

## PROJETO MULTIDISCIPLINAR DE UM ANALISADOR DE ESPECTRO COM BANCOS DE FILTROS E SUBAMOSTRAGEM

Pedro Henrique Borghi de Melo – pedroborghi@live.com  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Alberto Carazzai, 1640  
86300-000 – Cornélio Procópio - Paraná

Eduardo Alves Hodgson – hodgson@utfpr.edu.br  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Alberto Carazzai, 1640  
86300-000 – Cornélio Procópio - Paraná

Renata Coelho Borges – renatacoelho@utfpr.edu.br  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Alberto Carazzai, 1640  
86300-000 – Cornélio Procópio - Paraná

Vander Teixeira Prado – vanderprado@utfpr.edu.br  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Alberto Carazzai, 1640  
86300-000 – Cornélio Procópio - Paraná

**Resumo:** Como característica fundamental de inovações 4.0, o elemento comunicação entre dispositivos, nas formas de transmissão e processamento de sinais, é tratado no presente trabalho de forma estruturada a fim de incentivar e estimular a integralização das áreas do conhecimento de Engenharia Eletrônica. Com o advento da Internet das Coisas, aumentou-se a demanda por transmissores de dados que trabalham em faixas de frequência cada vez maiores, exigindo, assim, conversores analógico-digital (A/D) com taxas de amostragem cada vez mais altas. Neste trabalho, é proposto um projeto multidisciplinar para implementar um analisador de espectro de alta taxa de amostragem empregando conversores A/D em paralelo, fazendo uso de técnicas aprendidas em diferentes disciplinas do curso de Engenharia Eletrônica, como processamento digital de sinais, eletrônica, amplificadores, entre outras. É também possível aplicar este projeto, quando implementado em hardware, em laboratório para análise de sinais de alta frequência em disciplinas como telecomunicações e propagação de ondas. Por fim, este projeto proposto tem a finalidade de ressaltar a importância na formação de engenheiros eletrônicos para o desenvolvimento de projetos e soluções multidisciplinares em ambientes de simulação e prática nas instituições de ensino superior.

**Palavras-chave:** Multidisciplinaridade. Processamento de sinais. Telecomunicações. Desenvolvimento de projetos.

## 1 INTRODUÇÃO

Das características presentes em tecnologias vinculadas às ações da globalização 4.0, podem-se destacar: o trato de grandes volumes de dados, a coleta constante de informações e, principalmente, os sistemas de comunicação que possibilitam a integração de todas as tecnologias (JAZDI, 2014). Assim, o cenário mundial tecnológico, principalmente industrial, tem apresentado uma crescente demanda por inovações e adaptações de sistemas que realizam a coleta e processamento de dados em quantidade cada vez mais elevadas e de forma autônoma e barata, bem como a transmissão segura dos mesmos através de diversos meios de comunicação (OLIVEIRA, 2017). Percebe-se então o potencial de integração entre as áreas do conhecimento e a necessidade de abordagens sistemáticas.

A presente proposta é direcionada para o desenvolvimento e implementação de técnicas já existentes, uma vez que a finalidade é levar o aluno a ter contato com o conteúdo de várias disciplinas ao mesmo tempo na resolução de um problema. Com isso, espera-se estimular a capacidade de abstração do problema e consolidar o conhecimento, dando passagem para soluções alternativas, mesmo que parcial ou completamente implementadas.

Para exemplificar o desenvolvimento e o potencial impacto da proposta, é exposto neste trabalho um projeto de um sistema analisador de espectro digital de sinais analógicos com ênfase no processo de subamostragem e na reconstrução digital que pode integrar um sistema completo de análise espectral de ondas eletromagnéticas. Para tal aplicação, o conversor analógico-digital deve possuir uma alta frequência de amostragem, acarretando um custo elevado. Logo, a principal ênfase deste sistema é utilizar  $n$  conversores A/D, de baixo custo e baixa taxa de amostragem, em paralelo para ser possível fazer uma amostragem de sinais com uma taxa  $n$  vezes maior que a taxa de cada conversor operando individualmente. Para fazer isso, associado a cada um dos  $n$  conversores A/D há um filtro passa-faixa em uma banda acima de sua frequência de Nyquist. Logo, o sinal será subamostrado. Porém, este sinal será posteriormente deslocado digitalmente para alta frequência novamente, recuperando o sinal original na forma digital.

Para implementar este sistema, é necessário empregar várias técnicas de processamento de sinal tanto analógico quanto digital. Dentre elas destacam-se: condicionamento do sinal analógico de entrada e separação em  $n$  canais por meio de um banco de filtros analógicos; técnicas de conversão A/D, quantização e subamostragem; filtragem digital de equalização espectral; sobreamostragem digital; e filtragem digital para reorganização espectral e reconstrução do sinal de entrada a partir da concatenação dos sinais em cada canal. Inicialmente, todos os métodos, inclusive a filtragem analógica, foram simulados em MATLAB.

A motivação para a implementação deste projeto vem da possibilidade de se desenvolver um equipamento em tempo real, a partir de tecnologias e infraestruturas já existentes nas universidades brasileiras e pelos próprios alunos, para visualização da incidência espectral eletromagnética em um determinado ambiente. Este equipamento pode ser aplicado em disciplinas como comunicações sem fio, compatibilidade eletromagnética, propagação de ondas e transmissão de dados, entre outras, onde a visualização aproximada do comportamento real das ondas no ambiente desempenharia um papel diferencial e inovador no processo de aprendizado.

Dessa forma, observa-se num único projeto a multidisciplinaridade e interdisciplinaridade entre eletrônica básica, instrumentação eletrônica, circuitos digitais, amplificadores, sinais e sistemas, processamento digital de sinais, filtragem adaptativa, microcontroladores, transmissão de dados e comunicações sem fio, aplicando e complementando o aprendizado realizado em sala de aula. Estas disciplinas fazem parte dos 4º, 5º, 6º e 7º períodos do curso de

bacharelado em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procopio.

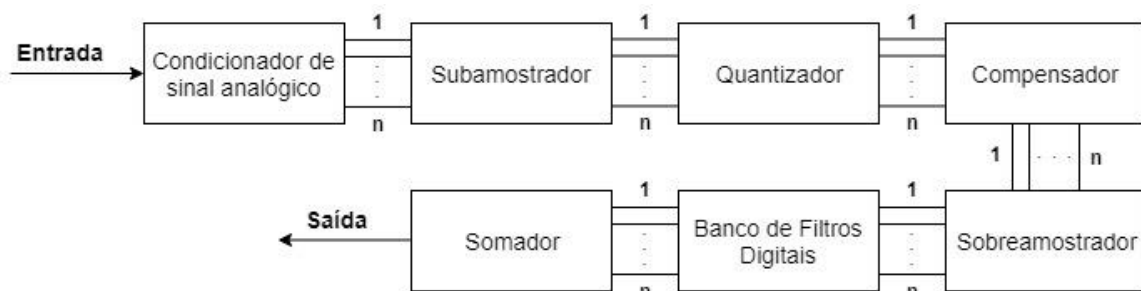
Além disso, são discutidos alguns tópicos para implementação em *hardware* do sistema e para operação em tempo real, assim como alguns sistemas alternativos e propostas para trabalhos futuros.

O projeto se baseia principalmente nos trabalhos de Labaziewicz e Baker (2011), Velazquez, Nguyen e Broadstone (1998) e Magalhães (2013). Primeiramente é apresentada uma visão geral da operação do conjunto de sistemas com uma breve discussão de características básicas e de pontos fundamentais levantados na etapa de descrição do projeto. Em seguida, parte-se para o desenvolvimento, onde são discutidas as funcionalidades de cada bloco e as relações entre eles, exibindo particularidades e parâmetros de projeto. Na sequência, apresenta-se o resultado de cada sistema, assim como uma breve discussão dos mesmos. Por fim, são apresentadas as considerações finais, contendo as conclusões do projeto e uma recapitulação da proposta de trabalho.

## 2 MODELO DO SISTEMA

O conjunto de sistemas proposto, apresentado na Figura 1, é composto basicamente por sete etapas, onde cada uma é representada por um bloco do diagrama. O sinal de entrada é considerado analógico e supõe-se que já tenha sido feito um pré-condicionamento do mesmo, uma vez que essa entrada pode ser derivada, por exemplo, de um sistema de instrumentação ou, mais especificamente neste caso, uma antena. A suposição do pré-condicionamento pode se caracterizar pela atuação de um receptor para normalização da potência do sinal adquirido e por um filtro passa-baixas limitador de banda. O sinal de saída do sistema é considerado digital, com largura de banda igual ao do sinal de entrada analógico e quantizado em  $k$  bits. Os parâmetros utilizados nas simulações e os resultados para cada bloco são apresentados na seção de desenvolvimento e resultados.

Figura 1 - Diagrama de blocos funcional do conjunto de sistemas proposto



Fonte: autoria própria.

Referente à Figura 1, da esquerda para direita a partir da entrada, o primeiro bloco representa o circuito condicionador do sinal analógico de entrada em preparação à conversão A/D. Aqui se dá a divisão do sinal de entrada em  $n$  sinais para os respectivos  $n$  canais de saída, onde em cada um deles contém um sinal analógico com banda espectral exclusiva e referente a uma fatia do espectro de entrada, ou seja, a funcionalidade do primeiro sistema é a filtragem passa-faixa por meio de  $n$  filtros analógicos que dividem o espectro do sinal de entrada igualmente em  $n$  bandas exclusivas. Associados à análise e implementação do primeiro bloco, são necessários os conteúdos abordados nas disciplinas de eletrônica básica, amplificadores e sinais e sistemas. Assim,

$$BW_{bank_1} = \frac{BW_{in}}{n} \quad (1)$$

onde,  $BW_{in}$  é a largura de banda do sinal de entrada,  $BW_{bank_1}$  é a largura de banda da saída de cada filtro do banco de filtros analógico, onde considera-se o limite de atenuação necessário para garantia da exclusividade de banda e  $n$  é o número de filtros.

O segundo bloco representa o sistema *subamostrador*. Uma vez que se tem  $n$  sinais representando, cada um, uma fatia  $n$ -ésima diferente e exclusiva da banda espectral do sinal de entrada, adquire-se a possibilidade de reduzir a frequência de amostragem pelo mesmo fator  $n$ . O resultado disso é a representação da mesma faixa de frequência com energia útil de cada sinal em uma região de frequências entre 0 Hz e a metade da nova frequência de amostragem (PROAKIS, 2007). A importância da aplicação deste método é a possibilidade de manipular as informações contidas nos sinais de alta frequência a partir de uma complexidade computacional reduzida, uma vez que se tem a redução do número de amostras. Além disso evitam-se impactos negativos referentes a *aliasing* pela garantia de exclusividade de banda. Nota-se que é necessária uma análise da eficiência do banco de filtros em atenuar satisfatoriamente as amplitudes das frequências laterais posteriores às frequências de corte dos filtros passa-faixa até os limites de exclusividade de banda (OPPENHEIM e SCHAFER, 2013). Assim, da Equação (1), tem-se

$$fs_{new} = \frac{fs}{n} \quad (2)$$

onde,  $fs$  é o dobro máxima frequência contida no sinal analógico entrada e  $fs_{new}$  é o dobro da largura de banda da saída de cada filtro ( $BW_{bank_1}$ ).

Entretanto, devido ao efeito de espelhamento espectral gerado pela subamostragem, em algumas saídas dos filtros os espectros dos sinais se invertem com relação aos originais (PROAKIS, 2007), sendo necessária atenção quanto as suas interpretações e posterior manipulação (quinto bloco). As disciplinas cujos conteúdos estão relacionados aos processos de análise e implementação desta etapa do projeto são: sinais e sistemas, processamento digital de sinais e transmissão de dados.

O terceiro bloco representa o sistema *quantizador* que efetivamente converte os  $n$  sinais analógicos subamostrados a uma mesma taxa em códigos binários de  $k$ -bits cada, promovendo então no máximo  $2^k$  níveis de amplitude de conversão A/D (HAYKIN e MOHER, 2011). Nota-se que quanto maior o número de bits associados à quantização, melhor será a representação do sinal analógico. Isto é conquistado de maneira mais fácil na implementação prática com a redução da taxa de amostragem. Ou seja, existe uma relação direta, dentro de uma mesma arquitetura, de possível aumento de níveis de quantização ao realizar a subamostragem, que por sua vez reduz a velocidade de conversão necessária (BLUMER, 2012). Assim, a análise e a implementação dessa etapa do projeto, estão relacionadas aos conteúdos das disciplinas: circuitos digitais, instrumentação eletrônica e transmissão de dados.

O quarto bloco representa o sistema digital para *compensação* das atenuações laterais entre as frequências de corte dos filtros analógicos (agora trasladadas devido a representação subamostrada dos espectros) e a largura de banda de separação entre canais consecutivos. Ou seja, esta etapa de processamento está diretamente relacionada com a etapa de filtragem analógica. Vinculados aos conceitos abordados para análise e implementação dessa etapa do projeto estão as disciplinas de: sinais e sistemas, processamento digital de sinais, transmissão de dados e filtragem adaptativa.

Entretanto, devido a proposta inicial do projeto se dar somente para simulações computacionais, a compensação pode ser realizada no domínio da frequência utilizando o inverso da resposta em magnitude e fase dos sinais resultados das respostas ao impulso subamostradas de cada filtro do banco de filtros analógicos. Observa-se que a obtenção do modelo de banco de filtros digitais compensadores de espectro é necessária apenas uma vez já que os sistemas são invariantes no tempo.

O quinto bloco representa o sistema com  $n$  *sobreamostradores* digitais, cada um conectado a apenas um canal e com função de elevar a frequência de amostragem associada (e igual para todos os canais) em  $n$  vezes com a adição de  $n - 1$  zeros entre amostras consecutivas. Na frequência, o efeito é o surgimento de repetições do espectro nos múltiplos da frequência de subamostragem (PROAKIS, 2007). Desta forma, relaciona-se esta etapa diretamente com a etapa de subamostragem, onde agora é possível observar o retorno das bandas espectrais às frequências de origem por meio do efeito de repetição. É notável que é necessária uma filtragem para eliminar as repetições em frequências indesejada, o que relaciona esta etapa diretamente com a próxima. Assim,

$$f_{S_{\text{sobreamostr}}} = f_{S_{\text{new}}} \times n \quad (3)$$

onde,  $f_{S_{\text{sobreamostr}}}$  é o dobro da frequência máxima do sinal de cada canal após a sobreamostragem. Portanto, pelas Equações (1), (2) e (3), nota-se a equivalência das larguras de bandas dos sinais de entrada e saída. Nesta etapa, são abordados conceitos presentes nas disciplinas de: sinais e sistemas, processamento digital de sinais e transmissão de dados.

O sexto bloco representa a etapa de filtragem de cada um dos  $n$  sinais por meio de um *banco de filtros* passa-faixa digitais com ordem alta para aquisição de bordas de transição abruptas e frequências centrais respectivas às frequências centrais dos espectros originais de cada canal, ou seja, faz-se uma seleção da repetição espectral que corresponde ao espectro original do sinal. Com isto, estimam-se os sinais digitais compensados (salvo às perdas devido as aproximações do presente banco de filtros e erros do processo de quantização) separados em  $n$  bandas que compõem o sinal analógico original. Para análise e implementação desta etapa do projeto, são necessários conceitos abordados na disciplina de processamento digital de sinais.

A implementação dessa etapa pode ser feita da mesma forma que a etapa de compensação (idealmente), fazendo-se o tratamento dos dados no domínio da frequência com uma resposta em frequência ideal para os filtros, quando apenas em ambiente simulado.

O sétimo bloco representa um circuito *somador* digital, onde os  $n$  canais são combinados para assim compor o sinal digital de saída que estima a entrada analógica do conjunto de sistemas. Vale ressaltar que esta etapa é realizada na simulação apenas para comparação com o sinal de entrada e assim validar a reconstrução do sinal, mas pode-se desenvolver outras etapas de processamento desejadas com os sinais separados nos  $n$  canais, reduzindo a complexidade computacional. Para análise e implementação desta etapa do projeto, são abordados conceitos presentes nas disciplinas de: circuitos digitais, processamento de digital de sinais e transmissão de dados.

### 3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

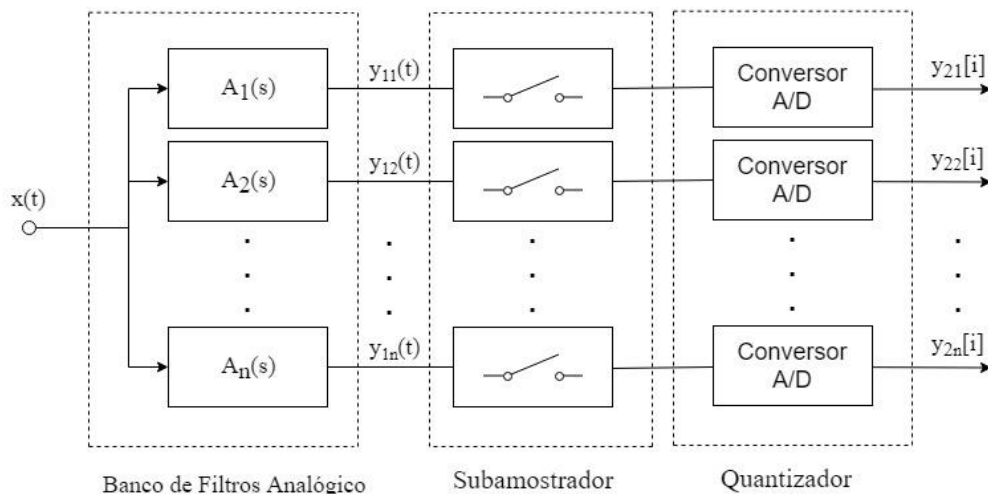
O processo de desenvolvimento do projeto foi realizado observando as predefinições das funcionalidades de cada etapa do conjunto de sistemas, os comportamentos esperados e as limitações e características dos sinais de entrada e saída citadas na seção anterior. Além disso dá-se eventualmente a comparação de topologias, métodos e técnicas encontradas na etapa de revisão bibliográfica do projeto para implementação das simulações em ambiente

computacional e projeção às estruturas das aplicações práticas. Vale ressaltar que se levam em consideração limitações de *hardware* e *software*, executando-se então em alguns casos, o projeto sobre modelos reduzidos com o intuito de representatividade dos comportamentos esperados.

### 3.1 Banco de filtros analógicos

Nesta subseção, é discutido o processo de construção do banco de filtros analógicos, apresentado na Figura 2, trazendo a comparação funcional e eficaz de algumas topologias encontradas na literatura e levando-se em consideração o potencial impacto das mesmas nos resultados do projeto.

Figura 2 - Esquemático do banco de filtros analógicos.



Fonte: autoria própria.

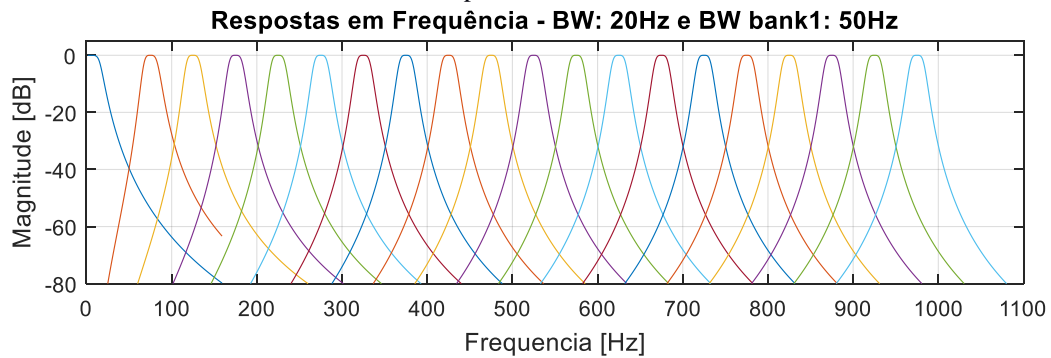
A função de transferência de um filtro passa-faixa analógico pode ser obtida pela operação de cascadeamento de um filtro passa-baixas com um filtro passa-altas, sendo a ordem resultante a soma das ordens dos filtros que o compõe. A fim de adquirir um fator de qualidade variável e eliminar a necessidade do uso do indutor na implementação prática, opta-se pela utilização de filtros ativos a partir de amplificadores operacionais (TEXAS INSTRUMENTS). Alternativamente a topologia em cascata apresentada, encontra-se a topologia de múltiplas realimentações, cujos parâmetros são calculados por sintonização escalonada (TEXAS INSTRUMENTS), a qual foi escolhida por apresentar a característica de planicidade máxima em torno da frequência central e banda de transição mais abrupta quando comparada à topologia de cascata. Essas características são altamente relevantes à presente aplicação uma vez que se deseja obter a exclusividade espectral entre as saídas dos filtros.

Da implementação em ambiente simulado do banco de filtros analógico, estabeleceu-se  $BW_{in}$  igual a 1 kHz e 20 canais de saída com 50 Hz de banda cada. Dessa forma, as funções de transferência de cada filtro foram construídas levando em consideração o cascadeamento entre dois filtros passa-faixa de quarta ordem com sintonia escalonada que por sua vez é constituído por dois filtros passa-faixa de segunda ordem com frequências centrais deslocadas simetricamente por um fator  $\alpha$ , ou seja, o filtro resultante apresenta oitava ordem.

A partir das funções de transferência dos filtros projetados, determinou-se a sua largura de banda (diferença entre as frequências de corte) necessária dos filtros para que nas frequências limites para exclusividade de banda de saída determinada ( $BW_{bank_1}$ ) possuir-se-ia atenuação de 35 dB. Em seguida, realizou-se a filtragem no sinal de entrada, onde o definiu como um impulso

no tempo, obtendo-se como resposta o conjunto de 20 sinais organizados matricialmente em  $y_1(t)$ . A Figura 3 apresenta as respostas em magnitude dos filtros analógicos projetados.

Figura 3 - Respostas em frequência do banco de filtros analógico; segue a ordem dos filtros sendo da esquerda para a direita



### 3.2 Subamostrador e quantizador

Na sequência, a implementação simulada dos circuitos de subamostragem e conversão A/D se deu pela utilização da função de decimação a uma constante  $D$  de valor igual ao número de filtros em cada canal. Ou seja, o processo é similar a reamostragem dos sinais analógicos de saída dos filtros a uma taxa vinte vezes menor (PROAKIS, 2007). Desconsiderando erros de quantização (conversor A/D ideal), o efeito de espelhamento dos espectros dos sinais produz a translação dos mesmos para a denominada “banda base” com largura de banda de 50 Hz ( $\frac{f_{S_{new}}}{2}$ ). Com isso, avalia-se o efeito de sobreposição (*aliasing*) das amplitudes externas aos limites da largura de banda exclusiva de cada sinal.

### 3.3 Compensador (Equalizador)

Nesta subseção, apresenta-se uma discussão sobre os possíveis modelos para implementação do sistema equalizador de espectros para equalizar os sinais da etapa anterior, bem como uma breve avaliação acerca da abordagem no domínio da frequência.

Segundo Widrow e Walach, (2008) sistemas de fase não-mínima são definidos como aqueles que possuem zeros de transferência externos ao círculo unitário e com isso, mesmo podendo ser causais e estáveis, o sistema equivalente inverso não o é, uma vez que os zeros se tornam polos externos ao círculo unitário. Para contornar esta questão, os autores, apresentam uma estrutura em cascata de um filtro “branqueador” e um filtro causal otimizado que resultam em uma planta causal inversa ao sistema desejado. Pode-se fazer uso do algoritmo LMS (*Least Mean Squares*) (WIDROW e WALACH, 2008) onde, a partir da resposta ao ruído branco do sistema subamostrado já conhecida e o erro entre esta ao passar pelo sistema desejado e um atraso empírico, estima-se os coeficientes do filtro causal que mais se aproxima ao equalizador ideal.

Alternativamente a esta proposta, pode-se supor em um primeiro momento a aplicação do conjunto de sistemas apenas em ambiente controlado de simulação, onde faz-se a equalização dos espectros a partir da multiplicação ponto a ponto do inverso complexo entre as respostas em frequências dos filtros analógicos subamostrados (obtidas a partir da resposta ao impulso) e os espectros dos sinais subamostrados. Dessa forma, cria-se um modelo do sistema inverso

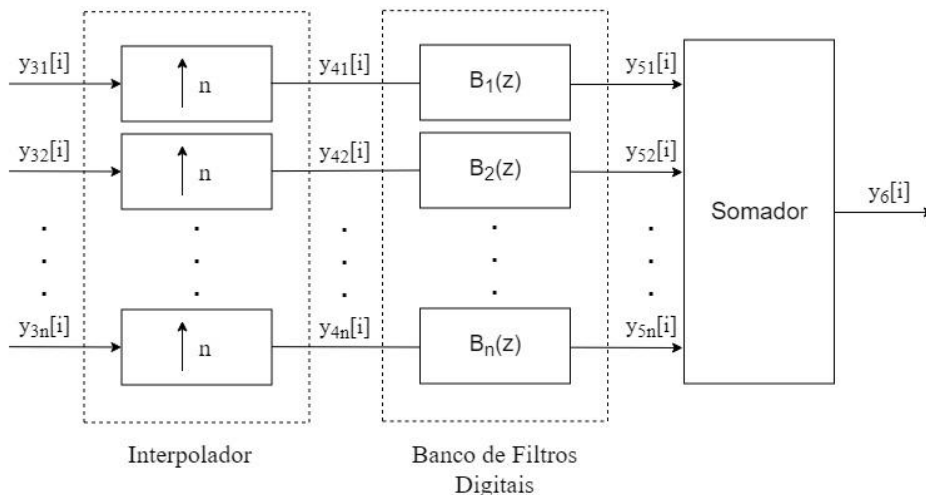
no domínio da frequência e realiza-se a equalização dos espectros a partir das transformadas de qualquer sinal de entrada.

### 3.4 Sobreamostrador, banco de filtros digitais e somador

Nesta subseção apresenta-se os parâmetros de projeto para recuperação efetiva da banda espectral do sinal de entrada em um único sinal, ou seja, os processos realizados a partir da etapa de equalização não se fariam necessários na aplicação do analisador de espectro completo uma vez que pode ser mais interessante trabalhar com os sinais paralelamente e com as bandas separadas pela redução da complexidade computacional.

Portanto, a estrutura esquemática dos sistemas abordados nesta subseção é apresentada pela Figura 4, onde os sinais  $y_{3k}[i]$  representam às saídas do equalizador, com  $1 < k < n$ ,  $y_{4k}[i]$  representam os sinais sobreamostrados pela inserção de  $n - 1 = 19$  zeros entre amostras consecutivas,  $y_{5k}[i]$  representam os sinais cujas bandas espectrais foram recuperadas nas frequências centrais de origem e o sinal  $y_6[i]$  representa a aproximação final do sinal  $x(t)$ .

Figura 4 - Estrutura esquemática dos sistemas envolvidos na etapa de concatenação dos 20 canais.



Fonte: autoria própria.

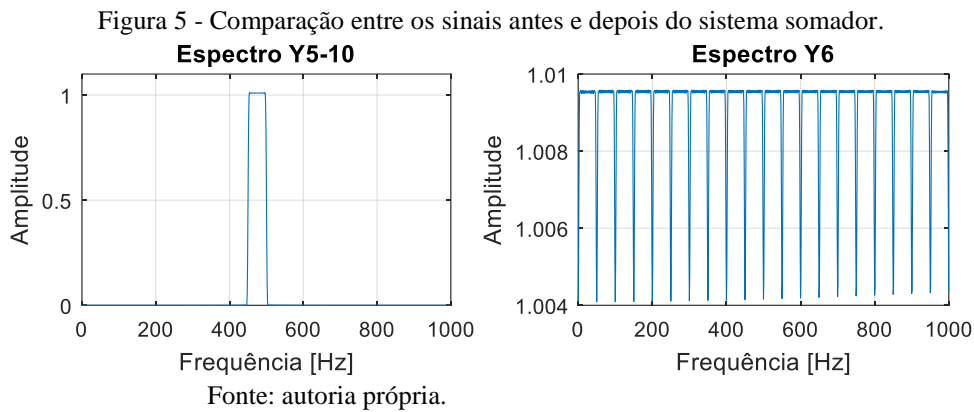
Segundo Proakis 2007, o sistema sobreamostrador realiza então o acréscimo de 19 zeros entre amostras consecutivas. O efeito na frequência é a repetição do espectro da banda base centrada nos múltiplos pares da frequência de 50 Hz acrescentados de 25 Hz (125 Hz, 225 Hz, ...) e a repetição do espectro da banda base invertida centrada nos múltiplos ímpares de 50 Hz acrescentados de 25 Hz (75 Hz, 175 Hz, ...). Dessa maneira, tem-se a desinversão do espectro dos sinais que sofreram a inversão no processo de subamostragem (aqueles com frequência central original nos múltiplos ímpares de 50 Hz acrescentados de 25 Hz).

Uma vez recuperada a frequência de amostragem relativa a duas vezes a largura de banda do sinal de entrada, passa-se a etapa de seleção da banda original respectiva para cada sinal. Esta é realizada observando-se o índice relativo ao canal de cada um dos sinais  $y_{4k}[i]$ . De acordo com este parâmetro, define-se a frequência central de cada filtro  $B(z)$  como sendo 25 Hz acrescentados à 50 Hz vezes o índice numérico do canal. Para simplificar o projeto, este banco de filtros digitais é projetado com ordem muito alta e topologia FIR com fase linear por janelamento Hamming.

Entretanto, outra alternativa possível para deslocar os sinais de volta para a banda original, seria a operação de modulação de cada canal (HAYKIN e MOHER, 2011).



Os resultados das últimas etapas do projeto são apresentados na Figura 6, onde o espectro  $Y_{5-10}$  representa a atuação do filtro FIR do canal 10 selecionando a repetição espectral na faixa do sinal original,  $y_{1-10}(t)$ . Além disso, fica claro, pelo espectro  $Y_6$ , a recuperação espectral do impulso de entrada  $x(t)$  após a concatenação de todos os sinais.



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um projeto multidisciplinar para implementar um analisador de espectro de alta taxa de amostragem empregando conversores A/D em paralelo. Resultados obtidos na seção de desenvolvimento e as discussões executadas na mesma e na anterior, evidenciaram as inter-relações entre as diversas etapas do projeto, seja no sentido de interações entre as áreas do conhecimento, seja nas possíveis alternativas que surgem durante a revisão literária e implementação dos sistemas. Portanto, o uso desta abordagem multidisciplinar estimula o caráter inovador e integrador dos alunos envolvidos e promove a contextualização gradual dos mesmos durante sua formação às tendências tecnológicas mais urgentes do cenário global atual.

Este projeto é apresentado em ambiente de simulação computacional com MATLAB. Porém, conversores de baixo custo disponíveis em laboratórios de instrumentação podem ser empregados para implementação prática após simulação.

#### REFERÊNCIAS

BLUMER, Rafael Tambara. **Modulador si- $\sigma\delta$  cascata 2-2 empregando arquitetura de baixa distorção aplicado à conversão AD**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

HAYKIN, Simon S.; MOHER, Michael. **Sistemas de comunicação**. 5ª edição, Porto Alegre, Livroman, 2011.

JAZDI, Nasser. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In: 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2014, Romania. **IEEE**.

LABAZIEWICZ, Andrew; BAKER, R. Jacob. A 2 GHz effective sampling frequency K-Delta-1-Sigma analog-to-digital converter. In: 2011 IEEE 54th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2011, Seoul, **IEEE**.

MAGALHÃES, José P. Under-sampled measurement technique for Hybrid-Filter-Bank characterization in real-time applications. In: 81st ARFTG Microwave Measurement Conference, 2013, Seattle, **IEEE**.

OLIVEIRA, Luiz Eduardo Santos de. **Concepção de um framework para monitoramento e teleoperação de máquinas-ferramenta CNC via internet aderente à Indústria 4.0**. 2017. 205 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W.. **Processamento em tempo discreto de sinais**. 3ª edição, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

PROAKIS, John G.; MANOLAKIS, Dimitris G.. **Digital Signal Processing: principles, algorithms and Applications**. 4ª edição, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007.

TEXAS INSTRUMENTS. **Active Filter Design Techniques, Literature Number SLOA088**. Retirado de: **OP-Amps for Everyone, Literature Number SLOD006A**. Disponível em: <https://www2.seas.gwu.edu/~ece121/Spring-11/filterdesign.pdf>. Acesso em: 06 maio 2019.

VELAZQUEZ, Scott R.; NGUYEN, Truong Q.; BROADSTONE, Steven R.. Design of hybrid filter banks for analog/digital conversion. **IEEE Transactions on Signal Processing**, IEEE, v. 46, n. 4, p. 956-967, 1998.

WIDROW, Bernard; WALACH, Eugene. **Adaptive Inverse Control, Reissue Edition: A Signal Processing Approach**. Wiley-IEEE Press, 2008.

## **A MULTIDISCIPLINARY PROJECT OF A SPECTRUM ANALYZER WITH FILTER BANKS AND UNDERSAMPLING**

**Abstract:** *As a fundamental characteristic of 4.0 innovations, the communication element between devices, in the form of transmission and signal processing, is addressed in the present work in a structured way in order to encourage and stimulate the integration of Electronic Engineering knowledge areas. With the advent of the Internet of Things, the demand for data transmitters that operates in higher frequency band has increased, requiring increasingly higher sampling rates analog-to-digital(A/D) converters. In this work, a multidisciplinary project is proposed to implement a high sampling rate spectrum analyzer, employing  $n$  parallel A/D converters with  $n$  times lower sampling rate, making use of techniques learned in different Electronic Engineering courses, such as digital signal processing, electronics, amplifiers, among others. It is also possible to employ this project, when implemented in hardware, in the analysis of high frequency signals in laboratory courses, such as telecommunications and wave propagation. Finally, this proposed project has the purpose of highlighting the importance in the training of electronic engineers for the development of projects and multidisciplinary solutions in simulation and practice environments in higher education institutions.*

**Key-words:** *Multidisciplinary. Signal processing. Telecommunications. Project development.*