



## TÉCNICAS DE CONTROLE APLICADAS A UM ESPECTROMETRÔ COM DOIS PENTES DE FREQUÊNCIAS (DUAL-COMB SPECTROMETER)

**Palavras-Chaves:** Pente de frequência, Instrumentação de RF, Feedback Loop, Técnicas de controle

**Autores:**

**MURILO THEODORO MOREIRA SANTOS, IFGW - UNICAMP**  
**PROF. DR. FLÁVIO CALDAS DA CRUZ (orientador), IFGW - UNICAMP**  
**MARLON M CORREIA (coautor), IFGW - UNICAMP**

---

## 1 Introdução

A geração e o controle de ondas eletromagnéticas desempenharam um papel crucial no avanço tecnológico das últimas décadas, tanto no campo da óptica quanto na radiofrequência. No passado, as tecnologias de radiofrequência eram amplamente utilizadas, principalmente em telecomunicações e metrologia [2]. Entretanto, a utilização de sinais ópticos apresentava um desafio significativo: as frequências da luz oscilam 100.000 vezes mais rápido do que os sinais de radiofrequência (RF) [3]. Essa diferença impossibilitava, com a tecnologia da época, a realização de medições viáveis e precisas. Antes dos anos 2000, a medição de sinais ópticos era baseada no conhecimento da velocidade de luz e no comprimento de onda associado o que gerava baixa precisão nas medidas realizadas. No entanto, essa lacuna tecnológica só começou a ser resolvida nas últimas décadas com o desenvolvimento dos pentes de frequência óticas (OFC - *Optical Frequency Comb*).

Os OFCs são basicamente lasers pulsados (*modelocked lasers*) nos quais técnicas de estabilização de fase são aplicadas para controlar o espectro. Esses lasers geram pulsos em uma determinada taxa de repetição ( $f_{rep}$ ), que é definida pelo tamanho da cavidade do laser e controlada de forma ativa por meio de um mecanismo de feedback. Além disso, a fase do pulso em relação ao seu envelope é estabilizada, determinando uma relação entre as frequências ópticas que compõem o pulso de luz. Cada uma dessas frequências ópticas é dada pela equação  $\nu_N = Nf_{rep} + f_0$ , onde  $N$  é o número do modo e  $f_0$  é a frequência associada à fase do pulso em relação ao seu envelope. Tanto  $f_{rep}$  quanto  $f_0$  estão no domínio de radiofrequência, e a estabilização do laser pulsado permite uma relação direta entre frequências ópticas e frequências de RF. Isso possibilita a medição precisa de sinais ópticos, algo que era impossível com a tecnologia disponível anteriormente.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é entender e aplicar técnicas de controle em um espectrômetro que utiliza dois pentes de frequência ópticos. Especificamente, exploraremos como estabilizar a taxa de repetição e das frequências ópticas de ambos os pentes. A estabilização da taxa de repetição é crucial para garantir a precisão e a confiabilidade das medições espectroscópicas. Estes esforços visa não apenas avançar no entendimento fundamental dessas técnicas de controle, mas também proporcionar contribuições para aplicações futuras em espectroscopia e outras áreas afins.

## 2 Metodologia

Um sistema de feedback é uma técnica de controle cujo objetivo é ajustar o resultado de um processo para um valor desejado e mantê-lo constante, independentemente de quaisquer variações externas. Por exemplo, pode-se usar um sistema de feedback para travar a frequência de um laser em um valor específico ou para controlar a temperatura como no uso de um termostato. A principal característica do controle de feedback é a sua estrutura de ciclo fechado (*closed-loop*) [7]. O valor medido no final do processo ( $y_m$ ) é comparado com o valor desejado (*set point*) gerando assim um sinal de erro ( $\epsilon = y_{sp} - y_m$ ). O valor do erro é então retroalimentado para o sistema inicial por meio de instrumentos de controle ajustando o valor final do processo de forma a reduzir o erro. A Figura 1 representa uma estrutura típica de uma ciclo de feedback fechado.

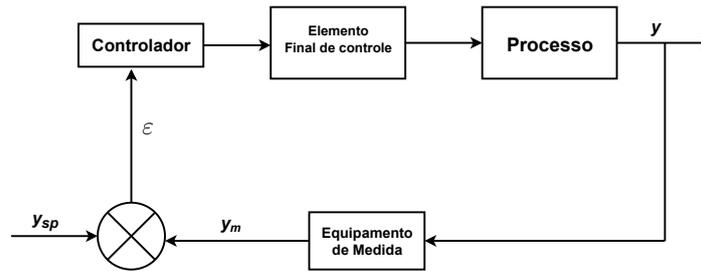


Figura 1: Ciclo fechado de feedback

Com base nesse conceito, foi desenvolvido um sistema de feedback para dois lasers de pulsos ultracurtos de estado sólido (vidro de Yb:Er) de 500 MHz de taxa de repetição operando em 1550 nm, com o objetivo de estabilizar o valor de  $f_{rep}$  de ambos. Utilizando componentes de RF implementou-se no laboratório o diagrama esquemático abaixo (Figura 2).

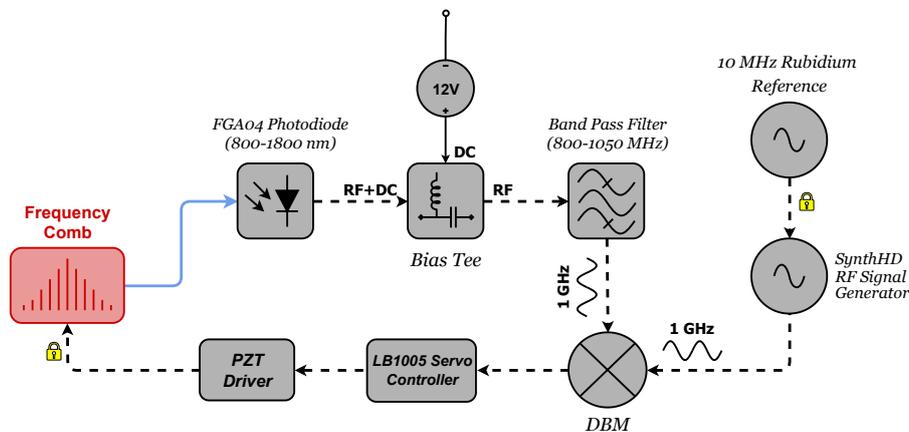


Figura 2: Diagrama do sistema de feedback. DBM: *Double Balanced Mixer*.

Analisando o sistema, primeiramente, é necessário realizar a detecção dos pulsos provenientes do *Frequency Comb*. Para isso, utiliza-se um fotodiodo, que converte a intensidade da luz em um sinal elétrico. Devido à taxa de repetição do laser, a cada 2 ns um pulso atinge o fotodiodo, gerando um sinal alternado de 500 MHz e seus harmônicos. Esses sinais são então enviados para um *Bias Tee* e um filtro passa-banda, que têm a função de eliminar quaisquer sinais de baixa frequência indesejados. Nesse ponto, o valor do processo é obtido e será estabilizado através da comparação com o sinal de *setpoint*.

Com o auxílio de um gerador de RF, define-se o sinal de referência que será utilizado para a geração do sinal de erro. O gerador *SynthHD* está sincronizado a um relógio de rubídio, proporcionando frequências mais precisas e estáveis. Ele foi configurado para transmitir um

signal de 1 GHz, que é então misturado com a frequência proveniente do laser através de um mixer (*DBM*). Como resultado, é gerado o sinal de erro, que é enviado para dois dispositivos de controle: o controlador servo e o *PZT Driver*.

O controlador servo amplifica o sinal de erro utilizando um controle proporcional-integral (PI), que gera um sinal proporcional ao erro atual e sua integral ao longo do tempo, corrigindo grandes variações de maneira eficaz [4]. O *PZT driver* é um controlador piezoelétrico cuja função é enviar uma tensão externa a um material piezoelétrico que está em contato com um dos espelhos da cavidade do laser. Materiais piezoelétricos têm a propriedade de alterar suas dimensões quando uma tensão externa é aplicada. Dessa forma, o *PZT driver* envia um sinal DC ao material piezoelétrico, que, devido à sua deformação, altera a posição do espelho, resultando em uma mudança na taxa de repetição do laser. A partir desse ponto, há o fechamento do ciclo e a  $f_{rep}$  será estabilizada no valor de referência definido.

O ruído de fase se refere às flutuações na fase de um sinal óptico. Mesmo com a estabilização ativa por meio de um mecanismo de feedback, influências externas podem causar variações indesejadas [6]. Para avaliar o sistema implementado, foram realizadas medições do ruído de fase da taxa de repetição e das frequências ópticas do pente, permitindo qualificar a estabilidade dos sinais ao verificar o espectro de frequências resultante dessas flutuações.

Para medir o ruído de fase das frequências ópticas, utilizou-se a técnica *Delayed Self-Homodyne*, amplamente empregada na caracterização da largura de linha de sinais ópticos. O alargamento espectral, é principalmente causado por variações de fase, isso conecta diretamente a largura de linha do laser ao ruído de fase [6]. Nesse sentido, foi empregado o experimento abaixo (Figura 3) para determinar a largura de linha das frequências ópticas do pente e assim quantificar o ruído de fase das mesmas.

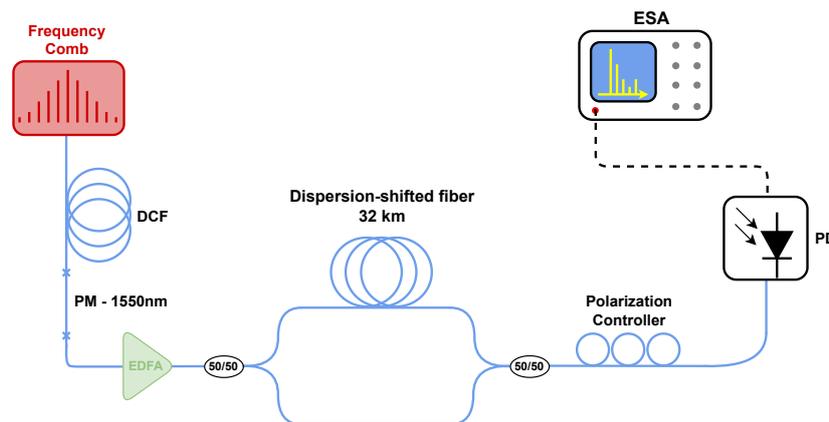


Figura 3: Diagrama experimental utilizado para a medição da largura de linha do laser. *DCF*: *Dispersion-Compensating Fiber*; *PM*: *Polarization-Maintaining*; *EDFA*: *Erbium Doped Fiber Amplifier*; *PD*: *Photodiode*; *ESA*: *Electrical Spectrum Analyzer*.

Na configuração mostrada na Figura 3, o sinal óptico, após ser amplificado pelo *EDFA*, é dividido em dois caminhos: o caminho de atraso, com 32 km de fibra, e o que chamamos de braço curto. O sinal que percorre o braço longo fica atrasado temporalmente em relação ao braço curto. Quando os dois sinais se misturam, é gerado um sinal de batimento [6]. Esse sinal de batimento é então detectado por um fotodiodo e analisado em um *ESA*. O alargamento espectral do sinal medido pelo *ESA* é principalmente devido ao ruído de fase do pente de frequência, permitindo assim a avaliação da estabilidade do sistema.

Em relação a taxa de repetição, foi feita uma análise a partir do sinal de erro gerado pelo mixer, este foi enviado para um *Network Spectrum Analyzer* que, diferente do *ESA* que mede frequências a partir de 9 kHz, este é capaz de medir sinais abaixo de 9 kHz. A ideia principal é verificar o espectro de frequência do ruído presente em  $f_{rep}$  e como o sistema de feedback atua para corrigir essas frequências.

### 3 Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados das medidas de ruído de fase das frequências ópticas e da taxa de repetição, analisando a estabilidade e a eficácia do sistema de feedback implementado. Após a coleta dos dados referentes à caracterização das larguras de linhas dos sinais ópticos, foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 4 e 5.

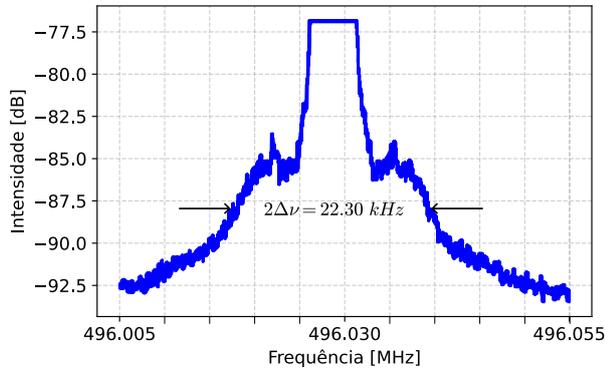


Figura 4: Resultado da medida da largura de linha do pente de frequência com sistema de feedback ligado.

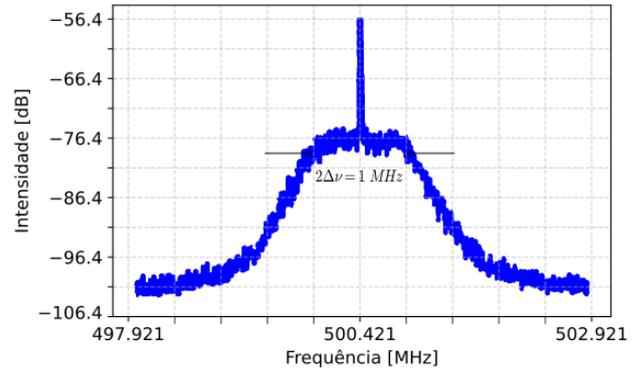


Figura 5: Resultado da medida da largura de linha do pente de frequência com sistema de feedback desligado.

Para avaliar a eficácia do sistema de feedback, as medidas foram realizadas com o mecanismo ativado e desativado. Como resultado, obteve-se uma largura de linha de  $\Delta\nu = 11.15 \text{ kHz}$  com o feedback ativado, e uma largura de  $\Delta\nu = 500 \text{ kHz}$  com o feedback desativado. Isso representa uma diferença de 97.77%, ou seja, quando não há nenhum sistema de controle ativo no laser, diversas influências externas, como vibrações mecânicas na cavidade e variações de temperatura do laboratório [6], fazem com que as frequências ópticas do espectro tenham um alto ruído de fase, resultando em um grande alargamento espectral. Por outro lado, ao ativar o feedback, o sistema de controle consegue corrigir essas perturbações diminuindo o ruído de fase.

Em seguida, com as medidas de estabilidade da taxa de repetição foi possível gerar o gráfico da Figura 6.

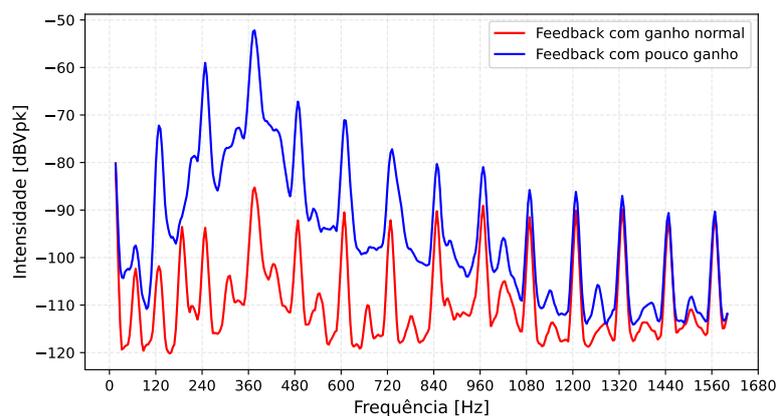


Figura 6: Medida do espectro de frequências do ruído presente na taxa de repetição.

Para realizar essa medição e avaliar a atuação do sistema de feedback, foi variado o ganho do controlador servo para um valor abaixo do usual. Dessa maneira, o sinal enviado para a cavidade do laser corrige de forma mais "leve" os possíveis ruídos. Nesse contexto, a curva em azul representa a situação descrita anteriormente. Note que, na região de 0 Hz a aproximadamente 1000 Hz, as frequências apresentam um nível de intensidade considerável,

indicando que o atuador piezoelétrico dentro da cavidade não está respondendo suficientemente para eliminar essas componentes de ruído.

Por outro lado, ao aumentar o ganho do sinal de controle, o piezoelétrico se torna capaz de responder a essas frequências e reduzir o nível de intensidade dessas componentes. A curva em vermelho demonstra essa situação, mostrando que o pico em torno de 360 Hz teve uma redução significativa de aproximadamente 35 dB. Portanto, esse resultado evidencia tanto a atuação do atuador piezoelétrico quanto a estabilidade da taxa de repetição para baixas frequências. Outro ponto importante a ser citado, são os picos que aparecem em ambas as curvas. A maior parte deles é devido a rede elétrica em que o aparelho de medida estava ligado e, note que eles são múltiplos de 60 Hz e se estendem até alguns kHz.

## 4 Conclusão

A partir das análises dos resultados, o sistema de feedback evidencia sua capacidade em reduzir o ruído de fase do pente de frequência e da taxa de repetição. A largura de linha dos sinais ópticos foram significativamente reduzidas, indicando a melhor estabilidade do pente. Entretanto, comparando com valores encontrados na literatura, ainda há melhorias possíveis de serem feitas para aprimorar o controle de fatores externos. Mesmo assim, o resultado obtido de 11.15 kHz de largura de linha representa uma ótima estabilização sendo o suficiente para boas medidas espectroscópicas. Além disso, com o valor correto de ganho do controlador servo os ruídos de baixa frequência da taxa de repetição são eliminados estabilizando o valor de  $f_{rep}$ .

## Referências

- [1] CERDA, R. M. *Understanding quartz crystals and oscillators*. Artech House, 2014.
- [2] DIDDAMS, S. A., VAHALA, K., AND UDEM, T. Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum. *Science* 369, 6501 (2020).
- [3] FORTIER, T., AND BAUMANN, E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications. *Communications Physics* (2019).
- [4] HAGGLUND, T., AND ASTRÖM, K. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. ISA: International Society of Automation, 1995.
- [5] KIM, Y., KIM, S., KIM, Y.-J., HUSSEIN, H., AND KIM, S.-W. Er-doped fiber frequency comb with mhz relative linewidth. *Optics express* (2009).
- [6] MAHJOUR, S. S., RODIGHERI, M., GALLEG, C. M., AND CONFORTI, E. khz linewidth laser characterization using low frequency and excess noise measurements. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* 22, 4 (2023), 410–426.
- [7] MAYR, O. The origins of feedback control. *Scientific American* 223, 4 (1970), 110–119.
- [8] SWANN, W. C., MCFERRAN, J. J., CODDINGTON, I., NEWBURY, N. R., HARTL, I., FERMANN, M. E., WESTBROOK, P. S., NICHOLSON, J. W., FEDER, K., LANGROCK, C., ET AL. Fiber-laser frequency combs with subhertz relative linewidths. *Optics letters* (2006).