PROPOSTA DE PESQUISA - MESTRADO

TÍTULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PPGEE – UFMG

**Nome do proponente:** Gustavo Maia Ferreira

**Nome do orientador:** Hilton de Oliveira Mota

**Área de concentração:** Sistemas de Computação e Telecomunicações

**Linha de pesquisa:** Microeletrônica e Microssistemas

**Objetivos:**

* Estudar técnicas de processamento de sinais baseadas em ferramentas de análise tempo-frequência.
* Investigar procedimentos para paralelização de algoritmos de processamento de sinais utilizando FPGAs, com vistas à execução em tempo real.
* Estudar, flexibilizar e aumentar o escopo de projeto de um processador de wavelets desenvolvido em trabalhos anteriores, almejando possíveis melhorias.
* Investigar métodos de avaliação de desempenho que permitam esclarecer os resultados decorrentes de tomadas de decisão sobre o desenvolvimento em FPGAs.
* Investigar e implementar técnicas mais elaboradas para processamento em tempo-frequência utilizando FPGAs, além daquelas já empregadas.
* Investigar e implementar ferramentas baseadas em classificação de padrões para tomada de decisões em algoritmos de processamento de sinais em FPGAs.

**Justificativas:**

A análise de sinais no domínio da frequência é uma ferramenta utilizada para interpretação de um sinal sob a visão de seu conteúdo espectral. Esta técnica é aplicada em áreas como filtragem de ruído, processamento de imagens e telecomunicações (OPPENHEIM, 2010). Uma vantagem proporcionada pela técnica é a representação de uma informação periódica no domínio do tempo em poucos coeficientes no domínio da frequência. Entretanto, características não periódicas de um sinal, como por exemplo, sinais de ocorrência estocástica ou com descontinuidades e singularidades, apresentam uma localização temporal que não é explicitada pela análise na frequência. As ferramentas de análise no domínio misto tempo-frequência permitem o tratamento desse tipo de informação. Uma ferramenta de destaque nas últimas décadas é a Transformada Wavelet.

A Transformada Wavelet Contínua (CWT, *Continuous Wavelet Transform*) baseia-se na convolução de um sinal com uma forma de onda localizada no tempo (uma wavelet-mãe) para diferentes valores de dilatação e translação. O resultado da aplicação da transformada é um escalograma que associa essas informações da wavelet-mãe, que podem ser comparadas com uma escala no tempo e na frequência, com sua respectiva correlação com o sinal (ADDISON, 2002).

A discretização é necessária para a implementação prática da transformada wavelet. Foi provado matematicamente que a utilização de wavelets ortonormais sobre uma base diádica (ou seja, cujos passos de dilatação e translação seguem um logaritmo de base 2) resulta em coeficientes da transformada wavelet sem redundância de informação e completamente invertível (MALLAT, 1989). Esse caso especial de discretização da transformada wavelet é conhecido simplesmente como a Transformada Wavelet Discreta (DWT, *Discrete Wavelet Transform*). Wavelets que atendem a essas condições foram estudadas e propostas para atender alguma característica específica. Destacam-se as famílias de wavelets de Daubechies (DAUBECHIES, 1992), Symlets e Coiflets.

Uma das principais vantagens da DWT é sua implementação através do algoritmo piramidal proposto por Stéphane Mallat (MALLAT, 1989). Este algoritmo permite a construção da análise multi-resolução com uma complexidade , o que reduz o tempo de processamento da transformada quando comparada com a Transformada Rápida de Fourier (FFT), cuja complexidade é tipicamente . Além disso, o algoritmo piramidal permite a interpretação da DWT como a aplicação de um banco de filtros sobre um sinal. A cada novo nível o sinal é submetido a um filtro passa-alta, gerando os coeficientes dos detalhes, e a um filtro passa-baixa, gerando os coeficientes das aproximações. As aproximações são dizimadas por um fator de 2 e usadas no próximo nível da decomposição até que reste apenas um ponto do sinal. O último nível de decomposição gera um único coeficiente de aproximação que é a média do sinal.

Técnicas baseadas em modificações da DWT surgiram como forma de atender a requisitos específicos de cada aplicação. Destaca-se a transformada wavelet não dizimada (UWT, *Undecimated Wavelet Transform*), que remove o passo da dizimação por 2 entre cada nível da DWT (COIFMAN, 1995). A DWT original não é invariante no tempo, o que é uma propriedade importante para aplicações como de reconhecimento de padrões que comparam a representação multi-resolução de dois sinais (LIANG, 1996). A remoção do passo de dizimação garante a propriedade de invariância no tempo da transformada wavelet em troca de redundância dos coeficientes e aumento da complexidade para . Outras técnicas avançadas baseadas na DWT incluem a Wavelet Packet e a Wavelet Biortogonal.

Mesmo apresentando uma complexidade inferior à FFT, aplicações de tempo real de alto desempenho em sistemas embarcados podem requerer deadlines que não são facilmente atendidos por uma solução em software.

Aplicações em hardware possibilitam melhor desempenho quando comparadas com sua versão em software uma vez que utilizam recursos não compartilhados e com um grau de abstração muito menor. Além disso, aplicações em hardware lançam mão de uma paralelização intrínseca da plataforma. Uma das possíveis formas de implementar um algoritmo em hardware é utilizando FPGAs (*field-programmable gate array*, ou arranjos de portas programáveis em campo). Estes são circuitos integrados programáveis em nível lógico por linguagens de descrição de hardware (HDL). FPGAs possibilitam um tempo de desenvolvimento menor quando comparado com hardware de aplicação específica em troca de menor otimização de recursos, o que é refletido em maior potência consumida e menor desempenho.

Além disso, FPGAs são sistemas apropriados para aplicações de processamento de sinais por incluírem funções DSP como *Multiply & Accumulate* (MAC) (JING, 2007). Portanto, FPGAs são uma boa alternativa como ferramenta de hardware para implementação de um algoritmo de análise multi-resolução.

Um processador de wavelets do tipo Daubechies-6 foi desenvolvido em FPGA em trabalhos anteriores no Laboratório de Metrologia e Computação Industrial (MACHADO, 2016). O sistema implementado realiza a transformada wavelet de um sinal de entrada e aplica técnicas de filtragem de ruído baseadas nos coeficientes da transformada. O sinal é reconstruído utilizando a transformada inversa. O objetivo deste projeto de mestrado é expandir este processador de forma a torna-lo parametrizável para diferentes famílias de wavelets. Futuramente, também se deseja modificar este processador para suportar algoritmos baseados na DWT, como a UWT. Esta expansão pode tornar o processador mais robusto para atender a um maior número de aplicações além de permitir avaliar o desempenho de diferentes famílias wavelets em hardware com um tempo mínimo de reconfiguração.

**Revisão da literatura:**

Um dos maiores avanços no estudo de wavelets se deu com a invenção da análise multi-resolução a partir de bases ortogonais por (MALLAT, 1989). Como mencionado anteriormente, esta análise é implementada utilizando um banco de filtros. Isto tornou a implementação de transformadas wavelet discretas computacionalmente mais eficiente. Além disso, o trabalho de Mallat permitiu que outros pesquisadores desenvolvessem suas próprias famílias de wavelets utilizando a mesma base matemática. Utilizando deste ferramental, a família de wavelets Daubechies foi apresentada em (DAUBECHIES, 1992). Estas wavelets estão entre as mais utilizadas na literatura por terem sido projetadas para atender duas condições desejáveis: suporte compacto, ou seja, um número limitado de coeficientes, e "vanishing moments", o que faz com que sejam boas em representar comportamento polinomial de um sinal (ADDISON, 2002).

A implementação de transformadas wavelet em hardware também se popularizou com a análise multi-resolução. Diversas arquiteturas que visam otimizar área ou desempenho foram propostas (CHAKRABARTI, 1996). A implementação em FPGA beneficiou-se do aumento dos recursos disponíveis no *chip*, incluindo blocos de processamento de sinais. Um dos primeiros trabalhos com essa abordagem utilizou duas placas FPGA para implementar as transformadas Daubechies 2 e 3 para a detecção de falhas em sistemas elétricos de potência (HUANG, 2002). Uma FPGA também foi usada na implementação de um algoritmo de detecção de barra quebrada de rotor através da transformada wavelet discreta (ORDAZ-MORENO, 2008). FPGA foi usada por permitir o processamento em tempo real em ambiente industrial. Outra aplicação comum da transformada wavelet que já foi implementada com sucesso em FPGA é na área de processamento de sinais biomédicos. Remoção de ruído de sinal de eletrocardiograma utilizando a DWT (BAHOURA, 2010) e a UWT (XIE, 2014) são alguns exemplos.

Um dos métodos mais empregados para remoção de ruído utilizando a análise multi-resolução ocorre através das técnicas de *hard-* e ­*soft-threshdoling* (ADDISON, 2002). Ambas as técnicas baseiam-se na remoção daqueles coeficientes de baixa amplitude, cujo limiar pode ser determinado a partir de características do sinal. Isto causa um alisamento da forma de onda no tempo que é eficaz na remoção de ruído gaussiano branco. A diferença das duas técnicas é que *soft-threshdolding* também aplica uma atenuação a coeficientes acima do limiar, enquanto *hard-thresholding* não altera estes coeficientes. Outras técnicas buscam uma transição suave dos coeficientes de baixa amplitude. Em (ZHANG, 1998) buscou-se uma função de transferência contínua sobre estes coeficientes.

**Metodologia de trabalho:**

Apesar de possibilitar aplicações com alto grau de paralelismo, um mesmo projeto em hardware possui um grau de complexidade e tempo de desenvolvimento maior que sua versão em software. Portanto, todo bom projeto de hardware passa por uma fase de avaliação em software. Todos os algoritmos implementados nesta pesquisa de mestrado serão implementados no software Matlab para sua avaliação e otimização.

Este trabalho será realizado utilizando uma placa FPGA Kintex-7 KC705 Evaluation Kit da fabricante Xilinx. O FPGA é programado utilizando o software Vivado Design Suite, que é um ambiente integrado para desenvolvimento, simulação e programação dos FPGAs da fabricante através de linguagens de descrição de hardware (HDL). Uma placa de aquisição de dados de alto desempenho FMC 150 está acoplada à placa FPGA para a digitalização de dados.

O processador de wavelets já implementa a transformada wavelet discreta Daubechies-6. A parametrização do processador se dará através de diretivas das linguagens de descrição de hardware que permitem configuração em tempo de síntese. Espera-se abranger um grande número de famílias wavelets que apresentem estrutura semelhante entre si, mudando-se apenas o número de coeficientes e seus valores. Neste primeiro momento, o procedimento de filtragem do sinal não será alterado. São previstos dois tipos de testes: testes de caixa branca, realizados ao longo do desenvolvimento utilizando o próprio ambiente de simulação do Vivado, e testes de caixa preta para avaliar a integração dos blocos do sistema, utilizando sinais externos injetados na placa de digitalização e avaliando a saída do sistema. Esta parametrização deve levar em conta as otimizações e paralelização já existentes no projeto e, se possível, adicionar novas otimizações ao código.

A implementação de modificações da DWT ocorrerá depois de amplo estudo dos algoritmos alternativos e implementação em software. Dependendo do algoritmo, podem ser necessárias apenas modificações estruturais do sistema ou modificações em baixo nível, como na forma em que o cálculo da transformada é realizado. Por fim, a modificação do método de filtragem utilizando os coeficientes da transformada requer maior tempo de testes em software para avaliação de sua viabilidade em hardware.

**Referências bibliográficas:**

ADDISON, P. S. **The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Medicine and Finance.** IoP Publishing, 2002.

BAHOURA, M.; EZZAIDI, H. **FPGA-Implementation of Wavelet-based Denoising Technique to Remove Power-Line Interference from ECG Signal.** In: 10TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY AND APPLICATIONS IN BIOMEDICINE (ITAB), 10., 2010. Corfu, Greece. *Anais…*, 2010.

CHAKRABARTI, C.; VISHWANATH, M.; OWENS, R. M. **Architecture for Wavelets Transforms: A Survey.** Journal of VLSI Signal Processing, Vol 14, p. 171-192. July 1996.

COIFMAN, R. R.; DONOHO, D. L.; **Translation-invariant de-noising.** Lectures Notes in Statistics, Vol. 103. p. 125-150. 1995.

DAUBECHIES, I. **Ten Lectures of Wavelets.** Springer-Verlag, 1992.

HUANG, S.; YANG, T.; HUANG, J.; **FPGA Realization of Wavelet Transform for Detection of Electric Power System Disturbances.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, p. 388-394. April, 2002.

JING, C.; BIN H. Y.; **Efficient Wavelet Transform on FPGA Using Advanced Distributed Arithmetic.** In: THE EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS (ICEMI 2007), 8., 2007. Xian, China. *Anais*…, 2007.

LIANG, J.; PARKS, T. W. **A Translation-Invariant Wavelet Representation Algorithm with Applications.** IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 44, No. 2, p. 225-232. February 1996.

MACHADO, R. **Desenvolvimento de Sistema de Tempo Real Baseado em FPGAs para Processamento de Sinais de Descargas Parciais.** 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MALLAT, S. G. **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, No. 7. p. 674-693. July 1989.

OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas.** 2ª Edição. Pearson Education. 2010.

ORDAZ-MORENO, Alejandro, et al. **Automatic Online Diagnosis Algorithm for Broken-Bar Detection on Induction Motors Based on Discrete Wavelet Transform for FPGA Implementation.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 5, p. 2193-2202. May 2008.

ZHANG, X.; DESAI, M. D.; **Adaptative Denoising Based on SURE Risk.** IEEE Signal Processing Letters, Vol. 5, No. 10, p. 265-267. October 1998.

XIE, Jiabai, et al. **A Reconfigurable Wireless Health Monitoring System with Undecimated Wavelet Transform Implemented.** In: IEEE WORKSHOP ON ELECTRONICS, COMPUTER AND APPLICATIONS (IWECA), 2014, Ottawa, Canada, *Anais…,* 2014.

**Cronograma de atividades:**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1º ANO | | | | | | | | | | | | | |
|  | Meses | | | | | | | | | | | |  |
| No. etapa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Descrição |
| 1 | x | x | x | x |  |  |  |  |  |  |  |  | Dedicação às disciplinas do programa |
| 2 |  |  |  | x | x |  |  |  |  |  |  |  | Estudo sobre wavelets |
| 3 |  |  |  |  | x | x |  |  |  |  |  |  | Revisão bibliográfica e elaboração de projeto |
| 4 |  |  |  |  |  |  | x |  |  |  |  |  | Estudo sobre arquitetura de hardware para processamento de sinais |
| 5 |  |  |  |  |  |  |  | x | x | x | x |  | Parametrização do processador de wavelets |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | x | x | Estudo de viabilidade de implementação em FPGA de técnicas mais elaboradas baseadas em wavelets |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2º ANO | | | | | | | | | | | | | |
|  | Meses | | | | | | | | | | | |  |
| No. etapa | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Descrição |
| 6 | x | x | x | x |  |  |  |  |  |  |  |  | Implementação de técnicas mais elaboradas de wavelets em FPGA |
| 7 |  |  |  | x | x |  |  |  |  |  |  |  | Investigação de técnicas de classificação de padrões para tomada de decisões em algoritmos de processamento de sinais em FPGAs |
| 8 |  |  |  |  | x | x | x | x |  |  |  |  | Implementação dessas técnicas |
| 9 |  |  |  |  | x | x | x | x | x | x | x | x | Dissertação de Mestrado |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Recursos necessários e formas de obtenção:**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Item | Justificativa | Forma de obtenção |
|  |  |  |

**Assinatura do proponente:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Nome do proponente

**Assinatura do orientador:**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof.: nome do orientador