

Modulação e codificação adaptativos através de *Software Defined Radio*

Matheus Eidt¹, Lauro Culau¹, Matias Schimunek¹, Rafael Nicolay¹,
Roberto Schmidt¹, Cristiano Both¹, Maicon Kist²
Universidade de Santa Cruz do Sul¹, Universidade Federal do Rio Grande do Sul²
{matheus, laurotc, matiass, rafaelrodrigo, rmainardi}@mx2.unisc.br,
cboth@unisc.br, maicon.kist@inf.ufrgs.br

Resumo—Devido a crescente demanda por maiores taxas de transmissão, tem-se buscado otimizar equipamentos de rádio alterando suas características operacionais (como, por exemplo, a modulação e a codificação). A utilização de uma modulação e codificação padrão pode causar, tanto perda de dados, quanto a má utilização da taxa de transferência disponível no canal de transmissão. De modo a resolver este problema, uma das soluções é a utilização da tecnologia de *Software Defined Radio* (SDR). Essa tecnologia possibilita que os equipamentos de rádios tornem-se elementos dinâmicos, capazes de adaptarem suas características operacionais através de *software* e assim selecionar a modulação e codificação que obtenham o melhor desempenho do canal. Para que isso seja possível, é necessário que se defina a melhor configuração a ser utilizada a cada transmissão. Este trabalho propõe uma abordagem para um seletor de modulação e codificação para dispositivos de rádio, através de um *Software Defined Radio* que analisa a qualidade do canal nas tomadas de decisões. Os resultados obtidos demonstram uma melhoria considerável em comparação a um algoritmo que não utiliza modulação e codificação adaptativos.

I. INTRODUÇÃO

Software Defined Radio (SDR) permite que um rádio passe a ser um elemento dinâmico, capaz de alterar suas características operacionais, como largura de banda, modulação e codificação, de acordo com as configurações do *software* [1]. Além disso um SDR, por processar o sinal digitalmente, ao contrário de um rádio convencional, que, usualmente, processa o sinal analogicamente, permite uma melhor manipulação e processamento do sinal. A modulação e codificação adaptativas são técnicas onde parâmetros de transmissão do sinal são dinamicamente adaptados às condições de variação do canal [2]. A combinação entre o tipo de modulação e a taxa de codificação irá gerar um esquema chamado de *Modulation and Coding Scheme* (MCS) [3].

O SDR deve ser capaz de gerenciar esquemas de MCS de forma adaptativa, ou seja, esses dispositivos devem ser capazes de utilizar tanto modulações mais robustas, quanto as menos robustas, de acordo com as informações do canal. Entretanto, para realizar esse gerenciamento, é necessário um módulo, capaz de identificar qual MCS é o mais apropriado para a transmissão em determinada frequência. Além disso, é necessário o desenvolvimento de soluções de baixa complexidade e de custo reduzido.

Diversos trabalhos encontrados na literatura propõem sistemas com modulação e codificação adaptativos em SDRs. O estudo de Xia, Zhou e Giannakis [4], propõe um transmissor adaptativo MIMO-OFDM (*Multi-Input Multi-Output - Orthogonal Frequency Division Multiplexed*), aplicando um processamento no vetor de sinais, capaz de gerar interferências, em cada subportadora OFDM. No trabalho de Souryal [5], é proposta uma estimação das condições do canal, de modo a melhorar o desempenho do alcance do sinal, sem reduzir a

taxa de transmissão oferecida. Souryal assegura que ao variar a modulação é possível que canais tenham mais bits alocados.

Tendo em vista que a literatura não oferece implementações de SDRs em dispositivos reais, este trabalho propõe-se a definir corretamente o MCS, através da análise da qualidade do canal, com a finalidade de otimizar a transmissão do dispositivo de rádio. A partir disto, foi desenvolvido e avaliado um seletor de modulação e codificação adaptativo para SDRs, que é o responsável por, através da avaliação do canal, definir qual a modulação e codificação deve ser utilizada na transmissão.

O restante desse trabalho está organizado da seguinte forma: Na Seção II, são expostos os conceitos que englobam a proposta de SDR. Na Seção III, são apresentadas as propostas encontradas na literatura que abordam sistemas com modulação e codificação adaptativos em SDRs. A Seção IV é apresentada a proposta e o protótipo desenvolvido do seletor, descrevendo sua arquitetura. Na Seção V é descrita a metodologia de avaliação do módulo seletor adaptativo. A Seção VI apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados. Por fim, a Seção VII apresenta considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

II. *Software Defined Radio*

SDR permitem que os equipamentos de rádio sejam reconfigurados via *software*. A capacidade de reconfiguração é útil para aprimorar as funções do rádio, sem que seja necessário alterar o *hardware* desse equipamento [6]. Um SDR realiza diversos processamentos de sinal em um computador de propósito geral ou em uma plataforma de *hardware*. Em um rádio que implementa SDR, muitas das manipulações e processamentos de sinal, são feitas em *software*, ao invés de *hardware*. Assim, o sinal é processado digitalmente, ao contrário de um rádio convencional, que, usualmente, processa o sinal analogicamente.

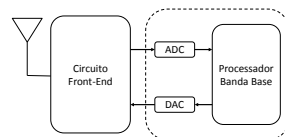


Figura 1. Diagrama de blocos SDR

Para realizar a digitalização do sinal, é necessário um dispositivo conversor, chamado *Analog to Digital Converter* (ADC). O diagrama de blocos básico de um SDR é apresentado na Figura 1. O processo de conversão ADC, é realizado após o circuito *Front End* (FE), que é usado para converter o sinal para frequências mais baixas, chamadas de *Intermediate*

Frequency (IF). O ADC tem a função de digitalizar e enviar o sinal para o processador banda base, onde são realizados todos os processos como demodulação, codificação do canal entre outros [7]. Em um rádio convencional, todos esses processos são realizados em *hardware*.

A. Modulation and Coding Scheme

O MCS é um termo utilizado para descrever a combinação do esquema de modulação da portadora e o esquema de codificação utilizado quando se transmitem dados [8]. As subportadoras de dados são codificadas utilizando técnicas *Forward Error Correction* (FEC) antes de ser transmitidas. Essas técnicas consistem em adicionar aos dados, informação redundante, que permitem a detecção e correção de erro pelo dispositivo receptor. Após a codificação FEC, os bits de dados são mapeados em uma constelação de modulação, que é formada por símbolos que definem a quantidade de dados que podem ser transmitidos. A combinação entre uma constelação de modulação e uma codificação FEC produz uma configuração MCS. O número de símbolos de uma constelação de modulação, relaciona-se com a quantidade de dados que podem ser transmitidos em cada símbolo da modulação.

Cada tecnologia define suas configurações MCS. As configurações MCS para multiplexação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), dependem da constelação de modulação e taxas de codificação FEC utilizadas. Quanto mais robusto for o MCS utilizado, há uma maior confiabilidade da transmissão, porque há uma maior capacidade para detectar e corrigir erros. Entretanto, a taxa de dados da rede é reduzida. Desse modo, é importante escolher corretamente o MCS, para que não exista uma transmissão redundante de dados, sem necessidade. Essa transmissão de dados redundantes é conhecida como *coding rate*, que significa a quantia de dados redundantes transmitidos para cada bit de dados. Dessa maneira, um *coding rate* 1/2, utiliza 1 bit de redundância a cada 2 bits de dados.

Nos sistemas de rádio tradicionais, a modulação e a codificação são projetadas para o pior cenário. Assim, na maioria das vezes, são utilizados modulações e codificações mais robustos do que o necessário. Para que isso não ocorra, uma das opções é a utilização de sistemas com modulação e codificação adaptativos, ou *Adaptive Modulation and Coding* (AMC). Nos sistemas AMC, é necessária uma constante monitoração das condições do canal. A ideia central dos sistemas AMC, é adaptar dinamicamente o MCS, com o objetivo de adequar a eficiência espectral global às condições do canal [9].

Para estimar a condição do canal, foi definida a utilização da *Carrier to Noise Ratio* (C/N). C/N é a taxa de energia relativa em relação ao ruído de um sistema, que permite analisar se uma portadora ainda pode ser reconhecida ou se foi destruída por ruídos. O essencial para o presente trabalho é que a C/N provê um valor para a qualidade de um canal de comunicação.

A partir de dados que estimam as condições do canal, como o C/N, o sistema deve ser capaz de reconhecer o nível de modulação e codificação que deverá ser utilizado, bem como o nível de redundância das informações que devem ser enviados. Desse modo, em um canal com alto C/N, não é necessário enviar os dados com muita redundância, visto que, dificilmente os dados são perdidos durante a transmissão. Entretanto, caso um canal tenha um C/N baixo, é necessária uma taxa maior de redundância de dados, para que a perda de dados durante a transmissão seja reduzida. A proposta deste trabalho, é que o rádio seja reconfigurado via *software*, ou seja, as características operacionais do rádio são alterados através de *software*, utilizando SDRs.

III. TRABALHOS RELACIONADOS

A utilização de sistemas de MCS adaptativo são importantes para adequar a transmissão de acordo com as condições do canal. No trabalho de Souryal [5], é proposta uma estimação das condições do canal, de modo a melhorar o desempenho do alcance do espalhamento, sem reduzir o *bit rate* oferecido. Com a utilização de modulação adaptativa, os *bits* podem ser alocados de forma a maximizar o número de *bits* transmitidos ou minimizar a probabilidade global de erros. Em canais de frequência seletiva, alguns subcanais apresentam um enfraquecimento maior de sinal, enquanto outros apresentam uma atenuação relativamente insignificante. Ao variar a modulação dos subcanais, Souryal assegura que os subcanais com ganho favorável, tenham mais *bits* alocados do que os canais com atenuação mais profunda.

Através da análise de resultados, Souryal observa que OFDM adaptativo é mais sensível a erros de estimação do canal do que OFDM com modulação uniforme. Entretanto, a vantagem do OFDM adaptativo continua significativa, mesmo na presença de erros de estimação de canal, para canais com variação relativamente lenta. Por outro lado, o impacto de erros de estimação da condição de canais com variação mais rápida, pode ser significativo.

A utilização de OFDM é necessária neste trabalho, para reduzir erros de desvanecimento ou interferência, além de permitir o uso do espectro de forma paralela. No trabalho de Wang [10], um sistema OFDM com múltiplos usuários é utilizado para transmissão de vídeos através da estação base. Neste trabalho a base conhece as informações de condição do canal (*Channel State Information* (CSI)), bem como a taxa de distorção dos fluxos do vídeo, e busca alocar recursos do espectro para os usuários de acordo com essas informações. Wang utiliza apenas os conceitos de OFDM para transmissão do vídeo, enquanto este trabalho, busca utilizar diversas outras técnicas, além de se preocupar com a implementação do sistema proposto em um dispositivo de rádio. Com base nos conceitos e trabalhos existentes, a próxima seção apresenta a arquitetura do módulo implementado.

IV. MÓDULO SELETOR ADAPTATIVO

O Módulo Seletor Adaptativo é projetado para SDR, isto é, a abordagem chave está no fato de que a solução apresentada, descreve a implementação deste seletor em um dispositivo de rádio definido por *software*. Além disso, é proposto um receptor para realizar transmissão e recepção completas. A seguir descreve-se a arquitetura do Seletor, e os mecanismos para escolha de canais.

A. Módulo Transmissor

As etapas do sistema transmissor são apresentadas na Figura 2. Inicialmente, uma lista de canais pré-definidos é carregada. O transmissor deve verificar se o primeiro canal dessa lista está livre para transmissão. Caso o canal esteja ocupado, a lista é percorrida em sequência, até que um canal livre seja encontrado. Quando um canal livre é encontrado, o transmissor verifica qual MCS deverá ser utilizado. Na primeira leitura, o valor do C/N lido é armazenado na memória do transmissor. Nas leituras seguintes, o valor do C/N é inicialmente comparado com o valor armazenado em memória. Caso esses valores sejam diferentes, o transmissor verifica na Tabela I qual MCS deve ser aplicado aos dados e armazena o novo valor do C/N na memória. Caso não exista uma alteração no valor do C/N, o MCS é mantido.

| Índice MCS | Modulação | Coding rate | Bits por símbolo | C/N threshold (dB) |
|------------|-----------|-------------|------------------|--------------------|
| 0 | QPSK | 1/2 | 2 | 50 |
| 1 | QPSK | 3/4 | 2 | 45 |
| 2 | 16-QAM | 1/2 | 4 | 40 |
| 3 | 16-QAM | 3/4 | 4 | 35 |
| 4 | 64-QAM | 1/2 | 6 | 30 |
| 5 | 64-QAM | 2/3 | 6 | 25 |
| 6 | 64-QAM | 3/4 | 6 | 20 |

Tabela I
RELAÇÃO DO *threshold* DO C/N COM O VALOR DO MCS

Após a aplicação do MCS nos dados, o transmissor envia, através de um canal de controle, o canal e o MCS que deverão ser utilizados pelo receptor, de forma a receber os dados corretamente. A transmissão na rede sem fio é então realizada. O transmissor deve, a cada período pré-determinado (2 segundos), interromper o envio de dados para verificar se o canal em que transmite ainda está livre. Dessa forma, o sistema retorna à etapa de verificação do canal. Essa interrupção deve ocorrer pois um usuário não pode ocupar um canal em que não possua licença para uso caso o usuário licenciado esteja utilizando. Dessa maneira, a cada período pré-determinado (1 segundo) é necessário sensoriar o canal para verificar se o usuário licenciado não está transmitindo. É importante ressaltar que as transmissões das informações de qual canal e qual MCS deverão ser utilizados pelo receptor, é realizada por um canal de controle. Dessa maneira, essas transmissões não interferem nas transmissões de dados do canal sem fio.

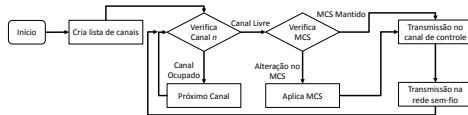


Figura 2. Fluxograma do sistema transmissor

B. Módulo Receptor

O sistema receptor, opera de maneira diferente do receptor. Inicialmente, o receptor aguarda a recepção de comandos pelo canal de controle. Quando um comando é recebido, o receptor verifica se deve alterar o canal em que busca os dados. Em caso afirmativo, o canal é alterado. Na sequência, o receptor verifica se o MCS que deve utilizar é diferente do que já está sendo utilizado, com base nos dados da Tabela I. Caso a recepção seja a primeira, o MCS deve ser necessariamente alterado. O índice do MCS utilizado é, então, salvo na memória do receptor. Nas transmissões futuras, esse valor é comparado com o índice recebido do transmissor. Caso seja necessário, o MCS é alterado. Por fim, o receptor inicia a recepção dos dados no canal sem fio.

A recepção no canal sem fio é interrompida sempre que o receptor recebe comandos no canal de controle. Desta maneira, quando existe recepção no canal de controle, o sistema volta ao início do fluxo.

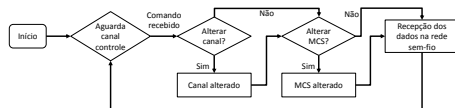


Figura 3. Fluxograma do sistema receptor

V. AVALIAÇÃO DO MÓDULO

Esta seção apresenta detalhes da metodologia utilizada para avaliação da implementação do Seletor de MCS. O foco dessa metodologia é identificar o impacto do seletor adaptativo no desempenho da transmissão referente, tanto a perda de dados, quanto a má utilização da taxa de transferência disponível no canal de transmissão. A seguir, apresenta-se o ambiente de testes utilizado para realização dos experimentos e o cenário avaliado.

A. Ambiente de Experimentação

Para realizar os experimentos em um cenário real, foi utilizado o USRP2[11], que permite o desenvolvimento e implementação de sistemas flexíveis de SDR. O USRP2 é, idealmente, projetado para o desenvolvimento de aplicações como prototipação de camada física, acesso dinâmico de espectro e rádios cognitivos, que necessitam alto desempenho de rádiofrequência e grande largura de banda.

Também utilizou-se a ferramenta GNU Radio, que auxilia no desenvolvimento de *software*, possibilitando a implementação de SDRs. É uma ferramenta de software livre e código aberto e fornece diversos blocos de processamento de sinais. Pode ser utilizado com *hardware* de rádiofrequência externo de baixo custo, possibilitando a criação de SDRs, ou pode ser utilizado sem *hardware*, através de um ambiente de simulação.

B. Cenário

Para testar o comportamento do seletor, os módulos de transmissão e recepção foram executados em dois USRP, cada um com uma rede sem-fio operando em 2.4 GHz, permitindo a comunicação completa entre os dispositivos. O USRP responsável pela transmissão, verifica a qualidade do canal e atribui um MCS aos dados. O transmissor informa ao receptor qual canal e qual MCS deve ser utilizado e, em seguida, envia os dados. O receptor utiliza o MCS correto e qualifica os dados como corretos ou não.

Os módulos de transmissão e recepção estão distantes entre si 20 cm, em ambiente interno. Considerando esse ambiente, os módulos estarão sujeitos a todos os tipos de interferência. Entretanto, devido à pequena distância entre os dois módulos, a atenuação do sinal (*path loss*) e a propagação por diferentes caminhos (*multi-path*), devido à distância podem ser desconsideradas. A transmissão entre os dois módulos tem duração de 2 segundos, sendo interrompida durante 1 segundo para que o canal seja sensoriado. Esse processo (transmissão + sensoriamento), é realizado durante 60 segundos. Os pacotes enviados possuem tamanho de 64 KiloBytes (KB).

No primeiro cenário, é realizado o envio de dados sem MCS, e, no segundo cenário, utiliza-se os diferentes MCS's propostos neste artigo. A partir desse cenário de teste, é possível identificar o correto funcionamento do sistema proposto. Em seguida, são realizados dois cenários de teste para comparar a quantidade de pacotes recebidos corretamente na implementação sem nenhum MCS com a implementação com MCS adaptativo deste artigo. Além disso, outro cenário leva em consideração o *throughput*, que é a taxa de vazão de dados da implementação. Na seção seguinte, são apresentados os resultados e os testes realizados no cenário proposto.

VI. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após uma série de repetições dos experimentos, para garantir 95% de confiança. Os resultados refletem o cenário definido na Seção V. Foram realizadas dez medições do *throughput* para

cada cenário. A Figura 4 ilustra, no eixo vertical, o *throughput*, em *Kilobytes* por segundo (KB/s), e, no eixo horizontal, o número de medições realizadas. A partir da análise da Figura 4, verifica-se uma grande diferença entre uma implementação que não utiliza MCS adaptativo. A vazão média dos dados na implementação realizada neste artigo ficou, em média, 3 KB/s acima da implementação sem MCS adaptativo.

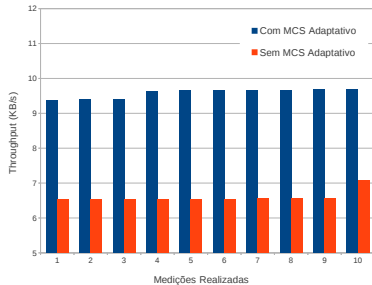


Figura 4. Resultados de *throughput*

Já na Figura 5, é realizada a análise dos cenários de teste para comparar a quantidade de pacotes recebidos corretamente. O eixo vertical representa a porcentagem de pacotes corretos recebidos. Já o eixo horizontal apresenta o número de medições realizadas. Desta maneira, é possível comparar os resultados obtidos nesta implementação com uma transmissão sem MCS. Comparando os dados da Figura 5, a porcentagem de dados recebidos corretamente é superior à implementação sem MCS adaptativo. Isso ocorre pelo fato de a implementação adaptativa avaliar a condição do canal e enviar um MCS apropriado a essa condição, enviando mais quadros e, consequentemente, possuindo um *throughput* mais alto. Além disso, a porcentagem de dados corretos também é um fator relevante, uma vez que, com o MCS apropriado, uma quantidade menor de dados é perdida.

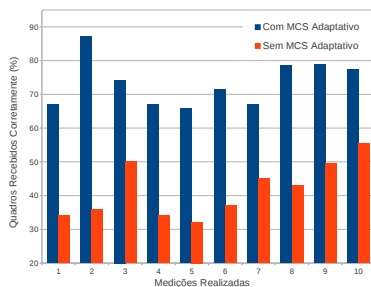


Figura 5. Porcentagem de quadros recebidos corretamente

VII. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O seletor de MCS adaptativo para SDR é uma técnica que permite alterar, conforme a necessidade, a codificação e a modulação utilizada para a transmissão de dados em um dispositivo de rádio. Essa adaptação permite, que com a análise de C/N do canal, diferentes tipos de MCS sejam utilizadas na

transmissão de dados. A proposta deste trabalho permite um melhor aproveitamento do canal de transmissão, reduzindo a má utilização da taxa de transferência, devido a utilização de uma modulação e codificação mais adequada ao canal diminuindo, assim a perda de dados durante a transmissão.

Definida a abordagem, implementou-se o módulo de seleção adaptativa para MCS para um sistema de transmissão utilizando rádio. Realizando experimentos em um ambiente real, foi possível analisar a qualidade dos canais e, com base nessa informação, foram tomadas as decisões sobre qual seria o melhor tipo de modulação e codificação a ser utilizada no canal. Os resultados mostraram que a utilização de um seletor para o MCS que se adapta ao canal ao invés de um padrão fixo, permitiu um melhor desempenho nas transmissões dos equipamentos testados. Com isso, conclui-se que a proposta pode trazer benefícios para a comunicação via rádio, uma vez que a vazão de dados é maior que em uma proposta de MCS fixo. Além disso, através dessa implementação, a taxa de dados recebidos corretamente é superior à implementação de modulação e codificação fixos, mesmo que mais dados sejam transmitidos. Dessa forma, verificou-se que a solução via SDR se mostrou adequada ao propósito.

Um trabalho futuro consiste em transmitir informações do receptor para o transmissor. Dessa forma, seria possível resolver um dos principais problemas enfrentado por esta implementação: quando receptor e transmissor estiverem em distâncias maiores, diferentes níveis de ruído serão encontrados no transmissor e no receptor. Dessa maneira, caso o receptor informe ao transmissor as características do canal, o MCS poderá ser atribuído levando em consideração essa informação, melhorando a recepção dos dados.

REFERÊNCIAS

- [1] A. L. G. Reis, A. Barros, K. Gusso Lenzi, L. Pedroso Meloni, and S. Barbin, "Introduction to the software-defined radio approach," *IEEE (Revista IEEE America Latina) Latin America Transactions*, vol. 10, no. 1, pp. 1156–1161, 2012.
- [2] R. Kunst, C. B. Both, L. Z. Granville, and J. Rochol, "On the impact of hybrid errors on mobile wimax networks," *Computer Networks*, vol. 55, no. 16, pp. 3659–3671, Nov. 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2011.04.018>
- [3] Motorola, "Adaptive modulation and coding (amc)," 2000, disponível em: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG1_RL1/TSGR1_17/docs/PDFs/R1-00-1395.pdf. Acesso em: setembro 2013.
- [4] P. Xia, S. Zhou, and G. Giannakis, "Adaptive mimo-ofdm based on partial channel state information," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 1, pp. 202–213, 2003.
- [5] M. Souryal and R. Pickholtz, "Adaptive modulation with imperfect channel information in OFDM," *IEEE International Conference on Communications*, vol. 6, pp. 1861–1865 vol.6, 2001.
- [6] M. Islam, M. Hannan, S. Samad, and A. Hussain, "Bit-error-rate (BER) for modulation technique using software defined radio," *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 02, pp. 445–447, 2009.
- [7] A. Marwanto, M. Sarijari, N. Faisal, S. K. S. Yusof, and R. Rashid, "Experimental study of ofdm implementation utilizing GNU Radio and USRP - SDR," *IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, pp. 132–135, 2009.
- [8] Lever, "MCS," 2013, disponível em: http://telecoms-training.co.uk/dict_term_01.php?term=MCS. Acesso em: setembro 2013.
- [9] J. Yang, N. Tin, and A. Khandani, "Adaptive modulation and coding in 3g wireless systems," *IEEE 56th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 544–548 vol.1, 2002.
- [10] D. Wang, L. Toni, P. Cosman, and L. Milstein, "Uplink resource management for multiuser ofdm video transmission systems: Analysis and algorithm design," pp. 1–14, 2013.
- [11] ETTUS RESEARCH, "USRP2," 2013, disponível em: <https://www.ettus.com>. Acesso em: setembro 2013.