mostradas na Figura 7 (a) e (b), respectivamente.

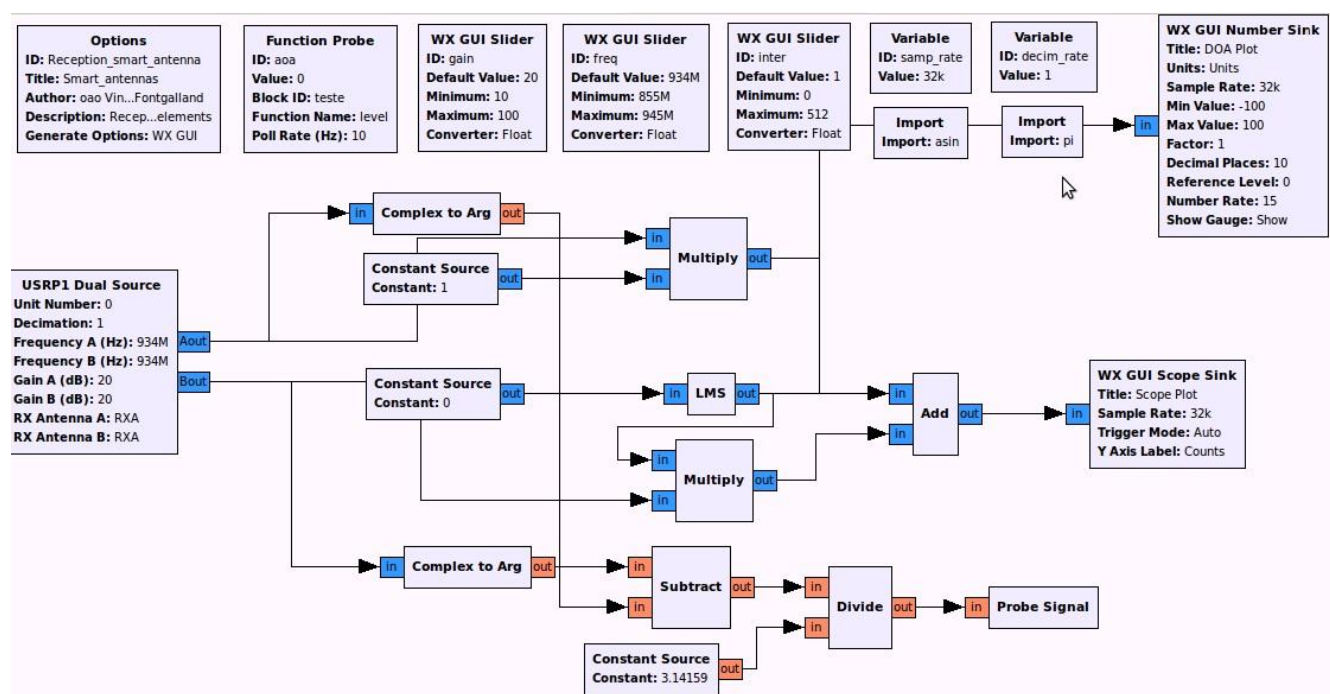


(a) Transmissão (b) Recepção

Figura 7. Placas filhas utilizadas na: (a) transmissão; (b) recepção.

A antena Tx é livre para se movimentar ao longo da linha reta mostrada na Figura 6. Porém, em apenas três posições os dados foram registrados, as quais foram denominadas de: Posição 0, a qual é mostrada na Figura 6; Posição 1, situada no extremo direito da mesa, após a antena Rx_B; e Posição 2, localizada no extremo esquerdo da mesa, após a antena Rx_A.

Com isso, inicialmente, concebeu-se no ambiente GRC o sistema de recepção apresentado na Figura 8.



Contudo, o ambiente onde o presente trabalho foi feito possuía muitas fontes interferentes e, devido a este fato, fez-se necessária a inclusão de filtros passa-faixa, conforme apresentado na Figura 9. Deste modo, além da inclusão dos filtros, inseriram-se os blocos *WX GUI FFT Sink*, o qual apresenta a FFT do sinal após a filtragem. Os sinais transmitidos com a antena Tx na posição 1 antes e após a filtragem, com a FFT do sinal filtrado, são apresentados na Figura 10.

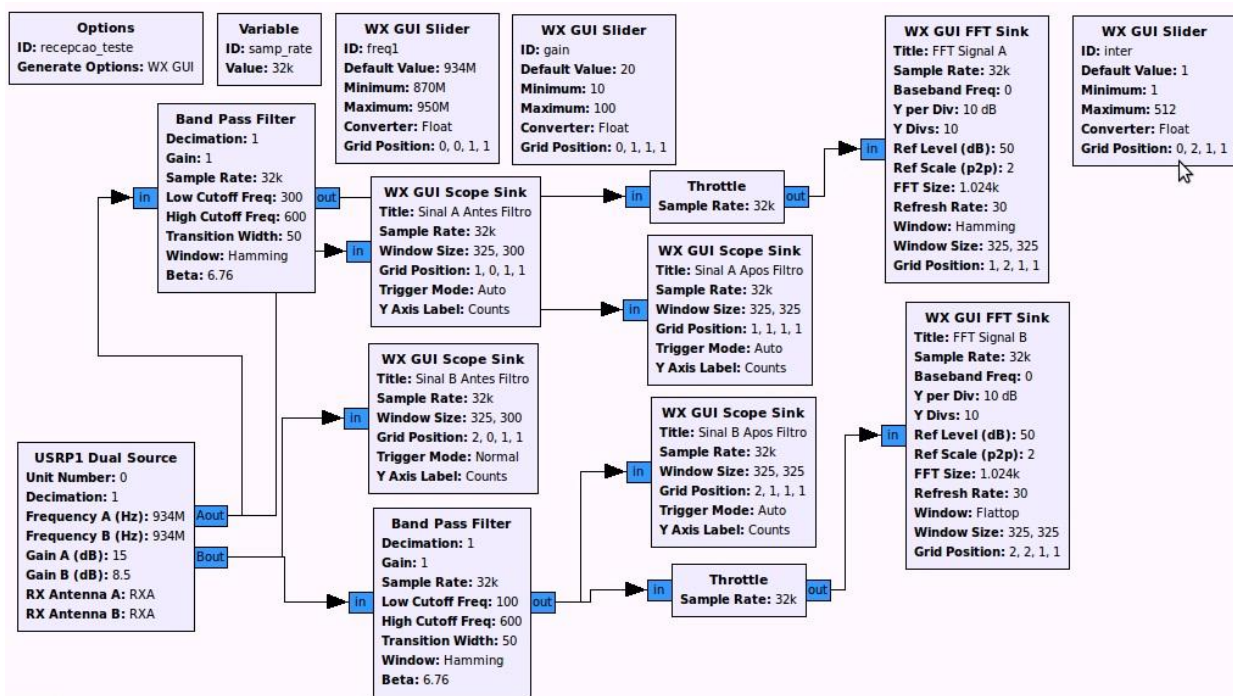


Figura 9. Sistema de recepção de antenas inteligentes usando o GRC com Filtros passa-faixa e cálculo da FFT.

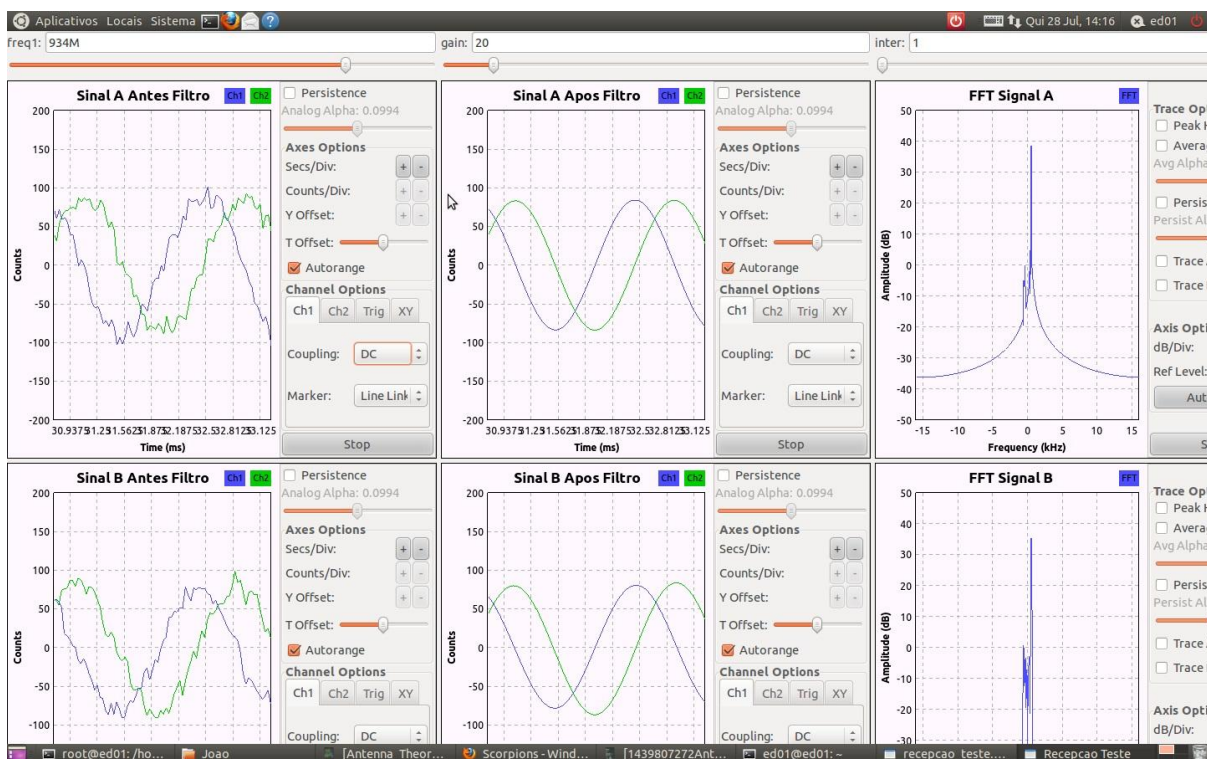


Figura 10. Sinal transmitido antes e após a filtragem, com as componentes de frequências do sinal em banda básica.

Sendo assim, após o condicionamento do sinal, pode-se estimar o ângulo de chegada, com o uso do sistema apresentado na Figura 11. Entretanto, devido às antenas utilizadas, principalmente a transmissora, as amplitudes dos sinais recebidos eram distintas, o que requeria ajustes individuais dos ganhos para cada uma

delas em cada uma das posições descritas. Desse modo, para a posição 1, os ganhos A e B, em dB, foram, respectivamente, 15 e 8.5; para a posição 0, 13.5 e 8.5; para a posição 2, 11 e 10. Feito isso, era de se esperar que o sistema concebido funcionasse de forma adequada. Contudo, devido ao argumento do arco seno ser maior do que o intervalo $[-1, 1]$, o sistema não estimou um ângulo de chegada apropriado ou próximo ao esperado. Este fato pode ser atribuído ao multipercurso e à presença de fontes interferentes, os quais contribuem para o ruído.

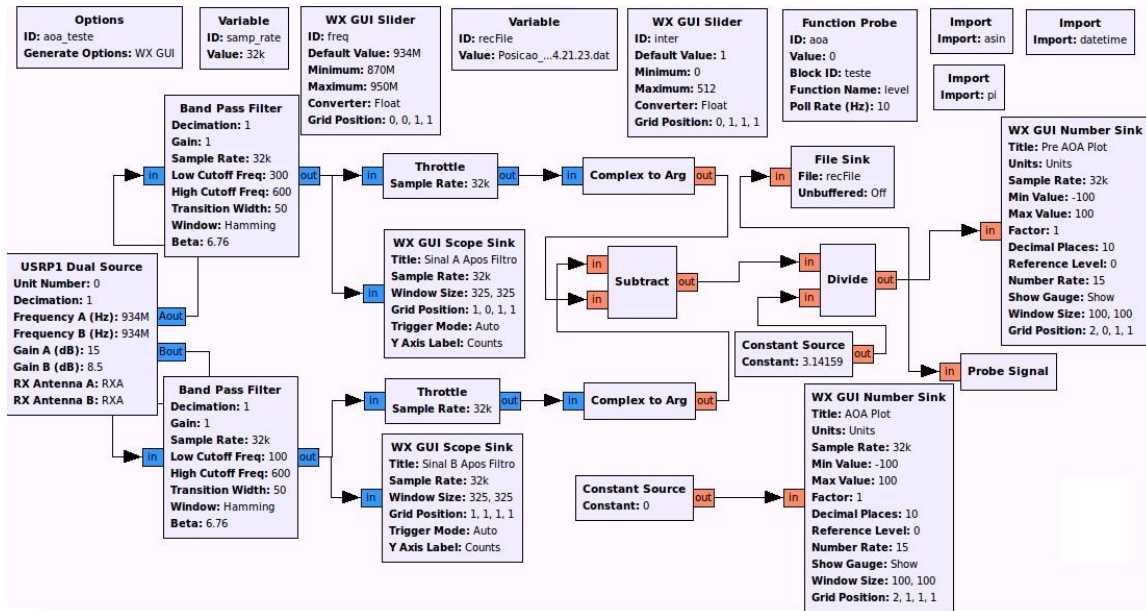


Figura 11. Sistema concebido para o teste do argumento do ângulo de chegada

Logo, os argumentos do arco seno foram registrados em um arquivo e, para cada posição, criaram-se gráficos com estes valores, de modo que se percebesse a existência do ruído. Para tanto, durante 10 segundos, registraram-se os valores em cada posição. Este procedimento foi repetido três vezes. Apesar do ruído, percebe-se que o valor médio dos gráficos é diferente para cada posição. Para a posição 0, os valores oscilaram de maneira significativa entre uma amostra e outra. Os gráficos referentes às posições 0, 1 e 2 são apresentados nas Figura 12, 13 e 14, respectivamente.

Para os testes realizados nas posições descritas, em decorrência da diferença de frequência de operação entre as especificações da antena (2.4 – 2.5 GHz) e a utilizada (934 MHz), o ganho nem o diagrama de radiação das antenas utilizadas não são como esperado, o que acarretou a não obtenção de resultados adequados em termos de posição e estimação de ângulo de chegada.

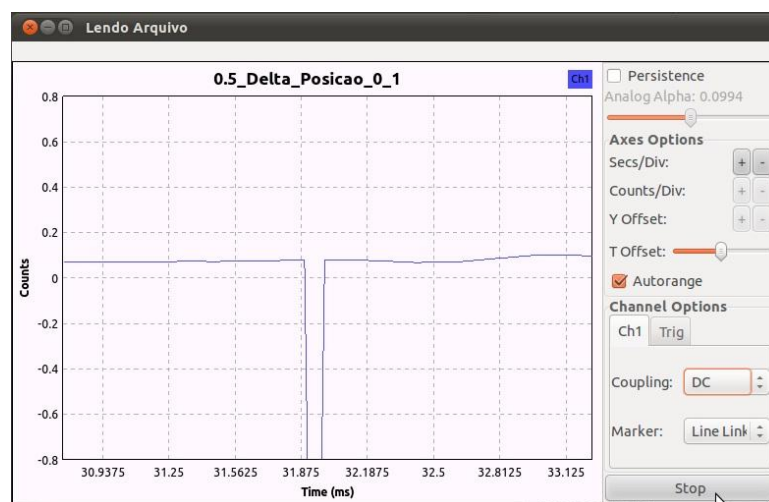


Figura 12. Argumentos do ângulo de chegada – Posição 0

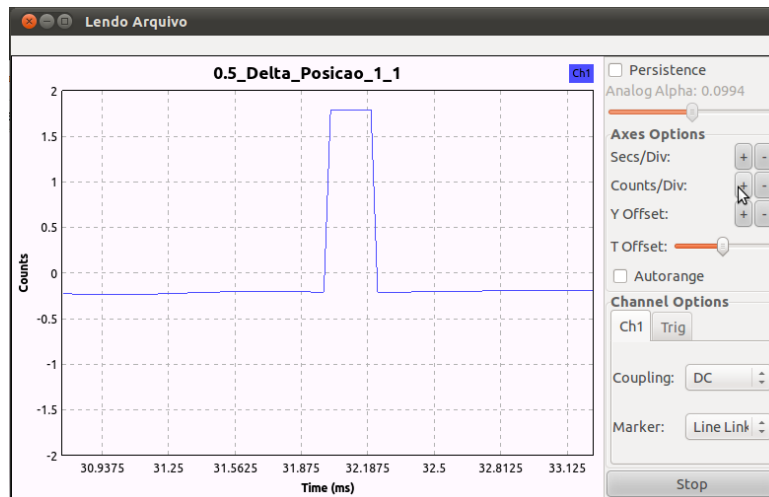


Figura 13. Argumentos do ângulo de chegada – Posição 1

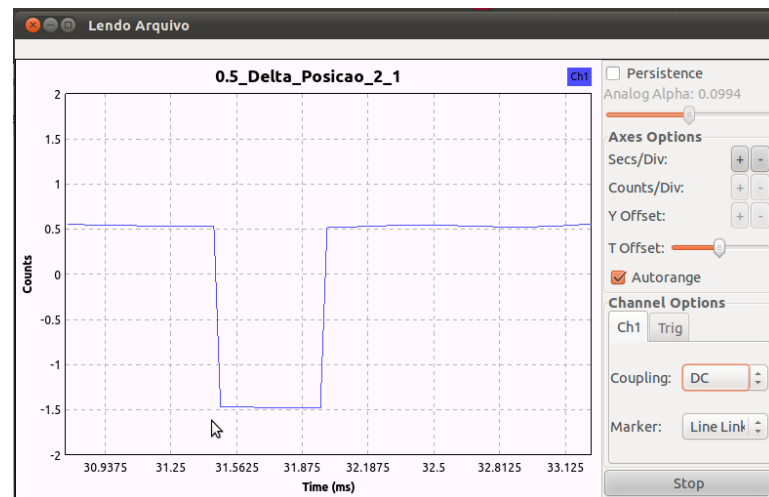


Figura 14. Argumentos do ângulo de chegada – Posição 2

CONCLUSÃO

A combinação do Rádio Definido por *Software* com as antenas inteligentes mostra as versatilidade e eficácia daquela tecnologia ao possibilitar, com somente a troca do algoritmo adequado, a concepção de diferentes sistemas numa mesma plataforma.

Sendo assim, tendo como base os resultados apresentados na seção anterior, pode-se afirmar que, em decorrência da presença de fontes interferentes e dos efeitos conhecidos como multipercurso e desvanecimento, o sistema concebido atende às especificações definidas quando de sua proposta, apesar da degradação do ruído no sinal quando do cálculo do ângulo de chegada.

Ademais, tendo em vista a melhora do presente trabalho futuramente, deve-se aumentar a quantidade de elementos no arranjo, construir ou utilizar antenas mais adequadas ao ambiente de teste, em especial em termos de diretividade e polarização, e tornar o sistema mais robusto, seja pela consideração dos efeitos citados anteriormente ou pela escolha de outro algoritmo de composição de pesos, tais como MUSIC ou ESPRIT.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento do projeto e pela concessão da bolsa PIBIC;

Aos colegas do Laboratório de Processamento de Sinais (LAPS) e do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, onde este projeto foi desenvolvido e realizado, por todo apoio e contribuição;

Aos professores Edmar e Glauco pela orientação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALANIS, C. A., **Antenna Theory: Analysis and Design**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, 2005. 1050p.

GROSS, F. **Smart Antenna for Wireless Communications** with MATLAB. McGraw-Hill. 2005.

FÄHNLE, M. **Software-Defined Radio with GNU Radio and USRP/2 Hardware Frontend: Setup and FM/GSM Applications**. Institute of Communication Technology, Ulm, Germany. Winter term 2009/2010.

FONTGALLAND, G.; GURJÃO, E.C. **Sistema de Antenas Adaptativas Usando Rádio Definido por Software**. Projeto de Pesquisa para Solicitação de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC).

SHUBAIR, R.M.; MERRI, A.; JESSMI, W. Improved Adaptative Beamforming Using Hybrid LMS/SMI Approach. In: Wireless and Optical Communications Network, 2005, Dubai. **Proceedings...** Dubai: 2005, p. 603-606.

XIONG, J.; JAMIESON, K. SecureAngle: Improving Wireless Security Using Angle-of-Arrival Information. In: SIGCOMM conferences. **Proceedings...**, Nova Delhi, 2010. Índia, 2010.