

Custo para redução da emissão de gás carbônico via método de inferência fuzzy de Takagi-Sugeno-Kang

Nilmara J. B. Pinto¹, Estevão Esmi², Laécio C. Barros³
DMA, IMECC – Unicamp, 13.083-859 - Campinas/SP.

Resumo. Esse artigo se propõe a modelar o custo de investimento necessário para que as empresas consigam reduzir a emissão de dióxido de carbono. São considerados dois fatores principais: o percentual das emissões atuais ao qual se pretende reduzir e também o setor da economia ao qual a empresa pertence. Ambos fatores apresentam incertezas e são traduzidos em termos de conjuntos fuzzy, que são usados como valores fuzzy de entrada para um sistema baseado em regras fuzzy aliado ao método de inferência fuzzy de Takagi-Sugeno-Kang, usado para estimar o custo de investimento. Assim o custo de investimento é uma função da pretensão em reduzir e do setor da economia.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; traço de carbono; inferência fuzzy; Takagi-Sugeno-Kang; controlador fuzzy.

1. Introdução

A problemática das mudanças climáticas, em particular do aquecimento global, têm sido alvo de diversas pesquisas e discussões pelo mundo. Alguns acordos climáticos foram assinados por diversos países, e têm sido atualizados a cada encontro anual Convenção-Quadro sobre Mudança Climática da ONU (UNFCCC, em inglês).

O foco de estudo têm se dado em torno da emissão de dióxido de carbono (CO₂ ou gás carbônico), o principal responsável pelo aumento da temperatura

¹nilmarabiscaia@gmail.com

²eelaureano@gmail.com

³laecioch@ime.unicamp.br

média anual do globo terrestre. Para reduzir a emissão de tais gases na atmosfera diversos mecanismos estão sendo adotados pelas maiores nações do planeta.

No entanto, há uma patente contradição entre o modo de produção e a necessidade de se emitir menos gás carbônico. A priori, redução de emissão de gases implica em redução dos ganhos das empresas. De modo tal que é necessário que haja intenção por parte de seus gestores em ativamente investir na redução da emissão de CO₂.

Este artigo se propõe a modelar a intenção de reduzir as emissões de dióxido de carbono através de conjuntos fuzzy, e modelar o custo (investimento) segundo o método de inferência de Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Sendo o produto final uma aproximação dos custos para reduzir as emissões de uma entidade (anualmente).

Para cumprir tal objetivo, o artigo é dividido como segue. Na Seção 2 discutem-se os mecanismos para redução da emissão de CO₂. Na Seção 3 são dados conceitos básicos da teoria de conjuntos fuzzy necessários ao entendimento do método de inferência TSK. E, por fim, na Seção 4 é apresentada a modelagem com os custos de investimento.

2. Traço de carbono

O Protocolo de Quioto foi o primeiro grande acordo assinado por 192 partes em 1997. Nele foram estabelecidos mecanismos para controle do efeito estufa e mitigação do aumento da temperatura média da Terra. E em acordos – como o Acordo de Paris – e Conferências Climáticas da ONU (COPs) posteriores, tais medidas foram sendo atualizadas. No entanto, as metas estabelecidas metas a médio e longo prazo não têm sido alcançadas (United In Science, 2019).

O foco se dá sobre a emissão de partículas de dióxido de carbono na atmosfera, pois esse gás é, atualmente, o principal responsável pelo aumento da temperatura média global, como se pode ver na Figura 1. Dessa forma, a maior parte dos mecanismos está disposta sobre a meta de redução da emissão de gás carbônico.

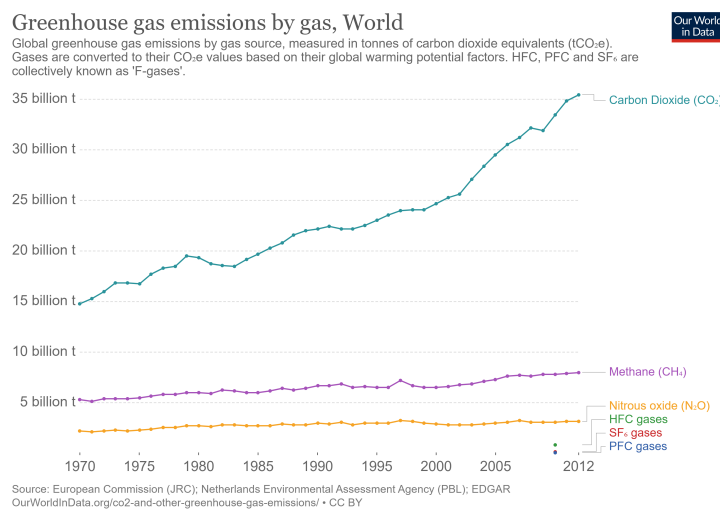


Figura 1: Emissão anual (em bilhões de toneladas) dos gases causadores do efeito estufa entre os anos de 1970 e 2017. Em azul é a emissão de CO₂. Fonte: Ritchie e Roser (2017).

De maneira geral pode-se dizer que os mecanismos propostos estão dentro do que a Economia Ecológica chama de precificação do carbono (International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2019). Produtos são taxados e sobretaxados devido ao traço de carbono, isto é, devido à quantidade de carbono emitida para que ele fosse produzido. Isso inclui todas as fases de produção, desde a extração das matérias-primas, a produção em si, e até sua logística de distribuição.

Quanto menor o traço de carbono em um produto menos ele será taxado pelo governo local, e também pelos países importadores daquele produto. Por outro lado, quanto maior a emissão de CO₂ para a sua produção e distribuição, mais ele será taxado local e globalmente.

Essa é uma forma de tornar produtos oriundos de processos limpos de emissão de dióxido de carbono mais competitivos no livre mercado. Consequentemente, há uma pressão sobre as instituições para que elas investam em pesquisa e modernização, a fim de que seus produtos sejam menos taxados e mais competitivos.

Reduzir o traço de carbono, no entanto, pode ser custoso de começo, e exige uma mudança de postura dos gestores, que precisam admitir que tal custo

é, na realidade, um investimento a longo prazo, e uma necessidade do planeta Terra. A inicial contradição entre otimização de custos e redução de emissão é superada a partir de uma postura de liderança com intenção de investir em processos de produção livres de carbono. Postura essa que futuramente evitará maiores prejuízos, dado que as taxações tendem a aumentar gradativamente.

Os investimentos variam em qualidade e quantidade conforme o setor da economia ao qual a empresa pertence, e também conforme os detalhes de produção adotados pela organização. Pode ser um investimento na logística de transporte das peças e/ou produtos finais, a fim de diminuir a emissão por veículos automotores. A abrangência desse investimento depende substancialmente do setor da economia no qual a empresa se encontra. Uma empresa de locação de veículos precisaria investir muito em renovar sua frota com veículos elétricos, por exemplo.

Outro tipo de investimento é na mudança de maquinário para dispositivos que não usem de queima de carbono. Para algumas empresas isso significa um investimento, ainda que grande, pontual; para outras o investimento se daria em pesquisa para desenvolvimento de tal maquinário. Nesses casos, o investimento pode ser para fomentar estudos de novas fontes de energia sustentáveis e também de novos métodos para o uso da matéria prima.

A fonte da matéria-prima é um dos casos que afeta muito mais amplamente as empresas do setor primário, devido à sua dependência da atividade extrativista. Nesse caso o investimento em pesquisa pode ser alto, e gerar resultados apenas a longo prazo.

Outro tipo de investimento é sobre o descarte de resíduos. Esse pode-se caracterizar como mais barato, pois para empresas menores bastaria firmar parcerias com empresas recicladoras, por exemplo.

É importante notar que um investimento grande, como de maquinário, gera mudança na cadeia produtiva, mudando possivelmente o uso de matéria prima e os resíduos gerados. Dessa forma, após um investimento grande, outros investimentos menores podem levar a uma queda ainda maior na emissão de gás carbônico.

A longo prazo, no entanto, tais investimentos todos tendem a compensar, devido ao fato de que a taxa de produtos por traço de carbono deve aumentar ao longo do tempo, tornando difícil, por exemplo, a concorrência em mercados internacionais (França e Gurgel, 2018).

Outro fator é a implantação do mercado de carbono, mecanismo já ado-

tado internacionalmente e já esperado pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (2016). Nesse mercado, organizações que emitirem CO₂ aquém do limitante, poderão vender essa quantidade não emitida – créditos de carbono – para aquelas empresas que emitirem além do permitido, e que precisarão comprar tais créditos afim de não serem sobretaxadas. Planejar-se e implantar mudanças é atualmente uma necessidade ambiental e, futuramente, no Brasil uma exigência legal.

3. Inferência fuzzy

Um (sub)conjunto fuzzy A do universo U é caracterizado pela sua função de pertinência $\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$, em que $\mu_A(x)$, ou simplesmente $A(x)$, traduz a pertinência do elemento x no conjunto A (Zadeh, 1965). Por exemplo, o conjunto A de números próximos a 0. A palavra “próximo” inclui uma subjetividade e, a priori, certa dificuldade em definir, classicamente, quais elementos pertencem ao conjunto. Uma possível função de pertinência para tal conjunto A é dada por

$$A(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & \text{se } x \in [-1, 1] \\ 0, & \text{se } x \notin [-1, 1] \end{cases} . \quad (3.1)$$

O elemento $-0,2$ pertence ao conjunto A com grau $0,8$, enquanto que o elemento $0,7$ pertence ao conjunto A com grau $0,3$. Ou seja, o elemento $-0,2$ pertence ao conjunto A com maior precisão (certeza) do que o elemento $0,7$. E, escolhida essa função de pertinência, conclui-se que todos os valores maiores que 1 ou menores que -1 não são próximos de zero.

O conjunto fuzzy mais comum é o conjunto triangular, dado pela tripla $A = (a; b; c)$, cuja pertinência é

$$A(x) = \begin{cases} \frac{x - a}{b - a}, & \text{se } x \in [a, b] \\ \frac{c - x}{c - b}, & \text{se } x \in (b, c] \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} .$$

O conjunto fuzzy dado pela Equação (3.1) pode ser escrito como $A = (-1; 0; 1)$, por exemplo.

Como feito para conjunto clássicos, é possível considerar, para conjuntos fuzzy A e B sobre o mesmo universo, sua união, interseção e complementar, cu-

jas pertinências são dadas respectivamente por $(A \cup B)(x) = \max\{A(x), B(x)\}$, $(A \cap B)(x) = \min\{A(x), B(x)\}$ e $A^c(x) = 1 - A(x)$.

Uma generalização do operador interseção é dado por uma t -norma, isto é, um operador $\Delta : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ definido por $\Delta(x, y) = x \Delta y$, comutativo e associativo, com elemento neutro 1 e crescente em ambas as coordenadas ($x \leq u$ e $y \leq v$ implicam em $x \Delta y \leq u \Delta v$). O mínimo é uma t -norma.

A inferência fuzzy (Barros e Bassanezi, 2021) se dá por meio de um controlador fuzzy (ver diagrama na Figura 2). Primeiro é feita a fuzzificação dos dados, isto é, um especialista atribui funções de pertinência fuzzy a cada item do processo (A_{ij}). Depois é construída a base de regras, que é utilizada para realizar a inferência fuzzy.

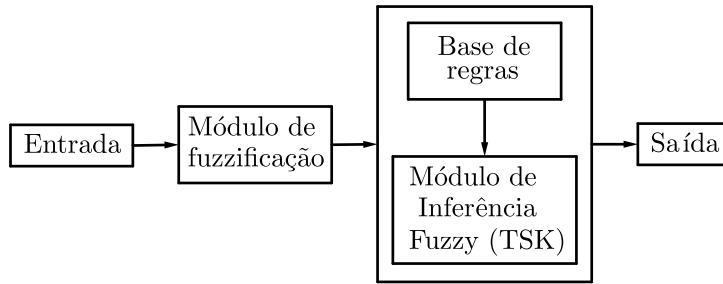


Figura 2: Esquema do controlador fuzzy via inferência de Takagi-Sugeno-Kang. Fonte: autores.

O módulo de fuzzificação corresponde a atribuir conjuntos fuzzy a variáveis linguísticas como “baixo”, “médio” ou “intenso”. É parte crucial da modelagem, pois permite traduzir em termos matemáticos a linguagem subjetiva típica dos especialistas de demais áreas.

Aqui será usado o método de inferência de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) (Sugeno, 1985), cujas regras “Se A , então B ” têm como saída uma função. Por exemplo, a seguinte base de regras

$$\begin{aligned}
 R_1: & \text{ Se } x \text{ é } A_{11} \text{ e } y \text{ é } A_{12}, \text{ então } U \text{ é } u_1(x, y), \\
 R_2: & \text{ Se } x \text{ é } A_{21} \text{ e } y \text{ é } A_{22}, \text{ então } U \text{ é } u_2(x, y)
 \end{aligned}$$

na qual cada A_{ij} é um conjunto fuzzy e u_1 e u_2 são usualmente funções afins.

A saída geral do sistema é dada por

$$u = \frac{w_1 u_1 + w_2 u_2}{w_1 + w_2},$$

em que w_1 e w_2 são pesos determinados por $w_i = A_{i1}(x) \Delta A_{i2}(y)$, com Δ uma t -norma e $i = 1, 2$. Aqui a t -norma utilizada é o mínimo.

4. Modelagem

O investimento para redução da emissão de carbono depende de dois fatores. O primeiro deles é o quanto se pretende reduzir, isso implica na diminuição do traço de carbono. Como explicado na Seção 2, esse fator é impreciso, pois está envolvido em toda a cadeia produtiva, desde o fornecimento de matéria-prima, passando por todo o processo de produção, até a distribuição do produto final.

O segundo fator é qual setor da economia ao qual a instituição pertence. Esse fator implica de sobremaneira a dependência da emissão de CO_2 no faturamento da empresa. Empresas do setor primário serão muito dependentes da emissão de gás carbônico, enquanto que a maioria das empresas do setor terciário dependerão minimamente da emissão de dióxido de carbono.

Dessa forma, duas variáveis fuzzy serão consideradas. A pretendida redução da emissões (E), em termos do percentual da emissão atual, e a intensidade de dependência (D) da emissão de CO_2 . A saída será o percentual dos lucros a ser investido para obter a redução das emissões.

A variável redução das emissões (E) será dividida em quatro níveis, de acordo com a intenção dos gestores, segundo a Tabela 1. As pertinências podem ser visualizadas na Figura 3.

Tabela 1: Redução da emissão pretendida (E)

Variável	Sigla	Conjunto
Muito Baixa	MB	(0; 0; 0, 4)
Baixa	B	(0, 2; 0, 6; 0, 75)
Média	M	(0, 6; 0, 75; 0, 9)
Alta	A	(0, 8; 1; 1)

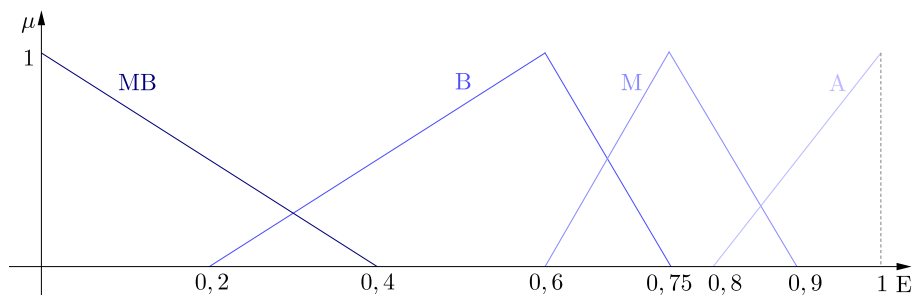


Figura 3: Todos os conjuntos de entrada da variável redução da emissão pretendida (E) em escala de azul mais escuro (MB) até o azul mais claro (A).
Fonte: autores.

Atualmente os esforços para redução da emissão de carbono ainda são iniciais, logo as reduções estarão concentradas na região próxima a 1. Por este motivo uma redução ao nível de 60% já será considerada baixa nesse modelo, por exemplo.

A variável intensidade da dependência de emissões (D) será dividida em três níveis, de acordo com a centralidade que a emissão têm no faturamento da organização, segundo a Tabela 2. As pertinências podem ser visualizadas na Figura 4.

Tabela 2: Intensidade da dependência de emissões (D)

Variável	Sigla	Conjunto
Baixa	B	(0; 0; 0,4)
Média	M	(0,1; 0,5; 0,9)
Alta	A	(0,6; 1; 1)

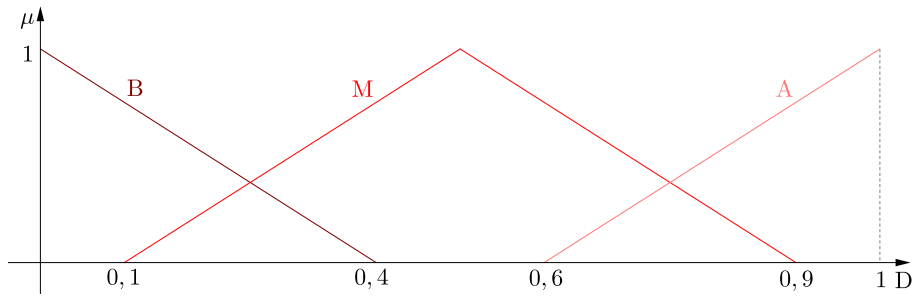


Figura 4: Todos os conjuntos de entrada da variável intensidade da dependência de carbono (D) em escala de vermelho mais escuro (B) até o vermelho mais claro (A). Fonte: autores.

Dado que o cálculo do traço de carbono é complexo, a dependência se torna um fator muito subjetivo e por esse motivo a dependência média (M) tem valores de pertinência não nulos para o domínio de 0,1 até 0,9.

As funções de saída dizem respeito à porcentagem dos lucros que será destinada ao investimento (I) para a redução da emissão de CO₂. Foram escolhidas quatro funções l_i que buscam refletir os tipos de investimento descritos na Seção 2, são elas:

$$l_1(x, y) = \frac{-x + 2y + 1}{3}, \tag{4.2}$$

$$l_2(x, y) = \frac{-x + y + 0,7}{2}, \tag{4.3}$$

$$l_3(x, y) = \frac{-2x + 2y + 2}{3}, \tag{4.4}$$

$$l_4(x, y) = \frac{-x + 3y + 1}{4}. \tag{4.5}$$

A base de regras é do tipo “Se x é E e y é D, então U é I ”. E o conjunto de todas as regras está descrito na tabela 3.

Tabela 3: Base de regras fuzzy

D \ E	E			
	MB	B	M	A
B	l_3	l_2	l_1	l_1
M	l_4	l_3	l_2	l_1
A	l_4	l_4	l_3	l_2

Por exemplo, a regra da casela em negrito deve ser lida como

“Se x (emissão) é Muito Baixa e y (dependência) é Alta, então u (investimento) é $l_4(x, y)$.”,

em que $l_4(x, y)$ é dada pela equação (4.5).

Os gestores da empresa são os responsáveis por atribuir um nível de dependência de carbono, entre 0 e 1, e o objetivo de redução das emissões. O controlador fuzzy devolve a quantia de investimento. Simulando os possíveis cenários, obtém-se a Figura 5.

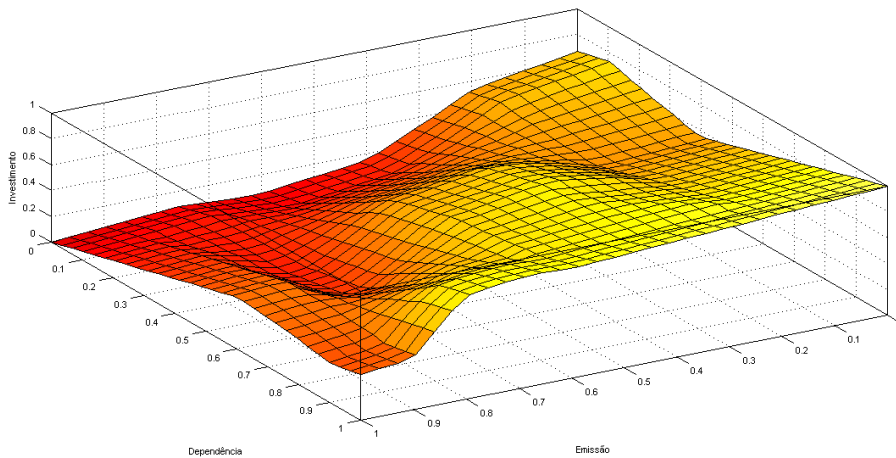


Figura 5: Simulação do controlador fuzzy. Fonte: autores.

Na Figura 5 é possível observar que há um curioso fenômeno. Há queda no investimento, mesmo com aumento na redução. Isso ocorre pela combinação de tipos de investimentos. Por vezes investir em novos maquinários implica também em mudança da quantia ou qualidade dos resíduos. Dessa forma, diminui-se a emissão pelo maquinário e pelo tratamento dos rejeitos. A ambição de reduzir ainda mais a emissão é, portanto, recompensada.

Por exemplo, tomando o índice de dependência como sendo 0,6, para ter emissões de 90% da quantia atual, o investimento deve ser de 43%, enquanto que para obter redução ao nível de 80% o investimento deve ser da ordem de 25%.

Outro exemplo seria para uma empresa com índice de dependência de 0,5. Para que a emissão seja reduzida a 40%, é necessário investir 73% dos

lucros, enquanto que para reduzir ainda mais, chegando a 30% dos níveis atuais, o investimento deve ser 67,5% dos lucros.

É importante lembrar que o modelo não especifica qual tipo de investimento será feito, mas sim o montante a ser reservado no planejamento da empresa. É um sistema que pretende auxiliar a mudança de postura dos gestores, para que estes tomem atitudes favoráveis à redução das emissões de dióxido de carbono.

A existência do fenômeno supracitado pode ser considerada como um incentivo à essa mudança de postura. Mesmo que não seja espontânea a iniciativa de investir em redução das emissões (Järvensivu, 2017), o vislumbrar de maiores reduções com não tão vultuoso investimento pode entusiasmar o ambicioso gerenciador.

5. Considerações finais

Este artigo se propôs a modelar a problemática da emissão corporativa de gás carbônico. Considerou-se o a intenção de redução e a intensidade de dependência das emissões de CO₂ como variáveis de um controlador com inferência fuzzy do tipo Takagi-Sugeno-Kang. Os resultados visam auxiliar a tomada de decisão dos gestores das empresas quando do planejamento anual. Os próximos passos são aperfeiçoar as saídas do sistemas, para torná-las mais verossímeis, e combinar esse estudo com outras abordagens, a fim de otimizar processos (Pinto et al., 2020).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da CAPES 1691227, CNPq 313313/2020-2 e CNPq 314885/2021-8.

Referências

Barros, L. C. e Bassanezi, R. C. (2021). *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*. UNICAMP, Campinas, 3 edição.

- Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (2016). *Precificação do carbono: o que o empresariado brasileiro precisa saber para se posicionar*. Rio de Janeiro.
- França, F. e Gurgel, A. C. (2018). Impactos econômicos de políticas climáticas europeias e americanas sobre a economia brasileira. *Revista Brasileira de Economia*, 72(03):61–79.
- International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank (2019). Executive summary. In *The First International Research Conference on Carbon Pricing*, páginas 11–15, New Delhi. World Bank Publications.
- Järvensivu, P. (2017). A post-fossil fuel transition experiment: Exploring cultural dimensions from a practice-theoretical perspective. *Journal of Cleaner Production*, 169:143–151.
- Pinto, N. J. B., Esmi, E., e Barros, L. C. (2020). Carbon emissions trading as a constraint in a fuzzy optimization problem. In *Fuzzy Information Processing, Proceedings of NAFIPS'2020*, volume 1000, páginas 211–222, Redmond/WA, EUA. Springer, Cham.
- Ritchie, H. e Roser, M. (2017). Co₂ and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences*, 36(1):59–83.
- United In Science (2019). *High-level synthesis report of latest climate science information convened by the Science Advisory Group of the UN Climate Action Summit 2019*.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3):338–353.