

UM MÉTODO EFICIENTE PARA O CONTROLE DA DISCIPLINA DE UM OSCILADOR DE QUARTZO HP10811AB

VICTOR F. M. GALLO, RICARDO J. DE CARVALHO

*Laboratório Primário de Tempo e Frequência, Divisão Serviço da Hora, Observatório Nacional
Rua General José Cristino, 77, 20921-040, São Cristóvão, Rio de Janeiro, Brasil*

E-mails: victorgallo@on.br, carvalho@on.br

ALESSANDRO R. L. ZACHI, CARLOS H.F. ALVES

*Laboratório de Controle e Automação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, CEFET-RJ
Av. Maracanã, 229, Bloco E, 20271-110, Maracanã, Rio de Janeiro, Brasil*

E-mails: zachi@cefet-rj.br, caique@cefet-rj.br

Abstract— In this paper an algorithm was developed for adjusting the output frequency of a quartz oscillator, used in Time and Frequency applications. The quartz oscillator discipline consists on the output frequency adjust when a controlled voltage is applied in a specific input terminal by this control algorithm. This discipline control by algorithm occurs according to the oscillator's input/output behavior. With such control algorithm, it is intended to make the variation of the frequency, taken relatively to the atomic frequency standard, to stay stabilized in the micro Hertz range, (10^{-11}). Some results are presented with the application of the control algorithm.

Keywords— Time and Frequency metrology, Quartz oscillator, QMEMS, GNSS, Cesium-Beam Atomic Standard and Quartz oscillator discipline.

Resumo— Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo para ajustar a frequência de saída de um oscilador de quartzo, utilizado em aplicações de Tempo e Frequência. A disciplina do oscilador de quartzo consiste no ajuste da frequência de saída quando é aplicada tensão num pino específico de entrada pelo algoritmo de controle. O controle da disciplina através do algoritmo ocorre segundo o modelo do comportamento entrada/saída do oscilador. Com este algoritmo de controle pretende-se fazer com que a frequência de saída tomada em relação à frequência do padrão atômico, fique estabilizada com variações na faixa de micro Hertz, (10^{-11}). Alguns resultados são apresentados com a aplicação do algoritmo de controle.

Palavras-chave— Metrologia de Tempo e Frequência, Oscilador de quartzo, QMEMS, GNSS, Padrão Atômico de feixe de césio e Disciplina de oscilador de quartzo.

1 Introdução

Disciplinar um oscilador de quartzo é torná-lo uma base de tempo exata e estável num extenso intervalo de tempo, através do ajuste periódico de sua frequência de saída a partir de uma frequência de referência. Desta forma, portanto, ocorre a relação entre o padrão de césio e o oscilador de quartzo neste trabalho. O primeiro é superior em estabilidade e exatidão e define a frequência do segundo que oscila conforme a frequência de seu ressonador, cristal de quartzo, que é disciplinado pelo primeiro.

A disciplina de osciladores de quartzo que por décadas era mais conhecida dentro de laboratórios de metrologia de tempo e frequência, passou a estar presente em aplicações cotidianas e indispensáveis a partir da viabilidade do ajuste de frequência por uma referência remota, graças a transmissão da frequência de padrões atômicos via sistemas de navegação global por satélite, GNSS, (Cheng, Chang e Kun 2013).

O cristal de quartzo é um ressonador que realiza o processo de disciplina nativamente devido ao efeito piezoelétrico que fundamenta seu funcionamento.

1.1 Objetivo

Este trabalho visa elaborar um algoritmo de controle para o ajuste, disciplina, automático da frequência de saída de maneira que a variação de frequência, (adimensional) seja da ordem de grandeza de 10^{-11} , que equivale à exatidão na frequência de saída da ordem de micro Hertz.

1.2 Motivação

Apesar dos avanços da tecnologia QMEMS, (Tanaka 2010), que visa a integração de osciladores de quartzo em um *chip*, ainda não há alternativa comparável ao cristal de quartzo com superior custo-benefício, nos quesitos estabilidade da resposta em frequência em curto intervalo de tempo e velocidade na resposta, para as aplicações de Tempo e Frequência.

Todas as soluções mais exatas e estáveis que o quartzo são mais caras. Dentre estas, as principais empregam um oscilador de quartzo em seu circuito, como nos padrões de césio, hidrogênio e rubídio.

1.3 Formulação do Problema

Para disciplinar a variação de frequência de saída do oscilador de quartzo na escala de 10^{-11} foi necessário identificar a faixa de tensão de controle, EFC, conforme análise do comportamento entrada/saída levantado experimentalmente, (tópico 3), que permitiu a criação de modelo matemático e lei de controle, (tópicos 4 e 5). Além da faixa de tensão EFC foi levantado o comportamento não linear denominado Histerese, μ , detalhado no tópico 3. Na Figura 1 é apresentado o diagrama em blocos do sistema utilizado no levantamento experimental do comportamento entrada/saída, simulações do modelo matemático, lei de controle e resultados finais do controle da disciplina realizado pelo algoritmo desenvolvido. O mesmo sistema foi utilizado para os passos citados acima devido à necessidade da comparação permanente entre a saída do oscilador e a saída do padrão de césio em alta resolução e a cada segundo, que gera o sinal de erro, denominado neste trabalho de variação de frequência, (adimensional).

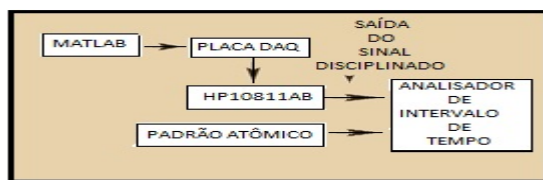


Figura 1. Diagrama em blocos do sistema de controle da disciplina do oscilador de quartzo HP10811AB.

2 Funcionamento

Na Figura 1, são apresentados os principais componentes detalhados abaixo. Os recursos utilizados para a realização deste trabalho são mencionados a partir do detalhamento do funcionamento do sistema de controle. Todos equipamentos utilizados foram sincronizados externamente com a base de tempo atômica de um padrão de césio.

2.1 Oscilador de quartzo

O oscilador de quartzo utilizado neste trabalho é um oscilador OCVCXO, (*Oven controlled Voltage Controlled Oscillator*), de modelo HP10811AB fabricado pela Hewlett-Packard de alta performance utilizado exclusivamente em padrões atômicos de césio modelo 5061. Na Figura 2 é apresentado o diagrama em blocos do HP10811AB.

O controle de temperatura por forno é adotado para que a temperatura de operação esteja contida na faixa de 80°C à 84°C e fique imune às variações na temperatura ambiente. Este controle é realizado por compensação na qual é utilizado um termistor num circuito de ponte de Wheatstone.

No controle de frequência por tensão, a tensão é aplicada externamente no pino EFC de entrada que está conectada por divisor resistivo a um diodo varistor que altera a frequência do quartzo por meio de

variação de capacitância, (Hewlett-Packard 1980). A variação de frequência, (adimensional), é denominada, neste trabalho, como $\Delta f/f_0$ que é representada matematicamente pela Equação 1.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (1)$$

Sendo f a frequência de saída do HP10811AB e f_0 a frequência de saída do padrão de césio.

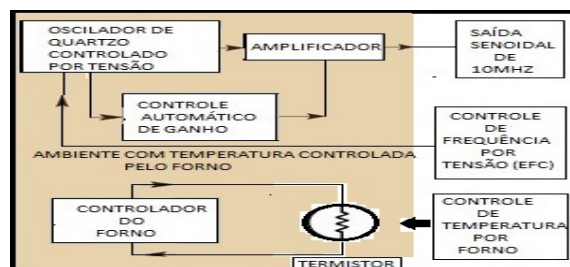


Figura 2. Diagrama em blocos do oscilador HP10811AB.

2.2 Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição de dados utilizada é fabricada pela Measurements Computing, possui modelo USB-2527 e foi especificada para este trabalho porque possui compatibilidade com a biblioteca de aquisição de dados do MATLAB versão R2013A, pela alta frequência de operação, 1MHz, dos conversores A/D e D/A, pela resolução de 16 bits destes conversores e pela tensão máxima de offset de $\pm 0,0045V$, conforme (Measurement Computing 2010). Apesar da tensão de offset máxima ser de $\pm 0,0045V$ foram geradas milivoltagens com resolução de $\pm 0,001V$ que foram aplicadas no pino EFC do HP10811AB para a identificação da região de inflexão da $\Delta f/f_0$ através de algoritmo criado no MATLAB. A região de inflexão é ilustrada nas Curvas de $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC das Figuras 4 (Curva de Histerese), 5 (Região de Inflexão ampliada) e 6 (Modelo Matemático Qualitativo), onde um patamar estreito e estável separa as variações positiva e negativa da $\Delta f/f_0$ e é denominado neste trabalho como região de inflexão.

2.3 Analisador de Intervalo de Tempo.

Este Analisador é fabricado pela Time Solutions, possui modelo TSC 5110A, mede a cada segundo a diferença de fase e de frequência entre as duas entradas com resolução de fento segundo, plota em seu monitor em forma de diversas telas as Curvas de variações citadas em relação ao tempo atualizadas a cada segundo, a Curva de Desvio de Allan em relação ao tempo médio de amostragem e envia os dados de variação de fase com resolução de fento segundo via porta serial. Em um computador conectado via porta serial ao TSC 5110A, um aplicativo escreve cada variação de fase em uma linha de um arquivo de

texto e salva tal arquivo em um diretório definido pelo usuário.

As curvas da $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC plotadas neste trabalho são resultado da comparação através de método heterodino dos sinais das saídas do HP10811AB e do padrão de césio que geram ambos sinais senoidais de 10MHz.

Sendo $\Delta f/f_0$ o sinal de saída do sistema de controle e a tensão EFC a entrada tais curvas de $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC representam o modelo do comportamento entrada/saída do HP10811AB.

2.4 Ambiente MATLAB.

A versão R2013A do MATLAB foi escolhida por possuir compatibilidade com a ferramenta de aquisição de dados, *toolbox*, que é capaz de reconhecer a placa DAQ USB-2527 através de objeto criado no código-fonte do algoritmo de controle desenvolvido. Um script desenvolvido no MATLAB lê o arquivo de texto com as medidas de variação de fase e deriva as variações de fase em relação ao tempo para obter a $\Delta f/f_0$. Desta forma, o sinal de erro, que é $\Delta f/f_0$, pode ser gerado em função da tensão EFC definida em até unidades de milivoltagem especificados no script para traçar o comportamento entrada/saída do HP10811AB e, mais a frente, do resultado final após definida a faixa ideal de tensão EFC.

2.5 Padrão atômico de tempo e frequência de feixe de césio.

O padrão de Césio foi reconhecido internacionalmente, em 1967, na 13ª conferência geral de pesos e medidas, (CGPM), como equipamento capaz de gerar o segundo mais exato através da frequência de ressonância do Césio, (9.192.631.770Hz).

Tal frequência é gerada na saída do padrão atômico quando ocorre a transição de níveis hiperfinos do estado quântico fundamental do césio. A transição de níveis hiperfinos, mais precisamente entre os níveis 3 e 4, é gerada como consequência de energia eletromagnética emitida transversalmente ao feixe de césio através da cavidade de microondas, (Jespersen 1999). A emissão desta energia eletromagnética acarreta em aumento seguido de decréscimo do nível de energia dos átomos de césio, conforme equação 2. No momento em que entram em ressonância ocorre o decréscimo de energia e os átomos retornam ao seu nível de energia inicial. A energia eletromagnética que o excitou é convertida na frequência de saída com muito maior exatidão e estabilidade. A frequência inicial que gera a energia eletromagnética é gerada por um oscilador de quartzo HP10811AB nos padrões de césio de modelo 5061. A frequência de 10MHz do HP10811AB é multiplicada pelo módulo sintetizador de frequências para gerar uma frequência muito próxima da de ressonância do césio a ser emitida na cavidade de microondas. A diferença entre a frequência de excitação do feixe de césio e a fre-

quência de ressonância do feixe césio gera um sinal de erro que disciplina a frequência de excitação gerada inicialmente pelo HP10811AB, que, portanto, acumula as funções de excitação e realimentação do oscilador atômico do padrão de césio.

$$F_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2)$$

F_0 é a frequência de ressonância do Césio, E_2 e E_1 são os dois níveis de energia assumidos pelos átomos de Césio, respectivamente, quando absorve e emite energia e h é a constante de Planck. O funcionamento do padrão de césio é ilustrado na figura 3.

Os campos A são responsáveis por seleção que permite apenas o fluxo de átomos com estado quântico inicial. Os campos B são responsáveis por selecionar os átomos de césio que entraram em ressonância.

Após a seleção dos campos B, estes átomos são detectados por pureza num espectrômetro de massa e multiplicados para gerar a frequência de saída senoidal de 10MHz.

A alteração de nível quântico dos átomos de césio só ocorre quando não há interferência externa de nenhum campo magnético. Por isso o campo magnético C que possui ajuste fino para anular a influência de campo externo no padrão de césio é empregado.

As transições hiperfinas são assim denominadas por ocorrerem, quando o elétron de valência altera seu movimento de rotação, spin, ao sofrer interferência eletromagnética do campo gerado pelo núcleo de seu átomo. Essa interferência é denominada interação dipolo momento magnético entre elétron de valência e núcleo.

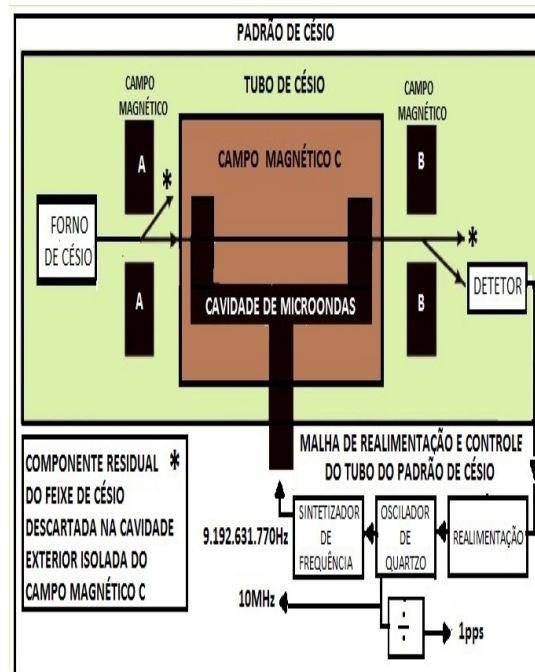


Figura 3. Funcionamento básico de um padrão de césio.

3 Levantamento Experimental

O levantamento experimental consiste na coleta de medidas e na análise das Curvas $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC para se obter o comportamento entrada/saída do oscilador. Este processo se divide em identificação da região de inflexão na Curva de $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC, da faixa de tensão EFC correspondente à região de inflexão, da faixa mais estreita de tensão EFC que promove maior estabilidade e exatidão na disciplina do HP10811AB e de comportamentos não lineares que causem eventuais desvios, conforme a histerese na Figura 4,

Inicialmente foram geradas tensões do intervalo recomendado pelo fabricante HP de $\pm 5V$, sendo que cada tensão foi gerada por 10 minutos com variação de 1V através de *script* gerado no MATLAB e a respectiva $\Delta f/f_0$ foi obtida através de medidas do TSC55110. Este mesmo procedimento foi repetido adaptando a faixa de tensões conforme resultados do levantamento anterior para intervalos de tensão entre 1 e 2V com variação de 5mV e entre 1,7 e 1,8 V com variações de 5mV e 1mV, quando foi obtido gráfico da Figura 5. A identificação da histerese foi realizada através de outro script que gera sequência crescente e decrescente do intervalo de 1,7 a 1,8V com variação de 1mV para obter na Figura 4, o Laço de Histerese, que é uma característica do comportamento predominantemente indutivo do cristal de quartzo no oscilador HP10811AB.

4 Modelo Matemático

Observando o comportamento entrada/saída pelas Curvas de $\Delta f/f_0$ versus tensão EFC plotadas nas Figuras 6 e 4 foi notado um comportamento com característica de uma *função linear por partes*, sendo a região de inflexão, (onde $\Delta f/f_0$ assume valores menores que 10^{-10}) e os segmentos de reta que possuem coeficientes angulares negativos mesmo sob o efeito da histerese, μ . Desta forma é possível definir o modelo matemático qualitativo conforme Equação 3:

$$y = F(x) + \mu \quad (3)$$

Sendo $x = V$ (em Volts), $y = \Delta f/f_0$ adimensional, μ é a histerese e $F:x \rightarrow y$ representa uma função escalar contínua por partes.

5 Lei de Controle

Derivando a equação (3) em relação ao tempo, obtém-se em (4) a inclinação de $F(x)$ em cada x que é uma quantidade não-positiva para quaisquer valores de x em qualquer instante $t \geq 0$.

$$\dot{y} = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \dot{x}. \quad (4)$$

Esta característica dinâmica é independente dos valores dos coeficientes angulares das retas na Figura 6 e do efeito provocado pela histerese, que afeta apenas a posição horizontal da curva $\Delta f/f_0$ versus Tensão, introduzindo um deslocamento μ constante para a direita ou para a esquerda.

O objetivo da lei de controle para a disciplina do oscilador é gerar um nível de tensão na entrada de controle do oscilador de modo que sua variável de saída atinja

$$y_{REF} = \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)_{REF} < 10^{-10} \quad (5)$$

Sendo assim, uma variável de erro de saída pode ser escolhida como:

$$e = y - y_{REF}. \quad (6)$$

Sendo y_{REF} um valor constante, a derivada em relação ao tempo da Equação (6) resulta em:

$$\dot{e} = \dot{y} = \frac{\partial F(x)}{\partial x} \dot{x}. \quad (7)$$

Para fechar a malha do sistema dinâmico descrito pela equação diferencial em (7), adota-se uma lei de controle $\dot{x}$ do tipo proporcional no erro, isto é:

$$\dot{x} = K_p e, \quad (8)$$

sendo $K_p > 0$ uma constante de projeto que pode ser escolhida de forma arbitrária. Para demonstrar que a lei de controle escolhida de fato atinge os objetivos de controle da disciplina do oscilador, basta inserir sua equação descrita em (8) na equação (7):

$$\dot{e} = K_p \left[\frac{\partial F(x)}{\partial x} \right] e. \quad (9)$$

Observe que se $\partial F(x)/\partial x$ fosse uma constante negativa, então a solução de (9) seria uma função exponencial decrescente. Contudo, $\partial F(x)/\partial x$ é uma função que varia com x e com o tempo. Note-se, entretanto, que apesar de ser variante, seu sinal é bem definido e conhecido. Observando o gráfico da Figura 6, é possível verificar que o módulo de $\partial F(x)/\partial x$, para quaisquer valores de x e t , sempre admite um limitante inferior constante $K_0 > 0$. Baseado nesta hipótese, a Equação (9) pode ser reescrita em termos deste limitante, ou seja:

$$\dot{e} = -K_p \left| \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right| e \leq -K_p K_0 e. \quad (10)$$

Apenas para efeito de análise, resolvendo a equação diferencial para o caso da igualdade:

$$\dot{e} = -K_p K_0 e, \quad (11)$$

Sendo $\epsilon(t)$ é uma variável muda, tem-se uma solução $\epsilon(t)$ exponencialmente decrescente com o tempo, dada por:

$$\epsilon(t) = \epsilon(0) \cdot \exp(-K_p K_0 t). \quad (12)$$

De acordo com a desigualdade da Equação (10) e com o *Lema da Comparação* (SLOTINE & LI, 1996), a solução encontrada em (12) majora a solução da Equação em (10), isto é,

$$|\theta(t)| \leq |\epsilon(t)|. \quad (13)$$

A partir de (13), chega-se à conclusão final de que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t) \rightarrow 0, \quad (14)$$

que é uma condição equivalente à

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \rightarrow 10^{-11}. \quad (15)$$

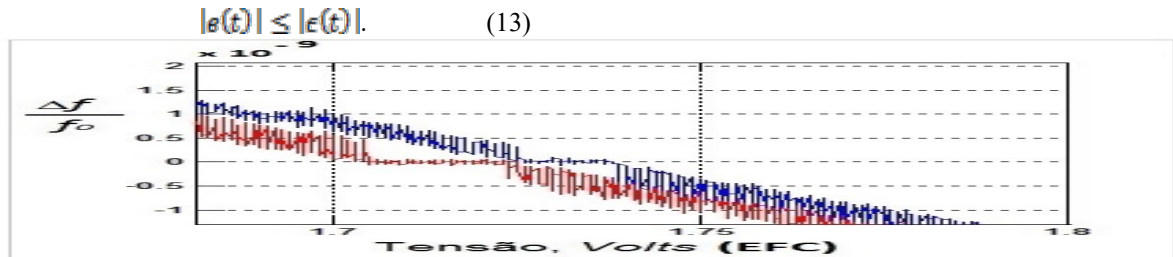


Figura 4. Curva da Histerese da $\Delta f/f_0$ versus Tensão EFC

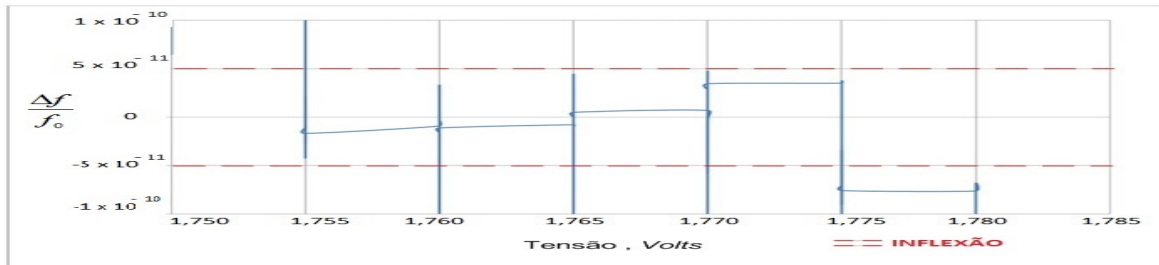


Figura 5. Curva da $\Delta f/f_0$ versus Tensão EFC com inflexão ampliada

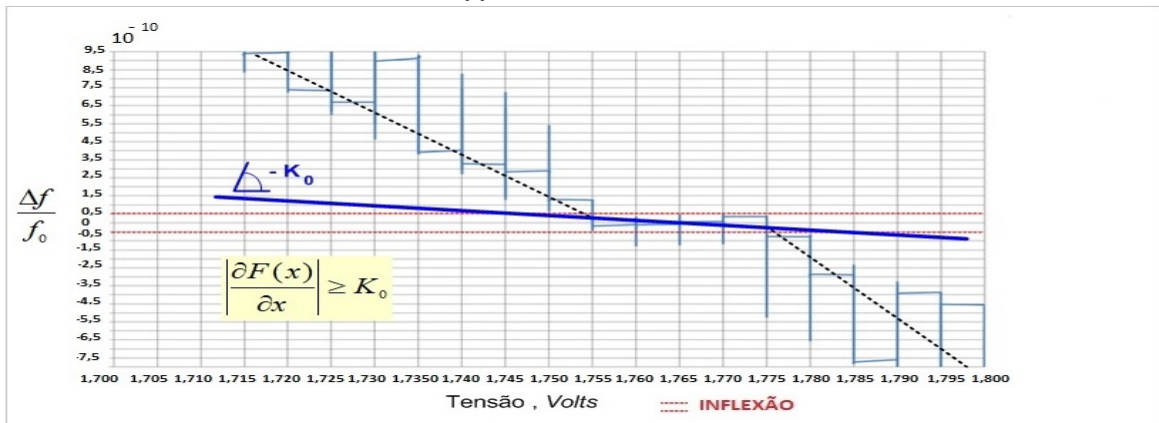


Figura 6. Curva do $\Delta f/f_0$ versus Tensão EFC, representação gráfica do modelo matemático.

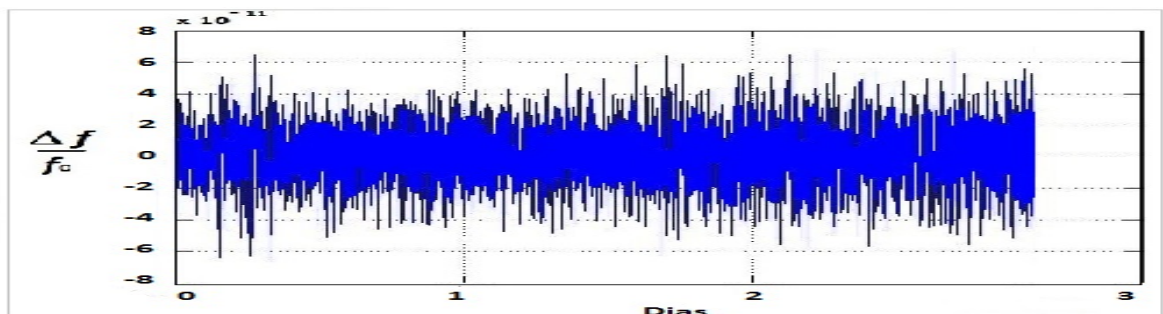


Figura 7. Curva do Resultado final da $\Delta f/f_0$ versus Tensão EFC

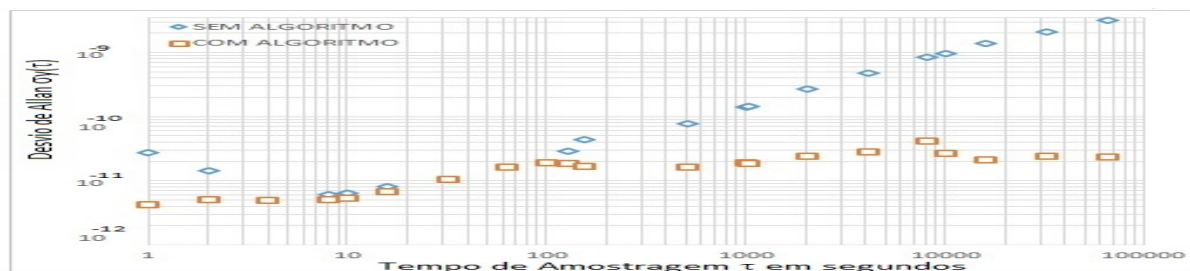


Figura 8. Curva log comparativa do Desvio de Allan do HP10811AB com controle e sem controle da $\Delta f/f_0$ por algoritmo.

6 Algoritmo

O algoritmo desenvolvido no MATLAB gera ciclicamente uma faixa sequencial de valores de tensão dentro de um intervalo entre 1,775 e 1,778 Volts com resolução de 1mV em que cada tensão foi aplicada por 10 segundos através da placa DAQ em faixa de tensão menos estreita que a da de inflexão para evitar desvios pelo efeito de histerese.

7 Resultados

O algoritmo de controle disciplinou o HP10811AB durante aproximadamente 3 dias com $\Delta f/f_0$ de $\pm 7,5 \cdot 10^{-11}$ mantendo-se a faixa de tensão EFC entre 1,775 e 1,778 V, conforme Figura 7, que apresenta a Curva de análise de exatidão do resultado deste trabalho.

Na Figura 8 é apresentada a Curva de análise comparativa de estabilidade do HP10811AB pelo Desvio de Allan com controle pelo algoritmo e sem controle. Nesta é possível notar o ganho de estabilidade com o controle pelo algoritmo, que apresenta dispersão de valores da ordem de 10^{-11} em $\Delta f/f_0$, que indica alta estabilidade no sistema de controle implementado. O Desvio de Allan é uma ferramenta padronizada pelo IEEE para a análise no domínio do tempo da resposta em frequência de osciladores eletrônicos. De forma diferente dos demais cálculos clássicos de dispersão, o Desvio de Allan utiliza como referência valores de medidas adjacentes num intervalo de tempo de amostragem, τ , ao invés do valor da média do total de medidas, (Hewlett-Packard 1997).

8 Conclusão

Com os resultados apresentados constata-se a eficiência do método proposto neste trabalho para o controle da disciplina de o oscilador de quartzo através do desenvolvimento e aplicação de algoritmo de controle após o desenvolvimento de modelo matemático a partir do levantamento experimental de seu comportamento entrada/saída. A partir deste, foi possível identificar a região de inflexão e definir uma faixa de tensão, (entre 1,775 e 1,778V), mais estreita

que a de inflexão, (19mV), para controlar a disciplina sem influência de histerese durante aproximadamente 3 dias com $\Delta f/f_0$ na faixa de 10^{-11} , ($\pm 7,5 \cdot 10^{-11}$), (Gallo 2015).

Agradecimentos

Agradeço à Divisão Serviço da Hora, (DSHO), do Observatório Nacional, (ON), responsável pela geração, disseminação e conservação da Hora Legal Brasileira, (HLB), pela orientação e pelos recursos cedidos, desde o oscilador HP10811AB ao acesso e utilização do Laboratório Primário de Tempo e Frequência, (LPTF) para todos os ensaios experimentais indispensáveis a realização deste trabalho.

Agradeço também ao CEFET-RJ pela orientação e pela formação obtida no curso de mestrado em engenharia elétrica em 2015 e na pesquisa de dissertação da qual este artigo se originou.

Referências Bibliográficas

- Cheng, C. L.; Chang F. R. and Kun, Y. T. (2013). Highly Accurate Real-Time GPS Carrier Phase Disciplined Oscillator. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 54, Issue 2. pp. 819-824.
- Gallo, V. F. M. (2015). Teoria de Controle Aplicada na Modelagem do Processo de Disciplina Automatizada de um Oscilador de Quartzo. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPEEL. CEFET. Rio de Janeiro. Brasil.
- Hewlett-Packard (1980). Operating & Service Manual - 10811A/B Quartz Crystal Oscillator. HP. Santa Clara. CA.
- Hewlett-Packard (1997). The Science of Timekeeping, Application Notes 1289. HP. Santa Clara. CA.
- Jespersen, J. and Fitz-Randolph J. (1999). From Sundials to Atomic Clocks - Understanding Time and Frequency. NIST. USA
- Measurement Computing (2011). USB –2527 Multi-function, Measurement and Control. User Guide. USA
- Slotine, J. J. E. and Li, W. (1991). Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall. USA.
- Tanaka, M. (2010). An Overview of Quartz MEMS Devices. IEEE International Frequency Control Symposium, pp.162-167.