

MECANISMOS E CONSEQÜÊNCIAS DE UMA PERTURBAÇÃO DA CORRENTE DO GOLFO NUM CLIMA QUE SE AQUECE

Didier Swingedouw

A Corrente do Golfo (*Gulf Stream*) é a corrente oceânica quente que se encontra a leste da Flórida e sobe em direção às altas latitudes da Europa, atravessando todo o oceano Atlântico. Transporta uma energia colossal, cerca de 1 trilhão de watts, ou seja, mil vezes a produção mundial de energia. Esse transporte de calor para as altas latitudes influencia o clima que margeia o Atlântico Norte e faz com que dois pontos localizados na mesma latitude e, portanto, recebendo aproximadamente a mesma energia solar, um à margem oeste do Atlântico, outro à margem oeste do Pacífico, tenham temperaturas muito diferentes no inverno. Por exemplo, Bodö (67°N, Noruega) caracteriza-se por uma temperatura média de -2°C em janeiro, enquanto que Nomsk (65°N, Alaska) sofre com invernos bem mais rigorosos, com os termômetros apresentando a média de -15°C no mesmo mês. O aquecimento climático irá modificar as condições na superfície do oceano, o que poderá alterar a dinâmica da Corrente do Golfo e a maneira com que redistribui o calor para as latitudes médias do norte.

A Corrente do Golfo e a circulação termohalina

O último relatório do GIEC (*Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat*), datado de 2001¹, examinou a possibilidade de uma diminuição da Corrente do Golfo, sem conseguir obter consenso probatório sobre a questão. Muito trabalho foi feito depois, tendo progredido significativamente a avaliação da probabilidade, no futuro, de uma estagnação dessa corrente e das conseqüências climáticas associadas ao fato.

A Corrente do Golfo foi descoberta em 1513 pelo navegador Ponce de Leon. Entretanto, foi preciso esperar até 1777 para que Benjamin Franklin realizasse um estudo mais detalhado e traçasse o mapa da trajetória dessa corrente. Será apenas em meados do século XX que ficará esclarecida a sua origem física. Modelos simplificados de oceano mostram que a forçante do oceano sob a pressão do vento de superfície conduz a uma circulação superficial formada por várias células em rotação, de alguns milhares de quilômetros de diâmetro, chamadas de *giros*. Esses giros são assimétricos, por causa da força de Coriolis, ligada à rotação da Terra. Assim, no Atlântico, encontram-se um giro dito subtropical entre cerca de 15°N e 45°N, e um giro subpolar mais ao norte. O intercâmbio de massa e de calor entre esses dois giros é influenciado pelo que se denominou *circulação termohalina* (THC). Tal circulação, ligando superfície e profundidade, caracteriza a circulação oceânica de grande escala, que se encontra no conjunto do globo terrestre. Saliçada pelo americano Wallace Broecker², ele a compara a uma gigantesca esteira rolante tridimensional (figura 1). O nome de termohalina faz referência às forçantes térmica e halina (ligada à salinidade), que geram diferenças de densidade no oceano e que participam da dinâmica dessa circulação. A distribuição espacial da THC, com um transporte de calor em direção ao pólo no Atlântico Norte, em sentido contrário ao do Pacífico, é determinada pelos chamados pontos de convecção, que se encontram atualmente nos mares nórdicos e do Labrador e são caracterizados pela ocorrência do fenômeno de convecção hibernal devido ao resfriamento do oceano pela atmosfera. Tal convecção forma as águas densas que cobrem o fundo dos oceanos e que sobem graças à difusão em profundidade. Esse fenômeno de convecção é seguido de mergulhos das águas profundas que são formados sobre o declive oceânico, gerando, para a conservação do volume, uma atração das águas de superfície que compensam o transporte das águas

¹ CUBASH, U. et al. *Third assessment of climate change*. Chapter 8. In: Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

² BROECKER, W. The great conveyor belt. *Oceanography*, 4, 79-89, 1991.

de profundidade. Daí resulta, na superfície, um transporte de calor que aquece o clima das altas latitudes norte.

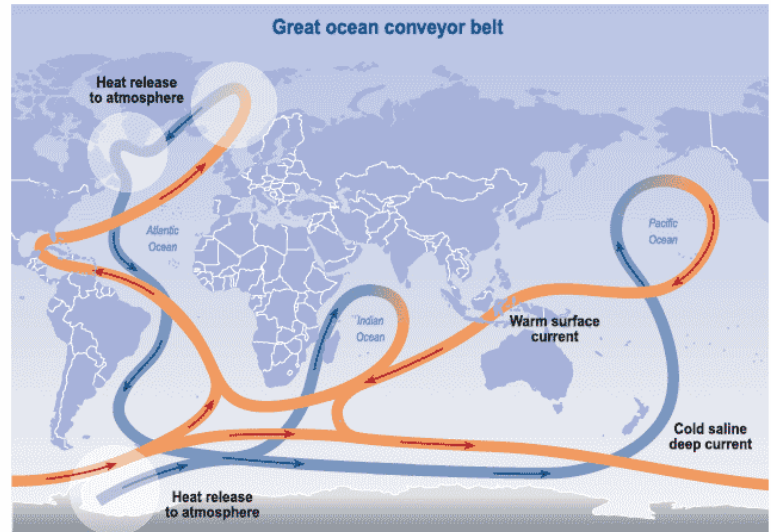


Figura 1: Esquema simplificado da circulação termohalina, comparada a uma enorme esteira rolante (GIEC, 2001). As correntes quentes de superfície estão representadas em vermelho, as correntes frias de profundidade aparecem em azul. Uma importante quantidade de calor é liberada pelo oceano em direção à atmosfera, no nível dos pontos de convecção (configurados pelos círculos), situados no Atlântico Norte e no mar de Weddel.

³ WUNSCH, C. What is the thermohaline circulation? *Science*, 298, 1179-1181, 2002.

Entretanto, como observou Carl Wunsch³, oceanógrafo americano de renome, a expressão termohalina pode prestar-se a confusão: não se trata de um motor térmico, o que significa que não é o gradiente de densidade que alimenta a circulação. O motor da THC é antes a difusão no oceano profundo, “puxando” as ondas de águas profundas que sobem e fazem funcionar a esteira rolante. Essa difusão é causada pela maré associada à forçante lunar, e pela turbulência ligada à forçante eólica, principalmente no nível dos “ventos rugidores” do paralelo 40 (*quarantième rugissants*) e dos “ventos uivantes” do paralelo 50 (*cinquantième hurlants*) no hemisfério sul. Assim, parece que o trabalho de 10^{12} W fornecido ao oceano sob estas duas formas resulta de um transporte de calor em direção ao norte, a 30°N , de ao menos 10^{15} W, o que demonstra a temível eficácia dessa máquina térmica. Mas, é preciso compreender bem que tais argumentos energéticos se aplicam ao que se chama de “regime permanente”, no sentido de que se considera que o tempo não intervém, e que a circulação termohalina teve todo o tempo para se manter em estado de equilíbrio.

Quando se sabe que no oceano o tempo de ajustamento para atingir esse equilíbrio é de 1.000 anos, compreende-se que o regime transitório, adequando-se a escalas temporais mais curtas, é mais pertinente para as causas humanas. Além disso, a distribuição espacial da THC, com um transporte de calor transequatorial em direção ao norte no oceano Atlântico, em sentido contrário ao do oceano Pacífico, está diretamente vinculada à presença de pontos de convecção nos mares nórdicos, em sentido contrário ao do Pacífico Norte.⁴

A distribuição espacial da THC e sua variabilidade entre decenal e secular, dependem assim da convecção nos mares nórdicos. Ora, esse fenômeno de convecção pode ser bastante afetado pela diminuição de densidade na superfície, associada a mudanças de temperatura e salinidade. Com efeito, um aumento de temperatura ou uma diminuição de salinidade atenuaria a densidade de superfície e poderia provocar uma parada da convecção e, portanto, do transporte de calor em direção às altas latitudes do Atlântico. A fim de melhor avaliar a possibilidade de tais mudanças, é conveniente analisar as variações da THC desde o passado e compreender melhor sua dinâmica.

O passado da Corrente do Golfo

A circulação termohalina pode ser reconstruída em climas do passado graças a marcadores radioativos. Historicamente, é a medição do carbono 13 em sedimentos que constituiu o primeiro marcador de intensidade da THC. As amostras marinhas obtidas por escavações no oceano Atlântico permitem conseguir informações sobre a intensidade da circulação oceânica no passado. A medição do carbono 13 nessas amostras evidencia que a THC sofreu numerosas variações.⁵ Tais avaliações foram confirmadas pelo par protactínio-tório, que se pode medir nas referidas amostras e que fornece dados mais precisos e quantitativos das variações passadas da THC. Assim, as diferentes medições mostraram que as numerosas oscilações climáticas observadas no último milhão de anos parecem estar claramente correlacionadas com variações da THC. Por exemplo, as ocorrências frias, ditas de Heinrich, parecem associadas a um desmoronamento de geleiras que poderia ter freado a THC, tornando-a mais lenta. Mais particularmente há 14.700 anos, houve o período chamado Dryas Recente. O clima saía de um período frio, conhecido como glaciário, tendo ocorrido a seguir um aquecimento de 10 graus em algumas

⁴ STOMMEL, H. & ARONS, A. B. On the Abyssal Circulation of the World Ocean. 2. An Idealized Model of the Circulation Pattern and Amplitude in Oceanic Basins. *Deep-Sea Research*, 6, 217-233, 1960.

⁵ DUPLESSY, J. C. Global ocean circulation and its past variations. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 657-666, 2004.

dezenas de anos, o que levou as enormes geleiras que se encontravam então na América do Norte a se derreterem, derramando uma quantidade colossal de água doce no oceano Atlântico.⁶ Assim, a THC parece ter sofrido uma lentidão importante, entre 12.800 e 11.600 anos atrás, o que teria gerado um resfriamento da Europa.⁷ Este episódio traz portanto à luz o vínculo existente entre THC e clima, mostrando que o elo não é só teórico, mas que pôde ser verdadeiramente observado no passado.

A duração do Dryas Recente foi de 1.200 anos. Quanto à duração do comportamento da TCH, não existe a mesma clareza, mas a escala temporal sustenta ter havido uma inércia provisória da THC, que teria em seguida recuperado sua normalidade. A THC ainda não havia sido observada devidamente, quando o oceanógrafo americano Henry Stommel (1920-1992) demonstrou, com um modelo analítico bastante simples, que essa circulação estava submetida a intensas ocorrências não-lineares, associadas ao efeito da salinidade sobre a densidade. Desse modo, provou que, para uma mesma forçante em água doce de superfície, poderiam existir dois momentos estáveis da THC, o primeiro com um transporte de calor em direção ao norte, o segundo sem este. Tal resultado teórico esteve em pauta no mundo científico desde que os modelos numéricos do oceano evidenciaram um fenômeno similar, com a possibilidade de numerosos estados estáveis sob determinadas condições de forçante em água doce. Recentemente, o climatólogo alemão Stefan Rahmstorf constatou, com modelos numéricos relativamente avançados, que esse fenômeno era bem consistente e aparecia na maior parte dos modelos que analisava.⁸ Uma integração de vários milênios é necessária para observar tais equilíbrios múltiplos, o que faz com que os modelos mais aperfeiçoados não possam participar da análise de Rahmstorf. No entanto, parece que alguns modelos mais complexos, levando em conta mais fenômenos associando oceano, atmosfera e gelos marinhos, com uma resolução espacial correta, não possuem equilíbrios múltiplos. Existem na verdade processos estabilizadores, frequentemente ligados à dinâmica atmosférica tropical⁹ ou às geleiras marinhas¹⁰, que permitem atenuar as diminuições da THC. Esse fato mostra a necessidade de modelos que abranjam todos esses elementos, o que não é o caso dos modelos utilizados por Rahmstorf. Há, portanto, em torno do tema, um debate que diz respeito à estabilidade da THC e que pressupõe questionamentos a longo prazo. Pergunta-se enfim se uma parada brutal da THC causada pela mudança

⁶ BOND, G. *et al.* Correlations between climate records from north Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365, 143-147, 1993.

⁷ McMANUS, J. F.; FRANÇOIS, R.; GHERARDI, J. M.; KEIGWIN, L. D. & BROWN-LEGER, S. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 428, 834-837, 2004.

⁸ RAHMSTORF, S. *et al.* Thermohaline circulation hysteresis: a model inter-comparison. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.

⁹ LATIF, M.; ROECKNER, E.; MIKOLAJEWICZ, U. & VOSS, R. Tropical stabilization of the thermohaline circulation in a greenhouse warming simulation. *Journal of Climate*, 13, 1809-1813, 2000.

¹⁰ HU, A. X.; MEEHL, G. A.; WASHINGTON, W. M. & DAI, A. G. Response of the Atlantic thermohaline circulation to increased atmospheric CO₂ in a coupled model. *Journal of Climate*, 17, 4267-4279, 2004.

climática seria quase irreversível. Para tentar responder à questão, um projeto de comparação de diferentes modelos, tendo por base o par oceano-atmosfera, correspondendo ao estado da arte no assunto, começou a ser elaborado recentemente.¹¹ O protocolo experimental consiste em impor uma perturbação em água doce, no Atlântico Norte, simulando um desabamento de geleiras por um período de 100 anos, interromper depois essa perturbação e observar se a THC retoma seu estado inicial ou faz perdurar um novo estado. Isso com o propósito de avaliar se a THC atual possui ou não dois estados estáveis, um ativo e outro inativo. Os resultados indicam que a maior parte dos modelos, não todos, recupera sua intensidade de origem. Logo, é preciso raciocinar em termos de probabilidades, para concluir que a THC atual parece ter pouca chance de ser portadora de dois equilíbrios estáveis no momento.

O futuro da THC

O novo exercício do GIEC expirará em 2007, mas os novos resultados já publicados, obtidos com os modelos associados de alta resolução evocados acima, trazem elementos para respostas quanto ao futuro da THC.

Primeiramente, todos os modelos apresentam uma diminuição da THC com diferenças apreciáveis referentes à amplitude dessa diminuição. Esta corresponderia em média a 25% somente, e nenhum dos modelos mostra estagnação total da THC em 2100.¹² Um outro resultado interessante reside no fato de que o maior fator de diminuição da THC seria o aquecimento climático direto, que, aumentando a temperatura dos oceanos, diminuiria a densidade em superfície das zonas de convecção, afetando os mergulhos já referidos. Embora esses modelos não levem em consideração o derretimento das geleiras, parece que estamos relativamente longe da ficção anunciada no filme *O dia depois de amanhã*. Também o impacto climático será bem mais modesto que o observado no filme hollywoodiano. O resultado principal que se depreende, tendo em vista que a diminuição da THC não provocará o resfriamento da Europa, é que seu efeito seria mais fraco que o aquecimento causado pelos gases de efeito estufa, podendo antes atenuar localmente, ao redor da bacia atlântica, o aquecimento global.

O esforço de observação do sistema Terra permite validar os modelos climáticos e referendar suas previsões. Observações sobre a salinidade no Atlântico Norte foram implementadas há meio século, apontando uma clara tendência

¹¹ STOUFFER, R. J. *et al.* Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *Journal of Climate*, 19, 1365-1387, 2006.

¹² SCHMITTNER, A.; LATIF, M. & SCHNEIDER, B. Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.

à baixa e assim legitimando o que predizem os modelos. A THC, por outro lado, revela-se muito complexa ao ser estudada, em razão de sua ramificação profunda. Foi preciso esperar até a última década para se estruturar um sistema de medições confiável. Há 40 anos houve algumas medições isoladas, mas a falta de resolução temporal limita as conclusões que se podem obter quanto a uma tendência de desaceleração da THC. Por conseguinte, será necessário aguardar ainda um pouco mais para saber se a THC já está começando a diminuir, como pretendeu talvez um tanto apressadamente Harry Bryden¹³. O oceanógrafo inglês mostrou, através de um jogo de medições muito curtas para realmente permitir conclusões, que a THC havia diminuído em 30% nos últimos anos. Ora, os modelos não apresentam no momento tal diminuição, que seria possível constatar apenas dentro de algumas décadas. Duas hipóteses podem explicar esse desacordo: 1) a amostra temporal de observações é efetivamente muito curta, e o que Bryden viu seria apenas uma oscilação interna do sistema cujo período de oscilação é da ordem da década; 2) os modelos não apresentam adequadamente certos processos amplificadores, ao nível da dinâmica oceânica ou então ao nível das forçantes oceânicas de superfície. A favor da segunda hipótese está o fato de que poucos modelos que participam do GIEC-2007 não computam o derretimento das geleiras. Entretanto, o descongelamento atual não é significativo para explicar por si só uma diminuição da THC. Por outro lado, existe o risco de o mesmo desempenhar um papel cada vez mais importante na medida em que o clima es quente ainda mais.

Com efeito, juntamente com uma equipe de pesquisadores franceses do LSCE (*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement* – CNRS), mostramos que o derretimento das geleiras poderá ter grande influência na diminuição da THC nos anos vindouros.¹⁴ Nossos resultados também indicaram que esse derretimento poderia levar o modelo a transpor um limite crítico e conduzir a THC a uma inércia total ao menos por 500 anos. Entretanto, nesse modelo, a suspensão do descongelamento da Groenlândia permitiria à THC retomar seu vigor de outrora, confirmando a análise precedente sobre a dupla estabilidade da THC. A perturbação antrópica, neste caso, teria um efeito inferior ao milenar, referente à THC. Mas as implicações de uma estagnação da THC seriam importantes do ponto de vista climático, criando uma diferença de temperatura próxima de 10 kelvin ao redor do mar de Barents, afetando assim o clima no nível das altas latitudes do norte.

¹³ BRYDEN, H. L.; LONGWORTH, H. R. & CUNNINGHAM, S. A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 degrees N. *Nature*, 438, 655-657, 2005.

¹⁴ SWINGEDOUW, D.; BRACONNOT, P. & MARTI, O. Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. *Geophysical Research Letters*, 33, 2006.

Conclusão

O futuro da THC sempre se apresenta como matéria de controvérsia, embora o aperfeiçoamento dos modelos tenha permitido limitar um pouco as incertezas. As observações a que foi submetida essa corrente marinha de grande escala também progrediram bastante nos últimos anos, porém, será preciso esperar ainda algum tempo para se obter resultados estatisticamente significativos. O futuro da THC tem gerado muitas inquietações, por sua acentuada não-linearidade e pela existência de um limiar preciso que conduz essa circulação a um freamento. Saber se a mudança climática pressionará a THC a ultrapassar esse limite é uma questão em aberto. Em caso afirmativo, as conseqüências seriam bastante complexas. A supressão da THC acarretaria o resfriamento da Europa, mas como o conjunto do mundo se aqueceria com rapidez, parece que o efeito acumulado desses processos antagonistas seria, mesmo em escala local, ligeiramente a favor dos gases de efeito estufa. Portanto, não se deve cair no catastrofismo exacerbado; a desaceleração da THC poderia de certo modo atenuar o aquecimento climático no Atlântico Norte. Contudo, perturbar os grandes equilíbrios climáticos vinculados ao oceano é um jogo perigoso que pode reservar surpresas. Uma mudança da THC poderia na verdade influenciar os trópicos, modificando o lugar das precipitações, o que traria prejuízos para os países implicados, em termos de abastecimento de água. Além disso, uma parada da THC teria conseqüências na bioquímica do oceano que afetariam suas frágeis cadeias tróficas.

Melhorar as previsões sobre o futuro da THC e analisar com precisão os riscos associados a uma diminuição dessa circulação oceânica constituem os desafios dos próximos anos, a fim de que nos preparemos melhor para a complexidade das transformações que estão por vir.

Didier Swingedouw é pesquisador do Laboratoire du Climat et de l'Environnement (CEA/CNRS), França.

Didier.Swingedouw@cea.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.