

# ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PROPOSTAS DE PLL COM DETECTORES DE FASE DE ALTA RESOLUÇÃO PARA APLICAÇÃO EM MICROSCÓPIO DE FORÇA ATÔMICA

Lucas Freitas Machado Muniz<sup>1</sup>; Valeria Loureiro Da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em engenharia elétrica; Iniciação Tecnológica – CNPq; Lucasmuniz52@gmail.com

<sup>2</sup> Graduação, mestrado e doutorado em física; Centro Universitário SENAI CIMATEC; Salvador-BA; valeria.dasilva@fieb.org.br

## RESUMO

A microscopia de força atômica é um ramo da ciência que busca gerar análises topográficas de uma superfície com resolução subnanométrica. Essa técnica é muito utilizada na análise de amostras de grafeno e trata-se de um ramo de pesquisa que vem crescendo muito. Nesse processo, uma nano-antena, ou sonda, é excitada a vibrar próximo ou na frequência de ressonância. Ao se aproximar a superfície e a sonda, tal interação entre os mesmos gera uma mudança na frequência de ressonância da sonda. A partir da análise da variação da frequência de ressonância durante a varredura da amostra é possível determinar a estrutura topográfica. Nesse artigo é apresentada a microscopia de força atômica e também foi feito um estudo de revisão das técnicas de implementação de um detector de fase. Além disso é feita a comparação das possíveis técnicas para detectar a variação da frequência de ressonância durante a varredura. Os resultados se mostram promissores, porém não existe definição do método final.

**PALAVRAS-CHAVE:** microscopia de força atômica; detecção de frequência; comparação de métodos.

## 1. INTRODUÇÃO

A microscopia de força atômica (AFM) é uma técnica de mapeamento topográfico com resolução atômica. Inicialmente proposta em 1985, tinha o objetivo de medir forças com magnitude de aproximadamente  $10^{-18}$ N, porém foi observado que poderia ser utilizado para investigar superfícies com uma escala atômica<sup>1</sup>. Tal processo é baseado na varredura de uma amostra utilizando uma sonda. Durante a operação, a sonda é excitada para vibrar com amplitude e frequência constantes. Em seguida a ponta da sonda é aproximada da amostra, a distância entre amostra e antena é tão pequena que surgem forças provenientes das interações dos átomos da amostra e da ponta. A primeira dessas forças a surgir são chamadas de forças de Van Der Waals e possuem características dispersivas. Caso a distância entre amostra e o átomo fique menor ainda, ocorre a sobreposição das camadas de valência dos átomos da ponta e amostra, as forças provenientes dessas interações podem ter características atrativas ou repulsivas<sup>2</sup>. A existência de tais forças faz com que a frequência de ressonância da ponta altere e, por consequência, a distância entre antena e amostra irá gerar a alteração na frequência de ressonância da antena.

Existem diversos modos de operação para o AFM, em especial o FM-AFM, frequency modulation atomic force microscopy. Nesse modo, a antena é um oscilador livre e com realimentação positiva, em outras palavras, sempre oscila na frequência de ressonância. Nesse modo, a nano-antena é excitada numa frequência fixa igual a sua frequência de ressonância. A interação da antena e amostra faz com que a antena vibre em uma frequência diferente da qual ela é excitada. Ao se comparar a frequência na qual a antena está vibrando com a que ela está sendo excitada é possível obter a distância entre amostra e a antena. A ferramenta mais utilizada para se caracterizar a diferença entre tais frequências é o PLL.

O PLL, ou phase locked loop, é uma malha de controle comumente utilizada para sintonizar sinais de frequência diferentes. Em sua forma mais simples, o PLL é uma malha de controle formada por basicamente 3 blocos: um detector de fase, um filtro passa-baixas e um oscilador controlado por tensão. O detector de fase compara a fase de um sinal de referência e o oscilador controlado por tensão<sup>3</sup>. No caso do FM-AFM, o oscilador controlado por tensão gera o sinal que excita a antena e o sinal de referência é o sinal proveniente da antena após a interação com a amostra. Por meio do detector de fase e do filtro é possível obter a diferença de frequência entre os sinais.

Apesar da existência de diferentes topologias de detector de fase, a aplicação em questão requer um detector de alta resolução. A variação da frequência máxima é na ordem de  $10^{-4}$  da frequência original. Para o projeto em questão, a resolução esperada busca detectar diferenças de frequência na ordem de  $10^{-10}$ . O objetivo desse artigo é apresentar e comparar a eficiência de diferentes técnicas de detectores de fase.

## 2. METODOLOGIA

Para a identificar as técnicas disponíveis foi realizada uma busca de artigos científicos do período de setembro de 2018 até a presente data. As palavras-chave utilizadas foram: phase detector; high resolution; AFM; PLL implementation.

Foram utilizados como fonte de artigos as plataformas: IEEE explore ScienceDirect e ResearchGate. Como critério de inclusão foram selecionados artigos que trazem implementação de PLL por PDS (processamento digital de sinais) e, como critério de exclusão, os artigos que implementam detectores de fase que utilizam portar lógicas ou flip flops.

Além de artigos foram feitos os estudos em livros e *technical briefs*, tanto sobre o AFM quanto sobre o PLL.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dos artigos lidos, os que apresentaram conteúdo relevante ao tema da pesquisa estão apresentados no quadro 1 em negrito. Os demais, apresentaram apenas conteúdo com valor informacional ou que serviram como base para entendimento do problema ou do sistema.

*Quadro 1. Artigos estudados*

	TÍTULO DO ARTIGO	CONTEÚDO
1	<b>An FPGA-Based linear all-digital phase-locked loop</b>	Apresenta uma técnica de alta resolução para detector de fase.
2	<b>Single-cycle-PLL detection for real-time FM-AFM applications</b>	Apresenta uma técnica de implementação de PLL para AFM.
3	<b>Phase Difference Measurement Method Based on Progressive Phase Shift</b>	Apresenta um detector de fase com um erro de 25 ps na fase
4	<b>Real-Time Differential Signal Phase Estimation for Space-based Systems Using FPGA</b>	É desenvolvido um algoritmo iterativo para detecção de fase com um erro de 0,0032°
5	<b>All digital control system for a novel high frequency sensor in non-contact atomic force microscopy</b>	Apresenta a implementação de um loop de controle com resolução de 0.1Hz
6	<b>Phase locked loop application to frequency modulation atomic force microscope</b>	Apresenta uma boa análise matemática do loop de controle do AFM
7	Voigtländer - 2015 - Scanning Probe Microscopy	Livro sobre AFM
8	PLL, performance, simulation and design	Livro sobre PLL
9	Analog frequency modulation detector for dynamic force microscopy	Apresenta um Sistema para AFM analógico com resolução de 0.1Hz
10	Digital phase lock loops-Architectures and applications	Livro sobre PLL digitais
11	Atomic Force microscope	Primeiro artigo sobre AFM
12	Noncontact atomic force microscopy simulator with phase-locked-loop controlled frequency detection and excitation	Simulação de um PLL para AFM usando o modo de frequency lock
13	Steady-state and transient behavior in dynamic atomic force microscopy	Análise das perturbações externas no AFM
14	Frequency modulation detection using high-Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity	Análise da implementação no vácuo de uma sonda de qualidade alta

Nem todos os artigos, livros ou outras fontes que foram analisados se mostraram relevantes o suficiente para serem apresentados. Dos materiais apresentados, o primeiro é baseado no algoritmo CORDIC e na transformada Hilbert, e possui uma resolução iterativa, porém a aplicação não é em AFM. O segundo é baseado numa rede de filtro passivo polifase para gerar o sinal em quadratura e atinge uma resolução de 0.1% da frequência de ressonância da ponta, a aplicação é em AFM. O terceiro desenvolve um detector de fase utilizando a topologia Progressive Phase Shift, com esta topologia o trabalho apresenta resultados com erro de 25 ps na fase. No quarto, a detecção de fase tem um erro maior que a apresentada em outras propostas e a quinta não apresenta resolução em frequência boa o bastante. Os documentos seguintes serviram como fonte de informação da problemática.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, ao analisar as propostas encontradas, há destaque para o método que utiliza o CORDIC, visto sua capacidade de apresentar uma resolução dependente do número de interações. Isso garante maior controle sobre a resolução. Porém, é ideal continuar a busca por novas ferramentas ou topologias que possam garantir resultados ainda melhores.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a EMBRAPPII, SEBRAE, SENAI-CIMATEC e pelo apoio financeiro e tecnológico.

#### 6. REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> G. Binning, C.F. Quate, and Ch. Gerber, “**Atomic force microscope**,” em Physical review letters, Março. 1986.
- <sup>2</sup> VOIGTLÄNDER, Bert. **Scanning Probe Microscopy**. [S. l.]: Springer, 2015. *E-book*.
- <sup>3</sup> BANERJEE, D. **PLL, performance, simulation and design**. [S. l.]: National Semiconductor, 1998. *E-book*.
- <sup>4</sup> M. Kumm, H. Klingbeil, and P. Zipf, “**An fpga-based linear all-digital phase-locked loop**,” em IEEE Transactions on circuits and systems, regular papers, VOL. XX, setembro 2009.
- <sup>5</sup> Schlecker, M. Duke, B. Erickson, M. Ortman, G. Fantner, and J. Anders, “**Single-cycle-pll detection for real-time fr-afm applications**,” em IEEE Transactions on biomedical circuits and systems, regular papers, VOL. 8 NO.2, Abril 2014.
- <sup>6</sup> M. Zhang, H. Wang, H. Qin, W. Zhao, and Y. Liu, “**Phase difference measurement method based on progressive phase shift**,” em MDPI journal electronics, Junho. 2018.
- <sup>7</sup> S. Lu, P. Siqueira, V. Vijayendra, H. Chandrikakutty, and R. Tessier, “**Real-time differential signal phase estimation for space-based systems using FPGA**,” em IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, VOL. XX, NO.X, Março. 2012.
- <sup>8</sup> J. Bouloc, L. Nony, C. Loppacher, W. Rahajandraibe, F. Bocquet, and L. Zaid, “**All digital control system for anovel high frequency sensor in non-contact atomic force microscopy**,” em IEEE journals, outubro 2012.
- <sup>9</sup> M. Bueno, J. M. Balthazar, and J. R. Piqueira, “**Phase locked loop application to frequency modulation atomic force microscope**,” em 9<sup>th</sup> Brazilian conference on dynamics, control and their applications, Junho. 2010.
- <sup>10</sup> K. Kobayashi, H. Yamada, H. Itoh, T. Horiuchi, and K. Matsushige, “**Analog frequency modulation detector for dynamic force microscopy**,” em Review of scientific instruments VOL 72. NUMBER 12, Dezembro 2001
- <sup>11</sup> S. R. Al-Araji, Z. M. Hussainand, and M. A. Al-Qutayri, “**Digital phase lock loops: Architectures and applications**,” springer, 2001.
- <sup>12</sup> L. Nony and A. B. et al., “**Noncontact atomic forcemicroscopy simulator with phase-locked-loop controlled frequency detection and excitation**,” em PHYSICAL RE-VIEW B 74, Dezembro 2006.
- <sup>13</sup> T. Wagner, “**Steady-state and transiente behavior in dy-namic atomic force microscopy**,” em Journal of applied physics 125, Janeiro. 2019.
- <sup>14</sup> T. Albrecht, P. Grutter, and D. Rugar, “**Frequency modulation detection using high-q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity**,” em Journal of applied physics 69, Setembro 1990.

