



Mudanças Climáticas e Teoria Dos Incentivos

Climate Change and Incentive Theory

Caio Antunes Costa Monteiro Chaves

Resumo: Investiga-se os desafios da cooperação internacional frente às mudanças climáticas a partir da ótica da teoria dos incentivos e do desenho de mecanismos. A análise parte da literatura sobre bens públicos globais e acordos ambientais internacionais. Revisita-se o modelo de Martimort e Sand-Zantman (2013), propondo uma modificação que incorpora externalidades positivas locais associadas ao esforço de mitigação. Demonstra-se que a inclusão dessa variável amplia o bem-estar tanto no cenário de *first-best* quanto no de ausência de coordenação, reduzindo o risco de *free-riding*. Além disso, examinam-se dois mecanismos alternativos, um sistema de comércio de permissões de emissão e um menu de dois tipos, que busca compatibilizar incentivos e ampliar a participação de países heterogêneos. Os resultados sugerem que mecanismos simples podem induzir maior cooperação internacional quando desenhados de modo a considerar as externalidades positivas locais, ainda que subsídios inferiores ao nível pigouviano ótimo sejam necessários para garantir adesão.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Teoria dos incentivos. Cooperação internacional. Externalidades.

Abstract: We investigate the challenges of international cooperation in addressing climate change through the lens of incentive theory and mechanism design. The analysis draws on the literature on global public goods and international environmental agreements. It revisits the model proposed by Martimort and Sand-Zantman (2013), introducing a modification that incorporates local positive externalities associated with mitigation efforts. The inclusion of this variable is shown to increase welfare both in the first-best scenario and in the business-as-usual setting, thereby reducing the risk of free-riding. Furthermore, two alternative mechanisms are examined, a tradable permits system and two-type menu mechanism, designed to align incentives and expand participation among heterogeneous countries. The results suggest that simple mechanisms can foster greater international cooperation when local positive externalities are taken into account, even though subsidies below the Pigouvian optimum may be necessary to ensure participation.

Keywords: Climate change. Incentive theory. International cooperation. Externalities.



1. Introdução

O Stern Review (2007)⁷, um relatório encomendado pelo governo britânico ao economista Nicolas Stern, argumenta, com base em critérios econômicos, que os benefícios de uma ação imediata contra as mudanças climáticas superam os custos da inação; considerando crucial o controle das emissões nas próximas décadas. O relatório demonstra uma situação ambiental global mais grave do que inicialmente se projetava, uma vez que as mudanças climáticas apresentam dinâmica exponencial e não linear. Esse fenômeno decorre, entre outros fatores, da liberação de gases poluentes aprisionados nas calotas polares. À medida que ocorre o derretimento dessas massas de gelo, tais gases são liberados na atmosfera, intensificando o ritmo das alterações climáticas.

Do ponto de vista econômico, a resolução desse problema demanda a formulação de acordos que sejam atrativos sob a perspectiva dos incentivos individuais, pois cada país busca maximizar sua própria função de bem-estar, e não uma função global. Dessa forma, caso os benefícios de determinada política não sejam percebidos como vantajosos em âmbito doméstico, dificilmente haverá adesão voluntária a ela.

Por se tratar de um problema de externalidades, alguns autores sugerem soluções fundamentadas no Teorema de Coase. No entanto, tais abordagens têm se mostrado inadequadas no contexto das mudanças climáticas. Isso ocorre porque os principais gases responsáveis possuem efeitos de caráter global: os benefícios de sua mitigação estão difusos entre todas as nações, de modo que o esforço isolado de um único país tem impacto marginal sobre a redução da poluição. Ademais, os direitos de propriedade, pressupostos pela abordagem coaseana, não estão claramente definidos nesse caso.

Alternativamente, mecanismos pigouvianos também se revelam pouco viáveis. A razão central é que os Estados nacionais são entidades soberanas: inexistente uma autoridade supranacional capaz de impor sanções ou tributar de forma coercitiva as emissões. Assim, o instrumento pigouviano encontra severas limitações práticas nesse contexto.

Diante disso, torna-se necessária a formulação de mecanismos auto executáveis. A auto execução é condição essencial, justamente porque não há uma instância central responsável pela aplicação de punições. As sanções, portanto, devem ser desenhadas de forma endógena ao próprio mecanismo.

Um exemplo de proposta nesse sentido é o mecanismo desenvolvido por Martimort & Sand-Zantman (2013) (de agora em diante, modelo MSZ), o qual servirá de referência para nossa análise. Pretende-se expandir tal arcabouço, de modo a investigar novas possibilidades. Antes, contudo, procede-se a uma breve revisão da literatura.

⁷ Acessado no “The National Archives”, do governo britânico. Link inserido a seguir: https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20100407172811/https://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm



Este artigo baseia-se no modelo MSZ, adicionando uma consideração para externalidades positivas locais. Na seção 2, faz-se uma revisão de literatura, comentando os principais artigos sobre o tema. Na seção 3, faz-se a nossa versão do modelo. Na seção 4, desenvolve-se como um simples mecanismo de mercado que responde à modificação de modelo. Similarmente, na seção 5, estuda-se como um contrato de dois tipos responde à mesma modificação. Finalmente, na seção 6, traz-se as conclusões e, na seção 7, as referências bibliográficas em que o trabalho foi baseado.

A modificação do nosso modelo comparado ao modelo MSZ foi pequena, porém não tem um impacto uniforme nos resultados. Enquanto alguns resultados permanecem iguais, outros apresentam diferenças não triviais. Além disso, nas conclusões que nossa alteração modifica, o componente ρ não aparece de forma direta simplesmente somando. Embora em alguns resultados o componente apareça somando, em outras aparece de forma quadrática. Com isso, podemos afirmar que os resultados não são de maneira algumas triviais, podendo serem considerados relevantes e dignos de serem levados em consideração.

2. Revisão de Literatura

Arrow e Fisher (1974) investigaram se a presença de incerteza influencia a utilidade esperada ao se proceder ao desmatamento de uma área destinada ao desenvolvimento econômico. Em particular, questionaram se a irreversibilidade da mudança geraria efeitos significativos. Tal questão decorre da própria natureza dos recursos ambientais, que são passíveis de esgotamento definitivo (seja pela sua completa extinção, seja pelo longo período necessário para sua recomposição). Dessa forma, ao desmatar uma floresta no presente, caso se pretenda usufruí-la novamente em condições equivalentes, seria necessário aguardar décadas ou até séculos.

Nesse contexto, a incerteza assume papel relevante na percepção de utilidade dos agentes. Em muitos casos, torna-se preferível adotar um ritmo mais lento de desenvolvimento, a fim de reavaliar, em momento posterior, se a exploração do recurso deve prosseguir ou não. Isso porque o valor do investimento tende a decrescer ao longo do tempo, em função da possibilidade de surgimento de alternativas, ao passo que o valor da preservação cresce em virtude da escassez. À medida que o recurso se torna mais raro, seu valor relativo aumenta.

Todavia, quando o dano causado é reversível, o efeito da incerteza não se manifesta com a mesma intensidade. No âmbito das mudanças climáticas e da poluição, observa-se que alguns efeitos podem ser revertidos, enquanto outros não. Um exemplo de efeito irreversível é o aumento do nível do mar, que ameaça permanentemente a sobrevivência de determinados países insulares. Nesses casos, a incerteza naturalmente reforça a disposição a pagar pela mitigação de emissões. Entretanto, conforme salientam Arrow e Fisher (1974), quando se agregam todos os países, esse “prêmio” adicional dos mais vulneráveis tende a ser diluído, perdendo utilidade prática para fins de acordos multilaterais.



A contribuição central de Krautkraemer (1985), por sua vez, foi demonstrar situações em que o valor da preservação pode, ao contrário, diminuir ao longo do tempo. O autor propõe a criação de amenities que atribuam valor econômico próprio às áreas preservadas, de forma que estas obtenham uma espécie de taxa de retorno. Todavia, tais amenities apenas efetivamente auxiliam na preservação quando há consumo associado a elas. Caso contrário, o desmatamento pode se revelar mais eficiente, ao apresentar valoração mais elevada. Essa conclusão, oposta à de Arrow e Fisher (1974), decorre do fato de Krautkraemer (1985) considerar que, embora os preços das commodities possam cair, o progresso tecnológico tende a elevar a produtividade, tornando, em alguns casos, mais lucrativo explorar completamente o recurso natural.

Não obstante, o autor sugere que a preservação ambiental pode ser assegurada mediante o uso de alternativas renováveis (como água e madeira) ou de tecnologias de substituição (como painéis solares). A existência dessas alternativas rompe a dualidade entre “consumir ou preservar” os recursos finitos, ao ampliar o conjunto de escolhas possíveis.

Buscando conciliar os resultados anteriores, Barrett (1992) desenvolveu um modelo no qual os achados de Arrow e Fisher (1974) e de Krautkraemer (1985) aparecem como casos particulares de uma formulação mais abrangente. O consumo passa a depender da taxa de progresso tecnológico na fronteira e nos setores já desenvolvidos (denominados Y e ω , respectivamente), além de uma constante σ , que converte a taxa de depleção inicial em uma taxa de consumo. O modelo também incorpora a elasticidade da utilidade marginal social do consumo (η) e a taxa de desconto pura do tempo (δ), que expressa o grau de impaciência da sociedade.

Com essa estrutura, Barrett evidencia as limitações dos modelos anteriores. Enquanto Arrow e Fisher (1974) tratavam o desenvolvimento como variável do tipo estoque (terra para agricultura), Krautkraemer (1985) o analisava como taxa (venda de madeira). Ao abarcar simultaneamente ambas as possibilidades, Barrett amplia a robustez da análise.

Por considerar a possibilidade de desenvolvimento como estoque, Barrett (1992) chega a conclusões menos pessimistas do que Krautkraemer (1985). Isso porque a taxa de progresso tecnológico (e o consequente aumento da produtividade) impacta não apenas a exploração como taxa, mas também como estoque. Por exemplo, avanços tecnológicos na agricultura reduzem a necessidade de desmatamento para manter a produção de alimentos, permitindo que o capital desenvolvido sustente o consumo futuro sem esgotar completamente o recurso primário.

Assim, o modelo de Barrett (1992) apoia e expande as conclusões de Arrow e Fisher (1974), ao demonstrar que a preservação pode ser socialmente ótima em uma gama muito maior de situações do que se supunha inicialmente.

O autor ressalta, contudo, que o futuro dos recursos naturais não depende apenas de fatos objetivos, mas também de valores éticos das sociedades em questão. Como não é viável atribuir estimativas confiáveis a parâmetros como η e δ , o modelo reconhece suas limitações. Longe de ser um ponto negativo, essa constatação revela-se uma contribuição relevante, pois permite



distinguir claramente os aspectos normativos dos positivos, favorecendo a análise em suas esferas adequadas.

Outro artigo fundamental para a literatura de modelagem climática é o de Carraro e Siniscalco (1993). Nesse estudo, os autores definem formalmente as condições de estabilidade de coalizões e demonstram como tais coalizões podem ser expandidas por meio de transferências e garantias. O objetivo central é superar uma limitação recorrente da literatura: a exigência de participação universal para a eficácia dos acordos.

Os autores mostram que uma coalizão estável pode ser ampliada mediante transferências a países não participantes, desde que exista algum tipo de garantia. Essa garantia se faz necessária porque a transferência realizada pelos países participantes, na forma de uma taxa T , reduz proporcionalmente o bem-estar deles, criando incentivo à evasão da coalizão. Portanto, torna-se imprescindível assegurar mecanismos que previnam tal instabilidade.

Apesar da incerteza inerente, o artigo demonstra que há possibilidade de expansão da coalizão, inclusive até que todos os países se tornem signatários, desde que a coalizão inicial seja suficientemente ampla. Caso contrário, a taxa T se tornaria excessiva, inviabilizando a adesão.

Um achado notável do estudo é que o aquecimento global não deve ser entendido como um dilema do prisioneiro, conforme sugerido pela “tragédia dos comuns” de Hardin (1968), mas sim como um jogo da galinha. Nesse enquadramento, os países buscam evitar excessos na exploração, de modo que todos se beneficiam quando outro país decide colaborar. Assim, mesmo aqueles com menor incentivo para participar possuem interesse em estimular a adesão alheia.

O artigo formaliza esse raciocínio com um jogo no qual cada país se beneficia quando outro decide ingressar na coalizão. A estrutura de incentivos leva a desigualdades que tornam a não cooperação menos atrativa, enfraquecendo a tese de que a tragédia dos comuns seja inevitável.

No artigo, o jogo é demonstrado da seguinte maneira:

Tabela 1 - Acordos climáticos como um jogo da galinha.

		País h	
		Colaborar	Não colaborar
País i	Colabora	$P(j+1), P(j+1)$	$P(j), Q(j)$
	Não colaborar	$Q(j), P(j)$	$Q(j-1), Q(j-1)$

Considerando o jogo acima em que $P(j+1)$ é o payoff do país X (h ou i) quando ambos os países colaboram. $P(j)$ é quando apenas um deles colabora. $Q(j)$ é o payoff que ele recebe quando o outro país participa, mas ele não, e $Q(j-1)$ é quando nenhum dos dois participam. Sabemos que,



como mostrado ao longo do artigo, não há incentivo para sair do acordo após entrar nele, e o país i ganha quando o país h entra no acordo (e vice-versa). Desse modo, cada país tem incentivo para deixar outro país participar da coalizão, pois o mesmo ambiente é usado por ambos. Formalmente, temos a seguinte desigualdade, do ponto de vista de cada país: $Q(j) > P(j+1) > P(j) > Q(j-1)$. Por isso, a não-cooperação não é a estratégia dominante no jogo.

Além disso, a tragédia mencionada na Tragédia dos Comuns, só ocorreria se a resposta dos países a uma diminuição na poluição dos outros países fosse de desmatar mais. Entretanto, os autores supõem que, na verdade, quando se trata de emissões de gases de efeito estufa (que são os fins do trabalho em questão, pois são os principais contribuintes para a mudança climática), a função de melhor-resposta dos países provavelmente é ortogonal ou quase-ortogonal. Isso significa que o problema carona é menor, pois os “caroneiros” apenas usufruem da diminuição de poluição, sem aumentar as suas emissões como contrapartida.

Helm (2003) analisa o efeito da negociabilidade das cotas de emissão sobre a decisão dos países quanto ao volume de cotas desejado. Antes de prosseguir, o autor destaca duas limitações de seu modelo: (i) pressupõe a existência de uma autoridade central para a determinação das cotas; (ii) exige a concordância unânime de todos os países para a participação.

A literatura até então interpretava que alguns países adotaram cotas menores no Protocolo de Quioto devido à possibilidade de comercialização. O modelo confirma essa hipótese: países mais preocupados com as emissões aceitaram cotas menores, contando com a possibilidade de trocá-las posteriormente; já países menos preocupados receberam mais cotas, vislumbrando benefícios com a venda. O autor menciona Rússia e Ucrânia como exemplos dessa dinâmica.

O estudo evidencia efeitos paradoxais: em algumas situações, a utilidade dos países aumenta com a negociação de cotas, mas as emissões globais também crescem. Helm demonstra que, no regime sem trocas, duas ineficiências surgem: (i) nível excessivo de poluição, já que cada país maximiza isoladamente sua utilidade; (ii) custos globais superiores ao necessário, em razão da heterogeneidade dos benefícios marginais entre países. O regime com trocas busca resolver a segunda ineficiência.

No jogo modelado, nenhum país possui incentivo unilateral para alterar a quantidade de quotas escolhidas, de modo que não há necessidade de que os acordos sejam vinculantes. Parte-se da suposição de que os países efetivamente cumprirão suas quotas, e que aqueles que venderem permissões não poderão fazê-lo sem efetivar a correspondente redução de emissões.

Como esperado, quanto maior a quantidade de quotas concedidas a um país, menor tende a ser o valor de cada uma delas e maior o nível de emissões. Ao maximizar o número de quotas antes das trocas, constata-se que a condição de um país ser vendedor ou comprador de permissões depende de sua função dano, e não de sua função benefício. Verifica-se ainda que os benefícios aumentam de acordo com o valor marginal de cada quota, dependente do preço estabelecido no mercado.



O resultado central é que o incentivo para um país com alto nível de dano ambiental escolher menos quotas é maior quando há possibilidade de trocas, uma vez que seu benefício marginal cresce mais lentamente do que no regime sem negociação.

Outro resultado relevante é que, como mencionado anteriormente, as emissões de equilíbrio em um regime com trocas podem superar aquelas de um regime sem trocas, se o benefício marginal dos países altamente danosos diminuir menos do que aumentar o benefício dos países compradores após a negociação.

O autor também observa que o incentivo para solicitar quotas iniciais adicionais é maior no regime com comércio, pois a queda no preço de mercado das permissões (efeito sobre o benefício marginal) é relativamente pequena. Isso ocorre porque parte das quotas extras pode ser absorvida por outros países via mercado internacional, diluindo o impacto no preço. Já no regime sem comércio, todo o efeito da emissão adicional recai sobre o próprio país, reduzindo de forma direta seus ganhos marginais.

Essa diferença ajuda a explicar por que países com baixos danos ambientais tendem a solicitar quotas em excesso quando há possibilidade de comércio, fenômeno conhecido como *hot air*, observado no contexto do Protocolo de Quioto.

Além disso, três efeitos determinam se um país estará melhor com trocas. Primeiro: o efeito do dano ambiental, que avalia como as emissões totais impactam o bem-estar nacional. Se o nível de poluição com trocas for menor do que sem trocas, há ganho ambiental. Segundo: a eficiência de ganhos da troca. Refere-se ao balanço entre os benefícios ou perdas decorrentes de comprar ou vender quotas em comparação com os ganhos advindos da poluição. E, terceiro, o lucro político-estratégico, que resulta da escolha estratégica de permissões, maior ou menor, em regimes com e sem comércio. Países capazes de vender mais quotas podem auferir ganhos, mesmo que a poluição total aumente.

Com base nesses efeitos, o autor formula a Proposição 4: quando os países escolhem quotas de forma não cooperativa em um regime com trocas, pode-se alcançar maior bem-estar e menores níveis de poluição do que no equilíbrio de Nash do regime sem comércio. Contudo, se as negociações implicarem queda nas emissões, alguns países podem rejeitar o acordo por perceberem redução em seu bem-estar individual. Assim, ainda que as emissões globais aumentem, é possível que todos os países aceitem o regime de trocas por este elevar seus ganhos individuais. Em suma, a decisão dos países é pautada prioritariamente pelo bem-estar doméstico, e não pelo impacto ambiental agregado.

Essa proposição explica por que o sistema de trocas pode funcionar em contextos de escolha descentralizada de quotas. Entretanto, também esclarece por que especialistas permanecem céticos quanto à eficácia desses arranjos, uma vez que eventuais quedas de bem-estar individual limitam a adesão.



De forma agregada, os resultados ajudam a interpretar fenômenos como o excesso de quotas solicitado por Rússia e Ucrânia e a não participação dos Estados Unidos. No caso norte-americano, como país altamente vulnerável a danos ambientais, o bem-estar esperado diminuiria sob o regime de trocas. Ainda assim, admite-se que, de modo geral, o Protocolo de Quioto pode ter contribuído para a redução das emissões.

Helm e Wirl (2011) apresentam como principal contribuição um modelo em que os efeitos multilaterais da poluição desempenham papel central na estrutura de incentivos dos acordos ambientais internacionais. Enquanto os modelos tradicionais supõem que o Principal (país ou bloco negociador) dispõe apenas de instrumentos monetários para incentivar o Agente (outros países), os autores demonstram que o Principal pode, adicionalmente, utilizar a redução de suas próprias emissões como instrumento de incentivo.

Esse mecanismo encontra respaldo empírico: conforme destacam, a União Europeia se dispôs a ampliar sua meta de redução de emissões de 20% para 30% (em relação aos níveis de 1990 até 2020), desde que outros países altamente emissores também se comprometessem a esforços proporcionais. Assim, reduções unilaterais assumem caráter estratégico, funcionando não apenas como contribuição direta, mas também como estímulo à cooperação internacional.

Os resultados do modelo indicam que o Principal pode, de fato, usar sua própria redução de emissões como incentivo eficaz. Ademais, esse arranjo permite revelar o tipo do Agente, isto é, sua preferência privada em relação ao abatimento de poluição. Agentes que atribuem maior valor a reduções ambientais estarão mais dispostos a aderir quando o Principal sinaliza maior comprometimento por meio de suas próprias ações.

Outro resultado relevante é que reduções unilaterais de emissões constituem incentivos mais eficazes do que subsídios monetários. A lógica é que tais reduções têm impacto direto sobre o nível global de poluição, gerando benefícios compartilhados e, ao mesmo tempo, pressionando os demais países a participarem para não ficarem em desvantagem relativa.

O modelo também mostra que o contrato ótimo aloca o abatimento de unidades de forma custo-eficiente, tanto em soluções interiores, quanto nas de canto. Quanto maior o custo marginal de abatimento do Principal em comparação ao Agente, mais “padrão” se torna o contrato, sendo necessário recorrer a subsídios positivos e crescentes, calibrados de acordo com o tipo do Agente.

Além disso, os autores identificam uma forma alternativa de implementação do contrato ótimo por meio de mercados de licenças de emissão. Esse resultado é particularmente relevante, pois tais licenças ocupam posição de destaque tanto nas políticas internacionais quanto nos modelos teóricos de economia ambiental.

Embora apresente contribuições significativas, o modelo de Helm e Wirl (2011) admite espaço para aprofundamentos. Extensões possíveis incluem: (i) maior equilíbrio na distribuição do poder de barganha entre os atores; (ii) a introdução de múltiplos agentes com diferentes



assimetrias informacionais; e (iii) a consideração de mais de dois participantes. Tais extensões, entretanto, aumentariam a complexidade do modelo, reduzindo sua transparência analítica.

Barrett (1994) discute como os acordos ambientais internacionais (doravante AAIs) necessitam ser autoexecutáveis para funcionarem de maneira efetiva. Tal exigência decorre da natureza soberana dos Estados: não há uma autoridade supranacional capaz de impor coercitivamente sanções ou obrigar o cumprimento de compromissos. Assim, os acordos devem ser desenhados de modo a fornecer incentivos para que os países não apenas ingressem, mas também permaneçam neles. Para explorar essas características, o autor apresenta dois modelos distintos.

O primeiro modelo estabelece que o número de países signatários, os termos do acordo e as ações dos não signatários sejam determinados de forma endógena. O mecanismo de incentivo/punição funciona da seguinte forma: quando um país decide se tornar signatário, todos os demais países signatários reduzem suas emissões adicionais. Por outro lado, quando um país abandona o acordo, os outros países elevam suas emissões em resposta. Dessa forma, cria-se um sistema de recompensas e punições automáticas, que deveria, em tese, estimular a adesão e desincentivar a saída.

Contudo, ao longo da análise, Barrett demonstra que as punições e recompensas previstas em tais arranjos dificilmente são suficientemente grandes para garantir a autoexecução do acordo. Ademais, em muitos casos, quando os países já possuem incentivos para cooperar, eles agiriam da mesma forma mesmo na ausência do acordo. Assim, o acordo apenas formalizaria uma situação que ocorreria espontaneamente, sem produzir efeitos adicionais relevantes.

Os acordos com maiores impactos costumam envolver três ou quatro participantes. Entretanto, nesses casos, o efeito positivo tende a ser anulado pela resposta compensatória dos países não participantes, que aumentariam suas emissões para contrabalançar os esforços da coalizão. Essa lógica pressupõe que a função de melhor resposta não seja ortogonal, como sugerem Carraro e Siniscalco (1993). Em acordos com número elevado de participantes, o efeito também tende a ser limitado: ou o acordo é pouco exigente, não provocando mudanças significativas, ou apenas ratifica práticas que já ocorreriam independentemente de sua existência.

O segundo modelo apresentado por Barrett (1994) é um jogo infinitamente repetido. Nesse caso, as punições tornam-se mais críveis, uma vez que a perspectiva de interações contínuas entre os países aumenta o custo do descumprimento. Todavia, esse modelo apresenta limitações importantes: não determina endogenamente o número de signatários, nem os termos contratuais, tampouco as ações dos não signatários. Além disso, como as punições que sustentam a cooperação máxima podem ser vulneráveis a renegociação, a autoexecução ainda não é plenamente assegurada.

Apesar das restrições, o modelo de jogo repetido fornece uma ferramenta útil para calcular o número máximo de países que apoiariam o resultado de cooperação plena. O resultado obtido por Barrett é que, embora seja possível alcançar AAIs com grande número de signatários comprometidos com a cooperação máxima, isso só ocorre quando a diferença entre os



benefícios globais da cooperação e os do não cooperar é relativamente pequena. Quando essa diferença é grande, a cooperação máxima não pode ser sustentada por um AAI autoexecutável.

No plano prático, Bradford (2005) propõe um modelo alternativo ao Protocolo de Quioto. Nessa proposta, em contraposição à determinação arbitrária do volume total de licenças de emissão alocadas a cada país, as nações receberiam licenças suficientes para manter seus níveis de emissão correspondentes ao melhor uso alternativo (*best alternative use* ou *BAU*). A partir desse ponto inicial, negociar-se-iam progressivas reduções dessas licenças, à medida que novas metas fossem sendo estabelecidas. Tais reduções seriam financiadas por um fundo internacional, constituído no âmbito do acordo.

Denominado Global Public Good Purchase (GPGP), esse modelo apresenta duas vantagens principais em relação ao sistema de cap and trade adotado pelo Protocolo de Quioto. A primeira reside na simplificação operacional: como as reduções são custeadas monetariamente, a adesão de cada país torna-se voluntária. Desse modo, em lugar de impor metas específicas de emissão a cada signatário, como em Quioto, o acordo GPGP estabelece uma meta global e explícita a disposição de pagamento, via fundo, para seu atingimento. Consequentemente, a implementação efetiva fica condicionada às decisões individuais de cada nação.

A segunda vantagem consiste na transparência no financiamento do bem público global: neste caso, a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O ônus financeiro deixa de estar implicitamente embutido em metas específicas de emissão ou em compromissos com políticas e medidas, tornando-se explícito. Isso possibilita uma avaliação mais clara sobre quais agentes estão cumprindo suas respectivas parcelas de contribuição financeira. Adicionalmente, amplia-se a clareza a respeito do financiamento a ser recebido pelos países em desenvolvimento, potencialmente aumentando os incentivos para sua participação no regime.

A principal desvantagem do sistema proposto reside na indefinição a respeito dos critérios de contribuição para a composição do fundo internacional, isto é, quem contribuiria com qual montante. Dessa forma, o problema de *free-riding* permanece não resolvido. Outra limitação significativa é a necessidade de recalibrar constantemente as estimativas de *BAU*, uma vez que a alocação inicial de licenças é fundamentada nesse parâmetro.

Em síntese, o sistema em tese configura uma proposta prática para materializar e operacionalizar os direitos de propriedade associados à poluição, conferindo-lhes maior tangibilidade.

Cheikbossian & Sand-Zantman (2010) evidenciam a dificuldade inerente à manutenção de uma estratégia cooperativa quando os países são afetados por um choque comum, sob condições de informação imperfeita. Nesse contexto, amplia-se o escopo para a manipulação informacional, o que confere aos agentes envolvidos incentivos para despende um nível de esforço abaixo do ótimo social. Essa assimetria ocorre devido à impossibilidade de discernir se um resultado insatisfatório decorre do choque adverso ou do esforço inadequado de um determinado país.



Em contrapartida, quando os choques são não correlacionados entre as nações, a cooperação torna-se mais viável, uma vez que o esforço individual pode ser inferido com maior precisão a partir do produto de cada país. Consequentemente, na ocorrência de choques independentes, a existência de relações repetidas pode expandir o conjunto de resultados de equilíbrio cooperativo, desde que os países demonstrem um grau de paciência suficientemente elevado, o que é um resultado alinhado com as previsões do Teorema Folk da teoria dos jogos.

Chander & Tulkens (1995) demonstram, em seu artigo, a viabilidade de se alcançar um resultado eficiente na provisão do bem público global em um contexto de informação completa. Embora os autores recorram a pressupostos específicos para obter seu resultado, tais suposições não comprometem a robustez do modelo e são recorrentes na literatura da área. Um exemplo é a adoção de uma função de custo linear para os países. Conforme ressaltado no final do artigo, essa premissa é frequentemente aceita nos estudos do gênero, dadas as dificuldades inerentes à mensuração empírica dessas funções. Outra consideração é que o ótimo global pode distanciar-se significativamente da situação inicial vigente no começo das negociações. Para contornar esse obstáculo, técnicas econômicas têm sido desenvolvidas para orientar um movimento progressivo em direção ao ótimo por meio de passos sucessivos.

O argumento central dos autores sobre a proteção do modelo contra o *free-riding* (efeito carona) reside na necessidade de participação universal para o seu funcionamento. Caso um país ou um grupo de países optasse por não aderir à coalizão, com o intuito de usufruir dos benefícios sem arcar com os custos, a estabilidade do acordo seria comprometida, levando à sua dissolução. A ameaça credível de ruptura da coalizão é, portanto, apontada como um mecanismo suficiente para inibir comportamentos de carona.

O artigo evidencia a importância crucial de transferências monetárias para a estabilização e o bom funcionamento de acordos voltados para a redução de emissões, particularmente devido à existência de países com elevado custo marginal de abatimento e baixa preferência revelada por um ambiente limpo. As transferências funcionam como um incentivo indispensável para garantir a adesão dessas nações. No jogo modelado pelos autores, na ausência de tais transferências, não existe uma alocação de custos que seja individualmente racional e aceitável para todos os participantes. Ademais, em um hipotético cenário de países homogêneos, a construção de um sistema de transferências torna-se inviável, uma vez que não há assimetrias que justifiquem pagadores e receptores. Dessa forma, conclui-se que a necessidade de transferências emerge diretamente da heterogeneidade entre os países.

Por fim, os autores respondem a uma potencial crítica ética ao modelo, que opera sob um princípio em que a “vítima” (os países que mais valorizam a redução) compensa financeiramente o “poluidor” para obter um ambiente mais limpo, invertendo a lógica do princípio do poluidor-pagador. Argumentam, contudo, que essa estrutura é uma condição necessária para assegurar a cooperação voluntária e prevenir o *free-riding*, objetivos que representam um bem maior para a eficácia do acordo internacional.



Chander & Tulkens (1997) estabelecem a existência de um *core* (núcleo) de soluções para acordos que envolvem externalidades ambientais transnacionais, caracterizando-o como não vazio e operacionalmente útil. Para definir esse núcleo, a função característica do jogo deve incorporar o comportamento estratégico dos agentes que não integram a coalizão formada. Em resposta à literatura precedente, que argumentava ser o núcleo excessivamente amplo para ser de utilidade prática, os autores propuseram este marco teórico com o objetivo de pavimentar o caminho para desenvolvimentos futuros na área.

Geralmente, os modelos que demonstram a inexistência de um núcleo partem do pressuposto de que a reação dos países externos a uma coalizão constitui a pior resposta possível para os membros da aliança, ou que estes agem de forma a minimizar os ganhos da coalizão. Chander & Tulkens contestam a razoabilidade dessas suposições, argumentando que, uma vez que os benefícios da cooperação são desfrutados por todos os países, inclusive os não-participantes, sabotar a coalizão contradiria o princípio da maximização da utilidade individual desses agentes. Diante disso, os autores propõem um modelo alternativo no qual, após a formação de uma coalizão (S), os jogadores externos a S não agem de forma antagonista, mas sim maximizam suas respectivas utilidades individuais em resposta ao novo cenário estratégico. Essa estrutura resulta em um equilíbrio de Nash entre a coalizão S e os demais jogadores.

Uma vez demonstrada a existência do núcleo (cuja prova transcende o escopo desta revisão de literatura), os autores conseguem identificar as condições sob as quais uma estratégia de cooperação plena é viável, concluindo que a ameaça credível de dissolução da coalizão é um mecanismo suficiente para evitar o *free-riding*. Essa descoberta consolida e reforça os achados do trabalho anterior dos mesmos autores, publicado em 1995. O resultado introduz, assim, uma perspectiva otimista quanto à possibilidade de formação de uma coalizão global eficaz, em contraste com o ceticismo predominante na literatura especializada da época.

A interpretação oferecida pelos autores para seus resultados é a de que um acordo ambiental com cooperação integral e eficiência econômica é factível, ainda que não exista um equilíbrio de Nash forte ou um equilíbrio de Nash à prova de coalizões que seja Pareto-eficiente. Desse modo, a solução cooperativa por eles proposta não é apenas eficiente, mas também pode ser conceptualizada como o resultado de um equilíbrio de mercado no qual cada país atua racionalmente. O modelo proposto mostra-se, portanto, formalmente equivalente a um equilíbrio de Lindahl para a provisão de bens públicos globais.

Baliga e Maskin (2003) contribuem significativamente para a literatura ao propor mecanismos formais destinados a resolver problemas associados às mudanças climáticas. Os autores iniciam sua argumentação demonstrando a inviabilidade de uma solução estritamente baseada na abordagem de Coase, uma vez que as mudanças climáticas constituem uma externalidade global que afeta todos os países. Essa natureza do problema intensifica os incentivos ao *free-riding* (efeito carona). Uma vez que a deserção de um único país do esforço coletivo acarreta uma redução marginal no benefício total, cada agente possui um incentivo individual para permanecer fora da coalizão, usufruindo dos benefícios de um ambiente mais limpo sem incorrer nos custos correspondentes.



Ao longo do artigo, os autores desenvolvem e analisam mecanismos sob condições de informação completa e informação assimétrica. Contudo, uma limitação proeminente de suas propostas reside no modelo de punição adotado, o qual pressupõe a existência de uma autoridade central coercitiva, negligenciando, assim, a complexidade inerente à soberania nacional e à ausência de um governo global.

Ademais, Baliga e Maskin exploram as implicações do requisito de monotonicidade das preferências. Eles argumentam que, embora essa propriedade possa parecer inicialmente desejável, sua imposição em mecanismos de escolha social conduz inevitavelmente a resultados ditatoriais quando o conjunto de alternativas (Y) contém três ou mais opções. Esse resultado, alinhado com o Teorema de Gibbard-Satterthwaite, estabelece que qualquer função de escolha social monotônica e com domínio universal será necessariamente ditatorial, privilegiando as preferências de um único agente sobre as demais. Consequentemente, se o objetivo é implementar políticas ambientais simultaneamente eficientes e equitativas, torna-se impraticável depender, exclusivamente, de mecanismos operados por estratégias dominantes, dada a sua natureza excessivamente restritiva.

Como alternativa, os autores sugerem que a adoção do equilíbrio Bayesiano de Nash permite relaxar tais requisitos, oferecendo um framework mais flexível e realista para implementar funções de escolha social que sejam tanto eficientes quanto justas, viabilizando assim acordos cooperativos em contextos de informação imperfeita.

3. O Modelo

O modelo original de Martimort & Sand-Zantman (2013) (MSZ, de agora em diante), é o seguinte:

$$U = t_i + \alpha e_i + (1 - \alpha)\varepsilon - \frac{e_i^2}{2\theta_i}.$$

Assume-se que o mundo é populado por um contínuo de países de massa unitária. Esses países, caso queiram mitigar suas emissões de poluentes, podem fazer um esforço específico. Mais precisamente, é assumido que o esforço e_i exercido pelo país i gera tanto benefícios locais, de magnitude αe_i , quanto benefícios globais, no valor de $(1 - \alpha)e_i$, que se distribuem mundialmente. O parâmetro “ α ” representa a magnitude das consequências locais de esforço para diminuir a poluição, com $\alpha \in [0,1)$. Uma justificativa alternativa e mais ampla é que a implementação de uma política restritiva e_i impacta negativamente a produção e o bem-estar locais, de modo que o valor local do aumento de esforço é inferior ao valor social. Como o país maximiza a utilidade levando em conta os esforços globais agregados, $(1 - \alpha)e_i$ torna-se $(1 - \alpha)\varepsilon$, sendo $\varepsilon = \int e_i$.



Para modelar heterogeneidade, é criado o parâmetro de eficiência θ , de modo que o custo do país de tipo i pode ser representado como: $C(e_i, \theta_i) = \frac{e_i^2}{2\theta_i}$. Esse custo deve ser entendido num sentido amplo, incluindo não só custos tecnológicos, mas também custos de oportunidade (como crescimento não realizado ou articulação política).

Cada país i tem informação privada sobre seu parâmetro de eficiência θ_i , e seu esforço em mitigar a poluição é observável. Como os θ_i não são apenas custos tecnológicos, mas também custos de oportunidade, assumir informação privada é coerente. De modo similar, assumir que o esforço é observável parece coerente com a situação atual, em que novas tecnologias (como observação por satélite) permitem um controle preciso do comportamento de cada unidade de poluição.⁸

Ademais, t representa a transferência monetária que o país recebe (ou envia) no mecanismo. Essa transferência não é esforço nem benefício ambiental direto, mas um pagamento do tipo *lump-sum* que entra na utilidade do país. Portanto, trata-se de um subsídio cruzado.

Os parâmetros de eficiência θ_i são extraídos de forma independente da mesma função de distribuição acumulada $F(\cdot)$, com suporte $\Theta = [\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ (sendo $\underline{\theta} > 0$) e uma densidade $f(\theta) = F'(\theta)$, em todo lugar positiva e sem átomos. Denota-se por $E_\theta(\cdot)$ o operador de esperança em relação a θ . Por razões técnicas, também é assumido que a seguinte condição de monotonicidade vale:

$$\frac{d}{d\theta} \left(1 - F(\theta) \frac{\theta f(\theta)}{f(\theta)} \right) \leq 0 \quad \forall \theta \in \Theta \quad (1)$$

Como resultado do modelo MSZ, ao maximizar a função de utilidade do país i , obtemos $e^{FB} = \theta$. Assim, ao substituir tal valor na mesma função de utilidade, o nível global resultante é simplesmente $W^* = \frac{E_{\bar{\theta}}(\bar{\theta})}{2}$. Enquanto isso, no cenário *BA*, em que os países deixam de internalizar o efeito de seus esforços no bem-estar total, obtemos $e_N = \alpha\theta$ e $W_N = \frac{E_{\bar{\theta}}(\bar{\theta})}{2} \alpha(2 - \alpha) < W^*$. Esse resultado é encontrado ao maximizarmos a seguinte função de utilidade:

$$\arg \max_e a e - \frac{e^2}{2\theta} + (1 - \alpha) E_{\bar{\theta}}(e_N(\bar{\theta})) .$$

Propomos uma simples alteração no modelo. O modelo MSZ associa diretamente os benefícios do esforço com os efeitos que ele tem em diminuir a poluição (ou seja, α). Entretanto, nos

⁸ O artigo original cita Tirole (2008) e D'Albis (2010) a respeito dessa possibilidade.



perguntamos se a forma como o esforço é feito também não geraria outros benefícios para além da queda de poluição, na forma de externalidades locais positivas.

Como exemplo podemos citar os ganhos esperados ao preservar o meio ambiente no sentido de Arrow & Fischer (1974), caso a preservação florestal seja a forma escolhida para diminuir a emissão. Entretanto, pode-se considerar diversas outras formas: pode haver avanços tecnológicos ou doações tecnológicas, que, também, por si só, já são benéficas para o país. Consideramos também a possibilidade de haver benefícios associados à popularidade do candidato ou partido político em caso de regimes democráticos em que os eleitores valorizem preservação ambiental e o combate à mudança climática.

Desse modo, propomos neste trabalho a adição de um componente ρ , que pode ser interpretado como uma externalidade local positiva. Tal componente aumenta o nível de bem-estar como uma fração adicional do esforço incremental do país para além da fração α que ele consegue incorporar, pois passa a ser $(\alpha + \rho)$. Esse impacto é de natureza não alocativa. Além disso, como e_i passa a multiplicar $(\alpha + \rho)$, a soma dos coeficientes fica maior do que 1. Desse modo, além da parcela α inicialmente interiorizada pelo país i , sendo o resto dissipado para o resto do mundo na forma de $(1 - \alpha)\varepsilon$, o país passa a usufruir uma porção adicional ρ de seu esforço, o que representa uma externalidade positiva.

Então, apesar de o α incorporar os benefícios locais no modelo original, não o faz na forma de externalidade, pois o resultado do esforço agregado está sendo distribuído entre os agentes dessa economia mundial. Como, enquanto o país i usufrui de uma fração α , uma fração $(1 - \alpha)$ é distribuída para o resto do mundo, o benefício do esforço agregado é distribuído igualmente, de modo que o esforço de uma unidade gera o benefício de uma unidade. Quando introduzimos o ρ , geramos uma externalidade positiva.

Formalizando esse pensamento, o modelo proposto é o seguinte:

$$U_i = t_i + \alpha e_i + (1 - \alpha)\varepsilon - \frac{e_i^2}{2\theta_i} + \rho e_i,$$

sendo a explicação para as variáveis as mesmas aplicadas ao modelo de MSZ. A esse modelo, acrescentamos apenas ρe_i para capturar o efeito de externalidades positivas locais, como explicado acima.

Por questões técnicas, mantemos a condição de monotonicidade usada no modelo MSZ, explicada em (1).

Para acharmos a utilidade global (ϕ) do nosso modelo basta resolvermos a integral de U para todo i .

$$\phi = \int U_i di = \int \left(t + \alpha e_i + (1 - \alpha)\varepsilon - \frac{e_i^2}{2\theta} + \rho e_i \right)$$



$$= \int e_i - \frac{e_i^2}{2\theta_i} + \rho e_i$$

$$= \int_{\theta} \left(e(\theta) - \frac{e(\theta)^2}{2} + \rho e(\theta) \right) f(\theta) d\theta$$

Maximizando-a com respeito a e , para acharmos o esforço que maximiza a utilidade (e^{FB}):

$$\frac{d}{de} \left(e_i - \frac{e_i^2}{2\theta_i} + \rho e \right) = 1 - \frac{e}{\theta} + \rho = 0.$$

Portanto,

$$(1 + \rho)\theta = e^{FB} \quad (2)$$

Desse modo, podemos concluir que há uma distorção causada pela variável ρ , ao compararmos nosso e^{FB} com o de MSZ, que era simplesmente θ . Esse resultado representa que os países consideram os possíveis benefícios advindos de externalidades positivas locais ao maximizar suas utilidades.

Agora, precisamos calcular o bem-estar global nessa nova situação. Para isso, substituímos $e^{FB} = (1 + \rho)\theta$ na utilidade global (ϕ) do nosso modelo.

$$w^* = \int \left((1 + \rho)\theta - \frac{(1 + \rho)^2 \theta^2}{2\theta} + \rho(1 + \rho)\theta \right) f(\theta)$$

$$w^* = \int \frac{(1 + \rho)^2}{2} \cdot \theta \cdot f(\theta) d\theta$$

Como $\int \theta f(\theta) d\theta = E[\theta]$, temos que o bem-estar global W^* vale:

$$W^* = \frac{(1 + \rho)^2}{2} \cdot E[\theta] \quad (3)$$

Esse resultado nos diz que a valoração da externalidade positiva local aumenta de forma quadrática, para todo valor positivo. Portanto, é relevante considerarmos a influência desse fator na maximização de utilidade e na formulação de contratos.

Agora, investiguemos o cenário *BAU*. Nesse cenário, cada país maximiza apenas a sua utilidade sem considerar a ação dos outros países, e não internalizam o impacto de seus próprios esforços no bem-estar global. Por isso, os esforços são menores.

Para encontrar o esforço *BAU*, o país maximiza a seguinte utilidade:



$$arg\ arg - \frac{e^2}{2\theta} + e\rho + (1 - \alpha)E_{\tilde{\theta}}(e_N(\tilde{\theta})) ,$$

de modo que agora:

$$e_N = (\alpha + \rho)\theta. \quad (4)$$

A maximização do bem-estar global no *BAU* resulta em:

$$W_N = E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) \left((\alpha + \rho) - \frac{(\alpha + \rho)^2}{2} \right) \quad (5)$$

Como podemos ver, a distância entre o esforço *BAU* e o esforço ótimo (FB) é naturalmente decrescente em α . No caso degenerado e não realista de $\alpha = 1$, o *BAU* é eficiente. Concluímos que quanto mais local for o impacto da política ambiental, menor é o risco de *free-riding*. Entretanto, comparado ao modelo original MSZ, vemos que inserir a variável ρ tornou maior tanto o bem-estar social no FB quanto no *BAU*.

A tabela 2 evidencia as alterações causadas pela adição do termo ρ .

Tabela 2 – Comparação entre os principais resultados da seção 3 com os resultados do modelo MSZ.

	Modelo MSZ	Nossa alteração
e^{FB}	θ	$(1 + \rho)\theta$
W^*	$\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{2}$	$\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{2} (1 + \rho)^2$
e_N	$\alpha\theta$	$(\alpha + \rho)\theta$
W_N	$\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{2} \alpha(2 - \alpha) < W^*$	$\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{2} (\alpha + \rho)(2 - \alpha - \rho)$

Observe que o nível de esforço no modelo original é apenas θ , mas aqui aparece multiplicado por $(1 + \rho)$. Desse modo, a alteração não é trivial. De fato, vemos mudanças no esforço de *first best* em relação ao modelo MSZ.

A mudança se torna ainda mais aparente e difícil de se ignorar ao compararmos o valor de W^* , que passa a ser multiplicado por uma função quadrática. A existência de um aumento de bem-



estar desse nível não pode ser ignorada, pois incorpora o *pay-off* do país i , podendo ser um fator determinante para a sua participação em um acordo ambiental, ou não.

4. O Contrato

Nesta seção investigamos a performance de um mecanismo de mercado simples que permite aos países trocarem entre si seus direitos à emissão. Por se tratar de um modelo com informação assimétrica, é vital investigar tanto as propriedades dos incentivos, quanto a participação gerada por tal mecanismo.

No mecanismo, por simplicidade, os direitos são distribuídos de forma uniforme. Esse valor comum será chamado de E_0 . Ignora-se como é distribuída a quantidade inicial de direitos à emissão de cada país.

Assim, um país de tipo θ quer realizar trocas de seus direitos a poluir de forma a maximizar a seguinte expressão:

$$U_0(\theta, p, E_0) = \alpha e + P(e - E_0) + (1 - \alpha)\varepsilon_0 - \frac{e^2}{2\theta} + e\rho,$$

em que $\varepsilon_0 = E_{\tilde{\theta}}(e(\tilde{\theta}))$ denota o nível geral de abatimentos global e $e(\tilde{\theta})$, o nível de esforço de equilíbrio exercido por um país de tipo θ nesse cenário. Ao maximizarmos a expressão acima, encontramos esta expressão de demanda por direitos:

$$e(\theta, p) = (\alpha + p + \rho)\theta. \quad (6)$$

Quando igualamos $E_{\tilde{\theta}}(e(\tilde{\theta}, p_0)) = E_0$, que é a condição de equilíbrio de mercado, achamos:

$$p_0 = \frac{E_0}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})} - \alpha - \rho.$$

Através desse mecanismo de mercado queremos encontrar o esforço de equilíbrio exercido por um país com tipo θ . Mas antes, sabemos que:

$$\alpha + p + \rho = \alpha + \left(\frac{E_0}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})} - \alpha - \rho \right) + \rho = \frac{E_0}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}$$

Substituindo esse resultado em (6), encontramos:

$$e(\theta, p_0) = \left(\frac{E_0}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})} \right) \cdot \theta$$



O mesmo valor encontrado pelos autores no modelo MSZ. Dessa forma, de maneira similar, sabemos que o mecanismo de mercado é uma forma eficiente de induzir esforços se o nível uniforme de deveres que se aplica a todos é eficiente “em média”, ou seja,

$$E_0 = E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}).$$

Segue-se também que o preço de mercado é o mesmo que os autores haviam encontrado, em que cada unidade adicional de abatimento além da alocação inicial é paga no valor social de:

$$p_0 = 1 - \alpha.$$

Desse modo, cada país internaliza o impacto de seu próprio esforço no esforço agregado, e tem os incentivos corretos para garantir que o esforço feito seja o melhor possível, ou seja:

$$e(\theta, p_0) = e^{FB}(\theta) \quad \forall \theta \in \theta$$

Assim, a questão remanescente é se esse mecanismo induz a participação de todos os países soberanos. Para os propósitos deste trabalho, nos baseamos no modelo MSZ e em Chander e Tulkens (1995, 1997), e assumimos que a participação de todos os países é necessária para implementar a solução de mercado. Caso contrário, o *BAU* prevalece globalmente.

Nesse contexto, induzir a participação requer satisfazer:

$$U_0(\theta, P_0, E_0) \geq U_N(\theta) \quad \forall \theta \in \theta,$$

que equivale a fazer:

$$\theta + \theta\rho - \frac{\theta}{2} \geq \frac{\alpha^2\theta}{2} + (1 - \alpha)\alpha E(\theta) + \alpha\theta\rho$$

Após algumas manipulações, tomando θ por $\underline{\theta}$ e considerando que $\alpha < 1$, temos o seguinte caso em que o mecanismo de mercado não consegue ser eficiente e induzir participação global:

$$\alpha > \alpha_1 = \frac{\underline{\theta}(1 + 2\rho)}{2E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}} \in (0, 1).$$

Comparando ao α_1 do artigo original, aparece o termo $(1 + 2\rho)$. Desse modo, o ρ que não impactou na determinação do preço do mercado, reaparece afetando positivamente o valor de α_1 . Considerando que $\alpha > \alpha_1$ é o caso em que o mecanismo falha, haver a soma de um valor positivo em α_1 indica que os cenários em que o mecanismo falha são mais restritos do que outrora foram aludindo a um efeito positivo de considerarmos externalidades positivas locais. Faz sentido, pois o *payoff* esperado é maior, sendo racional considerá-lo ao decidir participar de um acordo ou não.



Em suma, a conclusão que chegamos não é vastamente diferente do artigo original. Quando α está próximo de 1, o mecanismo não é necessário, pois os efeitos são locais. Quando os países são extremamente heterogêneos a ponto de $E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})$ ser muito superior ao $\underline{\theta}$ (possibilidade mais realista quando se trata de mudança climática), o mecanismo se torna extremamente caro para os países ineficientes, que devem comprar emissões para poluir desde o começo do acordo. Assim, apesar de o preço de mercado induzir esforço nos países participantes, eliminando o efeito carona no sentido de esforço, alguns países optam por não participarem do acordo, o que é um efeito carona no sentido de participação. Como o acordo exige a participação de todos os países, ele falha e os países voltam ao cenário *BAU*.

Caso fosse possível fazer diferenciação de preço, de forma a deixar as permissões mais baratas para países ineficientes, o problema da participação poderia ser resolvido. Entretanto, o cenário de informação incompleta torna esse cenário impossível. Ademais, qualquer substituto para essa informação traria seus próprios problemas, talvez ainda mais graves. Por exemplo, caso o preço fosse decidido por emissões passadas, os países que emitiram pouco sentiriam que o mecanismo premia mau comportamento, além da possibilidade de incentivar os países a poluírem mais para conseguirem um preço melhor.

Além disso, caso α seja pequeno, externalidades positivas são significativas e a opção alternativa não é muito atraente. A restrição de participação é reduzida a priori por esse efeito. Entretanto, pelo α ser pequeno, o esforço dos países tem pouco efeito local. Por isso, o preço de mercado tem que ser alto o suficiente para induzir o esforço ótimo. Isso implica que os tipos ineficientes terão gastos altos para conseguirem suas licenças para poluir. Desse modo, a diminuição de participação volta a ser um problema. A desigualdade acima mostra que α tem que ser baixo o suficiente para o primeiro efeito dominar, i.e, a utilidade da opção alternativa ser reduzida a ponto de o preço mais alto parecer melhor.

Todas essas conclusões já foram tomadas no artigo original e apenas repetidas aqui. Entretanto, como nosso α_1 é superior ao α_1 original, podemos nos dar o luxo de ter um α levemente maior quando comparado ao do modelo MSZ. Dessa informação extraímos que apesar de ρ não ser levado em consideração ao decidir os preços de mercado, ele o é quando os países consideram entre participar ou não, podendo ser um fator para combater o efeito carona no sentido de participação, que é um dos problemas do mecanismo simples descrito nesta seção.

A tabela 3 evidencia as semelhanças e diferenças dos resultados encontrados no modelo MSZ e no nosso.

Tabela 3 - Comparação entre os principais resultados da seção 4 com os resultados do modelo MSZ.

Modelo MSZ		Nosso Modelo
$e(\theta, p)$	$(\alpha + p)\theta$	$(\alpha + p + \rho)\theta$
p_0	$1 - \alpha$	$1 - \alpha$



α_1	$\frac{\underline{\theta}}{2E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}}$	$\frac{\underline{\theta}(1 + 2\rho)}{2E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}}$
------------	---	--

4.1. Implementação alternativa

Para o restante do artigo, mister se faz considerar a implementação alternativa de que, quando o mecanismo de mercado é eficiente e induz participação global, os países poderiam concordar em um subsídio por unidade abatida, que seria pago por um fundo de contribuição mútua. Assim, as utilidades dos países e o comportamento deles é o mesmo que no mecanismo de mercado quando enfrentando o subsídio Pigouviano $p_0 = 1 - \alpha$, e uma taxa fixa de contribuição T_0 tal que:

$$T_0 = P_0 E_0 (1 - \alpha) E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}).$$

5. Menu de dois tipos

A seção anterior nos mostra que a maior dificuldade é conseguir a participação dos países menos eficientes, e que um dos maiores empecilhos para isso é a informação assimétrica. Por isso, uma forma simples de resolver o problema, é com um menu de dois tipos, a saber, o tipo eficiente e o tipo ineficiente.

Assim, cada país pode selecionar o nível de esforço que será feito de acordo com seu tipo, o que aumenta a participação. Os dois tipos são os seguintes:

Tipo eficiente:

$$U_1(\theta, \rho, \underline{T}) = \max_e (a + p)e - \frac{e^2}{2} + (1 - \alpha)\varepsilon_1 + e\rho - \underline{T}.$$

Tipo ineficiente:

$$U_1(\theta, \underline{T}) = \max_e \alpha e - \frac{e^2}{2} + (1 - \alpha)\varepsilon_1 + e\rho - \underline{T},$$

em que $\underline{T}$ e $\underline{T}$ são uma contribuição fixa para um fundo global, de modo que o acordo funcione da seguinte maneira: todos os países contribuirão para um fundo internacional com uma contribuição que compense a externalidade positiva advinda do acordo. É de suma importância definir a contribuição dessa forma, pois, do contrário, apenas alteraríamos de lugar o problema de *free-riding*. Isso porque haveria o problema do efeito carona na hora de definir quanto cada país contribuiria para o fundo. A contribuição supracitada será utilizada para financiar subsídios (p) para os países eficientes por cada unidade marginal abatida.



Desse modo, os países ineficientes encontram-se indiferentes entre participar ou não, pois se limitam a compensar a externalidade positiva recebida, e exercem o esforço de *BAU*. Enquanto isso, há incentivo para esforço nos países eficientes, que são os subsídios recebidos, de modo que agora o nível de esforço global se torna maior do que o esforço global em *BAU* (ε_N):

$$\int_{\theta^*}^{\underline{\theta}} e_N(\theta)f(\theta)d\theta + \int_{\underline{\theta}}^{\theta^*} e(\theta,p)f(\theta)d\theta > \varepsilon_N = \int_{\underline{\theta}}^{\theta^*} e_N(\theta)f(\theta)d\theta.$$

A seguir são descritas as restrições que o mecanismo deve satisfazer.

Compatibilidade com incentivos: deve haver um θ^* indiferente entre a opção de incentivo e a opção de contribuição fixa, de modo que:

$$U_1(\theta^*, p, \underline{T}) = U_1(\theta^*, \underline{T}). \quad (7)$$

Orçamento balanceado: como descrito anteriormente, as contribuições fixas devem financiar o subsídio de cada unidade marginal abatida pelos países eficientes. Assim:

$$F(\theta^*)\underline{T} + (1 - F(\theta^*))\underline{T} = p \int_{\theta^*}^{\underline{\theta}} e(\theta, p)f(\theta) d\theta. \quad (8)$$

Condição de participação: é atingida ao fazer os países menos eficientes financiarem a externalidade positiva gerada pelo esforço acima do *BAU* dos países mais eficientes. Isso nos dá a seguinte expressão:

$$\underline{T} = (1 - \alpha - \rho) \int_{\theta^*}^{\underline{\theta}} (e(\theta, \rho) - e_N(\theta))f(\theta) d\theta. \quad (9)$$

Investiguemos um pouco mais o que essas condições nos informam. Se igualarmos $U_1(\theta^*, p, \underline{T}) = U_1(\theta^*, \underline{T})$, como descrito em (5), obtemos a seguinte expressão:

$$2(\underline{T} - \underline{T}) = \theta p(2\alpha + p + 2\rho). \quad (10)$$

Além disso, ao substituírmos $e(\theta, p) = (\alpha + p + \rho)$ em (8), encontramos:

$$F(\theta^*)\underline{T} + (1 - F(\theta^*))\underline{T} = p(\alpha + p + \rho) \int_{\theta^*}^{\underline{\theta}} \theta f(\theta) d\theta.$$

Por fim, resolvendo a condição de participação (9), encontramos que:

$$\underline{T} = (1 - \alpha - \rho)p \int_{\theta^*}^{\underline{\theta}} \theta f(\theta) d\theta.$$



Combinando as condições acima, chegamos na seguinte expressão, que expressa o θ^* como expressão de p apenas:

$$\frac{\theta^*(p) \left(1 - F(\theta^*(p))\right)}{\int_{\underline{\theta}}^{\theta^*(p)} \theta f(\theta) d\theta} = \frac{\theta^*(p)}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta} | \tilde{\theta} \geq \theta^*(p))} = 2 \left(1 - \frac{1}{p + 2\alpha + 2\rho}\right). \quad (11)$$

Com isso podemos estudar as propriedades de $\theta^*(p)$. O Lemma A.1 provado no artigo original, se mantém aqui, pois ele é apenas a derivação do termo $\frac{\theta^*(p)}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta} | \tilde{\theta} \geq \theta^*(p))}$, que continua idêntica neste trabalho. Por isso, não se faz necessário demonstrá-lo novamente. Entretanto, o resultado em relação a p que obtemos ao aplicarmos o Lemma A.1 é um pouco diferente do obtido originalmente. Primeiro, lembremos que:

$$\dot{\theta}^*(p) = \frac{2 E(\theta)}{\Psi (p + 2\alpha + 2\rho)^2} > 0,$$

como foi estabelecido pelo Lemma A.1. Portanto, sabemos que (11) define $\theta^*(p)$ de forma única, que é interior quando p está dentro dos limites estabelecidos pelas duas desigualdades a seguir:

$$\begin{aligned} \frac{\underline{\theta}}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})} &\leq 2 \left(1 - \frac{1}{p + 2\alpha + 2\rho}\right) \leq 1 \\ \Leftrightarrow 2 \left(\alpha_1 \left(\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{\underline{\theta}} - \rho \right) + \frac{\underline{\theta}}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}} \right) &= \underline{p} \leq p \leq \bar{p} = 2(1 - \alpha - \rho). \end{aligned}$$

Portando, torna-se evidente um efeito de adicionarmos o termo ρ na nossa maximização de utilidade. Os preços, tanto $\underline{p}$ quanto $\bar{p}$ são afetados negativamente por ρ , o que diminui ambos os preços. Então, apesar de ρ não ter efeito no preço quando consideramos um simples mecanismo de mercado, agora, quando considerados menus de dois tipos, ele passa a surtir efeito. Entretanto, em $\underline{p}$, temos a adição de um termo positivo $\frac{\underline{\theta}}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}}$, tornando o efeito em $\underline{p}$ ambíguo.

Agora, definamos o bem-estar global como:

$$W(p) = \int_{\underline{\theta}}^{\theta^*(p)} \left(e_N(\theta) - \frac{e_N^2(\theta)}{2\theta} \right) f(\theta) d\theta + \int_{\theta^*(p)}^{\underline{\theta}} \left(e(\tilde{\theta}, p) - \frac{e(\tilde{\theta}, p)^2}{2\tilde{\theta}} \right) f(\theta) d\theta$$

ou, usando (5), como



$$W(p) = \left(\alpha + \rho - \frac{(\alpha + \rho)^2}{2} \right) \int_{\underline{\theta}}^{\theta^*(p)} \theta(\theta) d\theta \\ + \left(\alpha + p + \rho - \frac{(\alpha + p + \rho)^2}{2} \right) \int_{\theta^*(p)}^{\underline{\theta}} \theta f(\theta) d\theta$$

Diferenciando com relação a p , para entendermos o comportamento da função em um preço específico, temos:

$$W'(p) = (1 - \alpha - \rho - p) \int_{\theta^*(p)}^{\underline{\theta}} \theta f(\theta) d\theta - \dot{\theta}^* \theta^* f(\theta) p \left(1 - \alpha - \rho - \frac{p}{2} \right)$$

Avaliamos essa derivada no ponto $p_0 = 1 - \alpha$, que é o nível Pigouviano, para analisar se ele é ótimo também nesta nova função.

$$W'(p_0 = 1 - \alpha) = (-\rho) \int_{\theta^*(p)}^{\underline{\theta}} \theta f(\theta) d\theta - \dot{\theta}^* \theta^* f(\theta) (1 - \alpha) \left(\frac{1 - \alpha}{2} - \rho \right) < 0.$$

Com esse resultado, achamos o resultado de que o subsídio na opção de incentivo é menor que no nível Pigouviano, de modo que:

$$p_1 < p_0 = 1 - \alpha, \quad (7)$$

já que $\dot{\theta}^* > 0$ para todo p .

Dessa forma, os países eficientes passam a receber um subsídio reduzido, inferior ao nível Pigouviano ótimo, o que implica que não internalizam integralmente o impacto marginal completo de seus esforços no bem-estar global. Essa concessão é necessária para viabilizar a participação dos países ineficientes (na forma da contribuição T), tornando sua adesão ao acordo menos onerosa e, conseqüentemente, mitigando o problema do *free-riding*. Considerando que a alternativa à participação é a dissolução do acordo, mesmo o subsídio reduzido permanece economicamente vantajoso para os países eficientes. Os países ineficientes, por sua vez, encontram-se em uma posição de indiferença entre participar ou não; presumindo-se racionalidade, optam por aderir ao pacto para usufruir dos benefícios gerados pelo elevado esforço dos agentes eficientes, sob a forma de externalidades positivas, como, notadamente, uma atmosfera mais limpa.

A tabela 4 evidencia os principais resultados encontramos nesta seção com os originais dos autores do modelo MSZ. Devido a extensão da demonstração matemática nessa etapa, não é de fácil comparação os valores em uma tabela. Por isso, optamos por destacar os efeitos de ρ no preço.

Tabela 4 – Comparação entre os principais resultados da seção 5 com os resultados do modelo MSZ.



	Modelo MSZ	Nosso modelo
$\underline{p}$	$2(1 - \alpha)$	$2(1 - \alpha - \rho)$
$\underline{p}$	$2\left(\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{\underline{\theta}}\alpha_1 - 1\right)$	$2\left(\alpha_1\left(\frac{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta})}{\underline{\theta}} - \rho\right) + \frac{\underline{\theta}}{E_{\tilde{\theta}}(\tilde{\theta}) - \underline{\theta}}\right)$
p_1	$< p_0 = 1 - \alpha$	$< p_0 = 1 - \alpha$
$W'(p_0)$	< 0	< 0

Reitera-se, portanto, que o mecanismo de punição inerente ao modelo reside na ameaça crível de dissolução do acordo. Dado que todos os países se beneficiam de um ambiente menos poluído, todos possuem interesse na manutenção do regime cooperativo. Como a deserção de um único signatário pode inviabilizar o acordo, e os países ineficientes são indiferentes à adesão marginal, assume-se que sua participação será mantida.

No caso dos países eficientes, existe um incentivo monetário líquido para sua participação, ainda que seu montante seja inferior ao que vigoraria em uma situação de *first-best*. A redução desse incentivo é uma condição indispensável derivada da queda no bem-estar agregado que ocorre quando se analisa a função de utilidade global no ponto $p_0 = 1 - \alpha$, que corresponderia ao ótimo social *first-best* no mecanismo de mercado de referência.

6. Conclusão

A principal contribuição desta análise foi a modificação do modelo de Martimort e Sand-Zantman (2013), com a inclusão do parâmetro ρ , que representa externalidades positivas locais decorrentes do esforço de mitigação. Esse acréscimo revelou dois resultados centrais. Primeiro, tanto no cenário de *first-best* quanto no de *BAU*, o bem-estar social é ampliado, reduzindo a distância entre o esforço ótimo e o esforço individual racional. Isso significa que, quando políticas ambientais geram benefícios internos adicionais, seja na forma de avanços tecnológicos, ganhos sociais ou recompensas políticas, a resistência ao engajamento internacional diminui.

Segundo, verificou-se que, embora ρ não altere diretamente o preço de equilíbrio em mecanismos simples de mercado, seu papel reaparece de maneira decisiva quando se considera a participação dos países e, sobretudo, quando se adota um menu de dois tipos. Nesse contexto, ρ afeta os limites de preço que sustentam o equilíbrio e reduz a probabilidade de falha do mecanismo de cooperação, mitigando parte dos incentivos ao *free-riding*. Assim, as externalidades locais funcionam como um amortecedor estratégico, tornando os mecanismos mais robustos diante da heterogeneidade e da assimetria informacional entre países.



Reiteramos as dúvidas manifestadas pelos autores em seu artigo original quanto à eficiência de um mecanismo de mercado como solução para o problema de poluição em um contexto de soberania nacional e ausência de autoridade central coercitiva. A adição do termo ρ em nada alterou a eficiência de tal mecanismo, sendo o preço de equilíbrio global igual no final. Entretanto, é de interesse o efeito que ρ possui em aumentar o α necessário para que tal mecanismo falhe. Isso nos mostra que talvez não precisemos ser tão pessimistas quanto à possibilidade de o mecanismo simples falhar, pois externalidades positivas locais também são levadas em conta.

Conclui-se, portanto, que a inclusão de externalidades positivas locais não apenas amplia o bem-estar global, mas também fornece fundamentos para um maior otimismo em relação à viabilidade de mecanismos autoexecutáveis. Ainda que subsídios inferiores ao nível pigouviano ótimo sejam necessários para garantir a participação de países ineficientes, a consideração de ρ aponta para um caminho promissor: em vez de depender exclusivamente de sanções ou transferências monetárias, os acordos podem se apoiar também nos benefícios domésticos endógenos das políticas climáticas, transformando o esforço ambiental em um investimento politicamente atrativo e economicamente racional.



7. Referências

- ARROW, K. J.; FISHER, A. C. Environmental Preservation, Uncertainty, and Irreversibility. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 88, n. 2, p. 312, maio 1974.
- BALIGA, S.; MASKIN, E. Mechanism design for the environment. In: MÄLER, K.-G.; VINCENT, J. R. (Org.). **Handbook of environmental economics**. Amsterdã: Elsevier, 2003. v. 1, p. 305–324.
- BARRETT, S. Economic growth and environmental preservation. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 23, n. 3, p. 289–300, nov. 1992.
- BARRETT, S. Self-Enforcing International Environmental Agreements. **Oxford Economic Papers**, v. 46, p. 878–894, 1994.
- BRADFORD, D. Improving on Kyoto: greenhouse gas control as the purchase of a global public good. In: GUESNERIE R.; TULKENS H. **The Design of Climate Policy**. Cambridge, MA: MIT Press, 2008. p. 13-36.
- CARRARO, C.; SINISCALCO, D. Strategies for the international protection of the environment. **Journal of Public Economics**, v. 52, n. 3, p. 309–328, out. 1993.
- CHANDER, P.; TULKENS, H. A core-theoretic solution for the design of cooperative agreements on transfrontier pollution. **International Tax and Public Finance**, v. 2, n. 2, p. 279–293, ago. 1995.
- CHANDER, P.; TULKENS, H. The core of an economy with multilateral environmental externalities. **International Journal of Game Theory**, v. 26, n. 3, p. 379–401, out. 1997.
- CHEIKBOSSIAN, G.; SAND-ZANTMAN, W. Dynamic Cooperation in Local Public Goods Supply with Imperfect Monitoring. **Annals of Economics and Statistics**, n. 101/102, p. 327, 2011.
- COASE, R. H. The Problem of Social Cost. **The Journal of Law & Economics**, v. 3, p. 1–44, 1960.
- HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. **Science**, v. 162, n. 3859, p. 1243–1248, 1968.
- HELM, C.; WIRL, F. International Environmental Agreements: Incentive Contracts with Multilateral Externalities. **Wirtschaftswissenschaftliche Diskussionspapiere**, No. V-336-11, jun. 2011.
- HELM, C.; WIRL, F. Multilateral externalities: Contracts with private information either about costs or benefits. **Economics Letters**, v. 141, p. 27–31, abr. 2016.
- HELM, C. International emissions trading with endogenous allowance choices. **Journal of Public Economics**, v. 87, n. 12, p. 2737–2747, dez. 2003.



KRAUTKRAEMER, J. A. Optimal Growth, Resource Amenities and the Preservation of Natural Environments. **The Review of Economic Studies**, v. 52, n. 1, p. 153, jan. 1985.

MARTIMORT, D.; SAND-ZANTMAN, W. Solving the global warming problem: beyond markets, simple mechanisms may help! **The Canadian Journal of Economics / Revue canadienne d'Economique**, v. 46, n. 2, p. 361–378, 2013.

STERN, N. H. **The Economics of Climate Change: the Stern Review**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007