



**MIGRAÇÃO EQUATORIAL DE
MASSA E ALONGAMENTO DO DIA:
ACOPLAMENTO DE CORIOLIS,
DERIVA DE CALIBRAÇÃO E
ESTABILIDADE DA WORD CLOCK
FORA DA LATITUDE 0,0000deg**



Migração equatorial de massa e alongamento do dia: acoplamento de Coriolis, deriva de calibração e estabilidade da word clock fora da latitude 0,0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Resumo

Em março de 2026, Kiani Shahvandi e Soja relataram no *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* que a duração do dia está agora a aumentar aproximadamente 1,33 milissegundos por século, um ritmo que consideraram sem precedentes em pelo menos 3,6 milhões de anos. O mecanismo é a redistribuição de massa: o gelo perdido das calotes polares e dos glaciares de montanha entra nos oceanos e migra em direção ao equador, aumentando o momento de inércia do planeta e abrandando a sua rotação. O comité observa, sem triunfalismo, que o planeta começou a deslocar a sua massa em direção a 0,0000deg.

Examinamos as consequências para a distribuição de word clock no áudio digital. Um ressonador de quartzo num planeta em rotação sofre um acoplamento de Coriolis proporcional ao parâmetro de Coriolis local, $2 \Omega \sin(\text{latitude})$. Um clock calibrado sob uma velocidade de rotação e operado sob outra afasta-se das suas condições de calibração em todas as latitudes exceto no equador, onde o parâmetro de Coriolis é zero independentemente da velocidade de rotação. Relatamos medições de 36 cadeias de word clock entre 64deg N e 43deg S, avaliadas em 2024 e novamente em 2026. O resíduo de fase rotacional correlacionou-se com o seno da latitude do local ($r = 0,91$, $p < 0,001$), aumentou entre os levantamentos em todos os 32 locais não equatoriais e foi indistinguível de zero nos quatro locais de Quito. O Cabo Equinox Word Clock reduziu a acumulação do resíduo em cadeias de três saltos em 88 %; o Cabo SC Word Clock reduziu-a para abaixo do limite de medição de 1 fs. Propomos o Desvio de Referência Rotacional como uma especificação de primeira ordem para clocks e recomendamos a recertificação anual dos clocks mestres fora da faixa equatorial.

1. INTRODUÇÃO

Durante a maior parte da história do som gravado, a rotação da Terra foi tratada como uma constante. Não é, e nunca foi. A fricção das marés causada pela Lua alonga o dia desde que existe uma Lua para o fazer. O que mudou foi o ritmo e a razão.

Em março de 2026, Kiani Shahvandi e Soja publicaram uma reconstrução da variação da duração do dia que recua até ao Plioceno Superior. A sua conclusão foi que o atual alongamento do dia induzido pelo clima, de aproximadamente 1,33 milissegundos por século desde 2000, não tem paralelo em pelo menos 3,6 milhões de anos. Como declarou Benedikt Soja, da ETH Zurique, no comunicado que acompanhou o estudo: «Este rápido aumento da duração do dia implica que o ritmo das alterações climáticas modernas não tem precedentes pelo menos desde o Plioceno tardio, há 3,6 milhões de anos.»

A comunidade da geofísica enquadrou corretamente este resultado como uma descoberta sobre o clima. O comité lê o mecanismo com uma ênfase diferente. O dia está a alongar-se porque a massa está a deixar os polos e a chegar ao equador. Desde a sua fundação, a Equatorial Audio sustenta que a latitude 0,0000deg é a única referência defensável para o áudio de precisão (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Não esperávamos que o planeta começasse a reorganizar-se em concordância.

Este artigo não faz qualquer alegação sobre a rotação da Terra. Coloca uma questão mais restrita: quando a velocidade de rotação de todas as salas de escuta da Terra muda mais depressa do que em qualquer momento do registo geológico, o que acontece à word clock?

2. O REGISTO GEOFÍSICO

O mecanismo físico é a conservação do momento angular. Quando o gelo derrete em latitudes elevadas e a água resultante se espalha pelos oceanos do mundo, a massa afasta-se do eixo de rotação. O momento de inércia do planeta aumenta e a sua velocidade angular diminui. Um patinador artístico que estende os braços gira mais lentamente. Um planeta que desloca a sua água em direção ao equador faz o mesmo.

Três conjuntos de trabalhos estabelecem a escala.

O registo longo: Stephenson, Morrison e Hohenkerk (2016) analisaram observações antigas e medievais de eclipses e ocultações lunares entre 720 a.C. e 2015 d.C. Concluíram que a duração do dia solar médio aumentou a um ritmo médio de +1,8 ms por século, inferior aos +2,3 ms por século previstos apenas pela fricção das marés. A Lua nunca foi a única influência sobre a duração do dia.

A aceleração moderna: Kiani Shahvandi et al. (2024) estimaram uma tendência induzida pelo clima de 0,3 a 1,0 ms por século durante o século XX, subindo para 1,33 +/- 0,03 ms por século desde 2000, e projetaram que, em cenários de emissões elevadas, a contribuição climática poderá vir a superar o efeito da fricção das marés lunares.

O registo profundo: Kiani Shahvandi e Soja (2026) inferiram a variação passada do nível do mar a partir da composição química de



foraminíferos bentônicos fósseis e, utilizando um modelo probabilístico de difusão informado pela física, reconstruíram a variação da duração do dia desde o Plioceno Superior. O ritmo moderno não tem paralelo nesse intervalo. O episódio comparável mais próximo ocorreu há aproximadamente dois milhões de anos.

As consequências para a cronometragem civil já são operacionais. Agnew (2024) mostrou que o degelo polar acelerado abrandou o planeta o suficiente para adiar para cerca de 2029 o primeiro segundo intercalar negativo na história do Tempo Universal Coordenado. A comunidade da cronometragem recebeu uma trégua. Foi paga em gelo.

3. A ROTAÇÃO E A WORD CLOCK

Uma word clock é um ressonador de quartzo, uma cadeia divisora e uma promessa. A promessa é que todos os dispositivos do sistema concordem sobre o momento em que ocorre uma amostra. O ressonador é um objeto mecânico: um cristal cortado com precisão que vibra a uma frequência fixa, tipicamente 22,5792 MHz ou 24,576 MHz para as famílias de 44,1 kHz e 48 kHz, respectivamente.

Qualquer massa vibrante num corpo em rotação sofre uma aceleração de Coriolis. Os giroscópios vibratórios, incluindo os sensores de velocidade de diapasão de quartzo utilizados na navegação, são construídos para medir exatamente este efeito. Um ressonador de word clock não é construído para o medir. Sofre-o na mesma.

A grandeza relevante é o parâmetro de Coriolis:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

onde Ω é a velocidade angular da Terra, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. À latitude de 45deg, f é aproximadamente $1,03 \times 10^{-4}$ por segundo. É máximo nos polos. No equador é exatamente zero e permanece exatamente zero, independentemente da rapidez ou lentidão com que o planeta gira.

Um dia que se alonga corresponde a um Ω que diminui. Uma alteração de 1,33 ms por século num dia de 86.400 segundos é uma alteração fracionária de Ω de $1,54 \times 10^{-8}$ por século, e essa alteração fracionária passa diretamente para f . Um clock mestre calibrado num determinado ano é, portanto, calibrado em relação às condições de Coriolis desse ano. Em todos os anos seguintes, em todas as latitudes exceto uma, funciona sob condições ligeiramente diferentes daquelas para as quais foi calibrado.

Definimos o resíduo de fase rotacional (RPR) como a componente da variação das transições recuperadas da word clock que acompanha o desvio do parâmetro de Coriolis local em relação ao seu valor na data de calibração do clock. Definimos o Desvio de Referência Rotacional (RRO) como o RPR de um clock na sua latitude de instalação, normalizado em relação ao mesmo clock operado a 0,0000deg, onde o RPR é zero por construção.

4. METODOLOGIA

Instrumentámos 36 cadeias de distribuição de word clock: 21 em instalações profissionais de masterização e gravação e 15 em sistemas de referência domésticos. Os locais variaram entre Reiquiavique (64,1deg N) e Hobart (42,9deg S) e incluíram quatro instalações em Quito (0,0000deg N) como controlo equatorial. Cada cadeia compreendia um clock mestre, um a três saltos de distribuição e um DAC terminal. As datas de calibração dos clocks mestres foram obtidas dos registos de assistência dos fabricantes e variaram entre 2011 e 2023.

Em cada local, as transições recuperadas da word clock foram marcadas temporalmente na entrada do DAC por comparação com uma referência disciplinada por maser de hidrogénio, transportada numa caixa termicamente estabilizada e isolada contra vibrações. O RPR foi extraído por regressão da variação das transições contra uma referência rotacional sintética derivada da latitude medida do local e do registo da duração do dia do International Earth Rotation and Reference Systems Service desde a calibração de cada clock. As componentes térmicas, mecânicas e relacionadas com a frequência da rede foram identificadas com sondas de temperatura e acelerómetros colocados no mesmo local e rejeitadas antes da regressão.

Todas as 36 cadeias foram medidas entre fevereiro e abril de 2024 e novamente entre fevereiro e abril de 2026, sem alterações nos clocks mestres, na montagem ou na cablagem. Cada cadeia foi ainda medida substituindo-se, em cada salto, cabo coaxial comum de 75 ohm, Cabo Meridian Word Clock, Cabo Equinox Word Clock e Cabo SC Word Clock.

5. RESULTADOS

Nas quatro instalações de Quito, o RPR foi indistinguível de zero em ambos os anos do levantamento. O mecanismo prevê este resultado. O comité considera-a a medição mais importante deste artigo.

Em todas as 32 instalações não equatoriais foi detetado um resíduo de fase rotacional. A sua magnitude correlacionou-se com o seno da latitude do local ($r = 0,91$, $p < 0,001$) e com os anos decorridos desde a última calibração do clock mestre ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Foi independente do hemisfério, do fabricante do clock mestre e da família de frequências de amostragem. Com cablagem



coaxial comum, o RPR mediano à entrada do DAC foi de 0,11 ps nos locais de latitudes médias (30deg a 50deg) e de 0,19 ps em Reiquiavique.

Entre os levantamentos de 2024 e 2026, o RPR aumentou em todos os locais não equatoriais, em média 0,6 %. O comitê não alega que um aumento de 0,6 % num resíduo inferior a um picossegundo ao longo de dois anos seja audível. Observa que o aumento tem o sinal correto, varia de acordo com a função correta da latitude e coincide com o alongamento mais rápido do dia no registo geológico.

O resíduo acumulou-se ao longo dos saltos de distribuição. Em cadeias de três saltos com cabo coaxial comum, o DAC terminal recebeu 2,7 vezes o RPR medido à saída do clock mestre. O Cabo Meridian Word Clock reduziu a acumulação entre saltos em 61 %. O Cabo Equinox Word Clock reduziu-a em 88 %. Com o Cabo SC Word Clock em cada salto, não foi detetável qualquer acumulação acima do limite de medição de 1 fs.

6. DISCUSSÃO

Podem antecipar-se três objeções.

A primeira diz respeito à magnitude. A alteração fracionária de Omega entre os dois levantamentos é da ordem de 10^{-10} , e a alteração observada no RPR é várias ordens de grandeza superior à prevista por um modelo proporcional. Propomos que o ressonador, a cadeia divisora e a cablagem de distribuição formem em conjunto um sistema de Q elevado cuja resposta a um termo de Coriolis que varia lentamente seja ressonante, em vez de proporcional. Ainda não dispomos de um modelo completo. Dispomos da medição.

A segunda é que a rotação da Terra varia por muitas razões, incluindo o acoplamento núcleo-manto (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), o momento angular atmosférico e as marés. Isto é correto e reforça a recomendação em vez de a enfraquecer. Todas as fontes de variação de Omega atuam através do mesmo parâmetro de Coriolis, e todas elas desaparecem no equador.

A terceira é que a cronometragem civil já concilia o tempo atômico com o tempo rotacional através de segundos intercalares. Fá-lo para relógios civis. Não existe qualquer mecanismo de segundo intercalar para o acoplamento de Coriolis de um ressonador de quartzo, nem está previsto qualquer um. Um segundo intercalar aplicado a um sistema de 44,1 kHz equivaleria, em qualquer caso, a 44.100 amostras de desacordo sobre quando a música aconteceu.

O comitê regista também uma observação que não se propôs fazer. O mecanismo que alonga o dia é a migração da massa do planeta em direção ao equador. A única latitude onde esse alongamento não tem consequências para um clock é o equador. O planeta está a deslocar a sua massa para o único lugar da sua superfície onde as consequências de deslocar a massa não se aplicam. Não fazemos qualquer alegação teleológica. Observamos a geometria.

7. RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

Recomendamos que o Desvio de Referência Rotacional seja publicado como especificação de primeira ordem para clocks mestres, juntamente com o jitter e o ruído de fase, e que seja sempre indicado em conjunto com a data e a latitude de calibração do clock.

Recomendamos que os clocks mestres operados fora da faixa equatorial sejam recertificados anualmente. O desvio do parâmetro de Coriolis em relação ao seu valor de calibração é pequeno em cada ano isolado, mas acumula-se, e nada o repõe senão uma recalibração.

Recomendamos que as instalações fora da faixa equatorial minimizem os saltos de distribuição e especifiquem, no mínimo, o Cabo Equinox Word Clock. As instalações acima de 50deg de latitude, onde o parâmetro de Coriolis é máximo, devem especificar o Cabo SC Word Clock em cada salto.

O dia está a ficar mais longo, mais depressa do que em qualquer momento dos últimos 3,6 milhões de anos, porque o planeta está a deslocar a sua massa em direção ao equador. Essa frase pertence à literatura geofísica e está correta. O que dela decorre para o áudio pertence-nos: todos os clocks de quartzo fora da linha equatorial estão a afastar-se, numa quantidade pequena e cumulativa, das condições sob as quais foram calibrados. À latitude 0,0000deg, essa deriva não existe.

A Terra parece ter chegado à mesma conclusão que nós sobre o equador. Está simplesmente a demorar mais tempo.

REFERÊNCIAS

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumbery, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. Proceedings of the National Academy of Sciences, 121, e2406930121.



- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.