

Implicações energéticas do uso da terra e das políticas de transporte no Brasil

Andressa Lemes Proque¹
Gervásio Ferreira Santos²

Resumo: O objetivo deste artigo é avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética na economia brasileira. As características do processo de desenvolvimento urbano têm influência sobre o consumo de energia. As cidades mais compactas e com maior densidade populacional urbana consomem menos energia *per capita*, devido à menor dependência dos automóveis. A fundamentação teórica está baseada no modelo padrão de Economia Urbana descrito por Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969). A partir de uma média de dados de cinco cidades brasileiras, calibrou-se um modelo numérico de simulação urbana para gerar uma cidade monocêntrica representativa. As simulações de política energética mostraram que a interação entre eficiência energética e a estrutura espacial das cidades deve ser considerada na avaliação do uso do solo e das políticas de transporte no Brasil.

Palavras-Chave: Uso da terra. Políticas de transporte. Eficiência energética. Economia Urbana

Abstract: The objective of this dissertation is to evaluate the spatial distribution of land use and urban transportation policies on energy efficiency in the Brazilian economy. The characteristics of the urban development process have influence on energy consumption. The more compact and more densely populated urban cities tend to consume less energy per capita, due to less reliance on automobiles. The theoretical background of this work is based on the standard model of urban economics, described by Alonso (1964), Mills (1967) and Muth (1969). Based on average of five Brazilian cities data is calibrated for a numerical model of urban simulation to generate a representative monocentric city. Energy policy simulations showed that the interaction between energy efficiency and the spatial structure of cities might be considered in the evaluation of land use and transportation policies in Brazil.

Keywords: Land use. Transportation policies. Energy efficiency. Urban economics.

JEL classification: R1; R41; Q4

Área Temática: Economia

¹ Doutoranda em Economia pelo PPGE/UFJF.

² Professor adjunto do departamento de Economia da Universidade Federal da Bahia.

1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras enfrentam atualmente graves problemas urbanos, especialmente relacionados com infraestrutura e mobilidade urbana. Com uma população de mais de 200 milhões de habitantes, o país apresenta três fenômenos importantes na relação entre Economia Urbana e uso de energia: (i) crescimento acelerado da frota de veículos automotores e padrão ineficiente de uso; (ii) crescimento do consumo de combustíveis; (iii) expansão do consumo de energia elétrica. No longo prazo, esses fatores terão papel crucial em relação ao volume das emissões de dióxido de carbono. Desse modo, é necessário buscar medidas e políticas que melhorem a eficiência energética e reduzam as emissões do setor de transportes.

Os estudos da literatura internacional tem ressaltado a importância da ocupação do solo e das políticas de transporte sobre o consumo de energia. As contribuições sobre a relação entre desenvolvimento urbano e uso de energia nas cidades foram analisadas por diversos autores, como Newman e Kenworthy (1989a e 1989b), Gosling e Walker (1992), Naess (1995), Glaeser e Kahn (2004), Brownstone e Golob (2009). Essa relação entre Economia Urbana e Economia de Energia ainda é pouco estudada para o caso brasileiro. No entanto, apesar de poucas pesquisas, as evidências empíricas da forte relação entre os padrões de desenvolvimento urbano e uso de energia se assemelham com a literatura internacional sobre o tema. A título de exemplo, Costa (2001) avaliou a relação entre o consumo de energia com transportes para municípios acima de 50 mil habitantes no Estado de São Paulo e confirmou a influência da densidade populacional sobre o consumo de energia com transportes. Com a integração entre as áreas de desenvolvimento urbano e energia, será possível explicar questões importantes, como o papel das economias de aglomeração e dos deslocamentos pendulares na determinação do uso eficiente de energia.

A principal referência é Larson, Liu e Yezer (2012), que construiu o *Urban Energy Footprint Model* (UEFM), primeiro modelo para simular as implicações do uso da terra e das políticas de transporte sobre a forma espacial das cidades. Os autores avaliaram a eficiência energética para fins residenciais e de deslocamento intra-urbano. Os resultados do trabalho de Larson e Yezer (2014) também são utilizados. Esses autores utilizaram o mesmo modelo para entender as questões de uso da terra, deslocamento e moradia em cidades com o congestionamento de tráfego.

A análise dos impactos provenientes de choques nos setores de energia e na Economia Urbana requer atenção sobre as implicações nas variáveis relativas à estrutura urbana na economia brasileira. O ponto central deste artigo é que transporte urbano e habitação estão interconectados. Os resultados de modelos numéricos de simulação urbana mostraram que as características do processo de desenvolvimento urbano tem influência sobre o consumo de energia nas cidades. Diante dos desafios impostos no Brasil pelo crescente consumo de energia, dependência dos combustíveis fósseis e escassez dos recursos energéticos, os modelos numéricos de simulação urbana poderão se tornar muito úteis para avaliar as políticas de desenvolvimento urbano e energéticas.

O consumo de energia sustentável deve ser associado às atividades econômicas e de bem-estar da população. No Brasil, o rápido e tardio crescimento da população foi associado à rápida industrialização nos anos 60 e 70 e levou à ocupação desordenada de muitas áreas urbanas, especialmente nas capitais e regiões metropolitanas. O transporte público de massa não está bem desenvolvido no país e a população das grandes cidades convive com graves congestionamentos que produzem impactos sobre a produtividade da economia. Diante do

contexto apresentado, o problema de pesquisa que se coloca é: Qual é o efeito da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética no Brasil? A resposta a esta pergunta permite avaliar o relacionamento entre o consumo eficiente de energia com o espaço habitacional, os deslocamentos diários da residência para o local de trabalho e a estrutura espacial das cidades no Brasil.

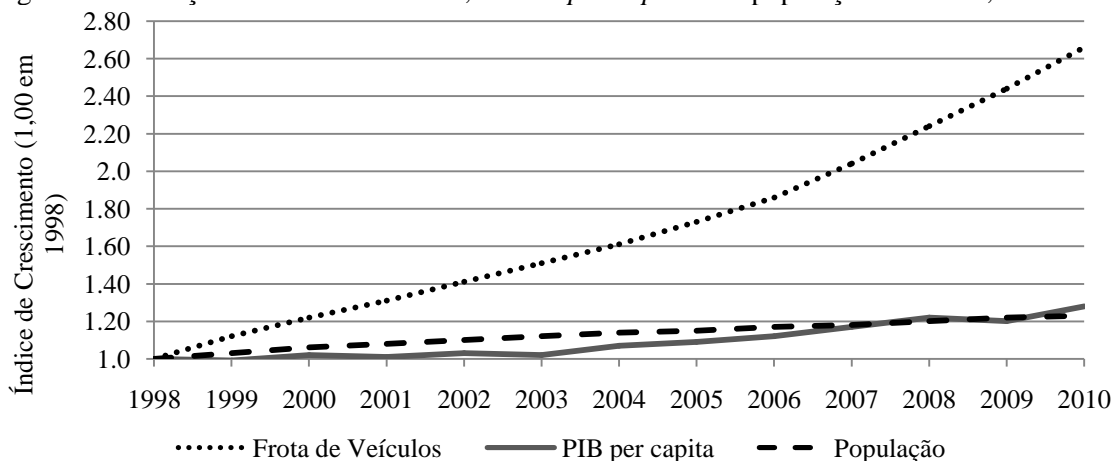
Além desta breve introdução, o artigo é composto de mais cinco seções. A Seção 02 realiza uma análise do crescimento urbano, do setor de transporte e dos elementos que os relacionam, como a acessibilidade, os deslocamentos e o uso do solo urbano com base no desempenho energético das cidades. A Seção 03 apresenta o referencial teórico-metodológico sobre o tema baseado no modelo de cidade monocêntrica. A Seção 04 descreve a modelagem numérica de simulação urbana, o banco de dados e os parâmetros-chave. A Seção 05 descreve os resultados do modelo de simulação. Finalmente, na seção 06 são apresentadas as considerações finais.

2. DESENVOLVIMENTO URBANO, POLÍTICAS DE TRANSPORTE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O grau de urbanização, medido pelo percentual da população urbana, no Brasil é um dos mais altos do mundo. Atualmente, 85,0% da população vivem em áreas urbanas. Esse percentual é maior do que a média mundial de 53,0%, América Latina e Caribe com 74,0%, e até mesmo a União Europeia com 74,0% e os Estados Unidos com 83,0% (WORLD BANK, 2014). Além da explosão populacional, três fenômenos são importantes e devem ser considerados na relação entre Economia Urbana e uso de energia: (i) crescimento acelerado da frota de veículos automotores e o padrão ineficiente de uso; (ii) crescimento do consumo de combustíveis; (iii) expansão do consumo de energia elétrica. No longo prazo, esses fatores terão papel crucial em relação ao volume das emissões de dióxido de carbono. Desse modo, é necessário buscar medidas e políticas que melhorem a eficiência energética e reduzam as emissões do setor de transportes. Nesse contexto de mobilidade urbana e uso de energia, as cidades tendem a ocupar um papel cada vez mais importante na definição de eficiência energética.

A Figura 1 apresenta, em números índices, a evolução da frota de veículos, o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* e a população no Brasil, entre 1998 e 2010. É possível observar que a frota de veículos evoluiu a taxas de crescimento maiores em comparação ao PIB *per capita* e a população. Isso evidencia a dimensão da evolução da motorização no País. Os resultados desta evolução, dentre outros, são conhecidos: excesso de carros nas cidades, padrões ineficientes de uso, serviços ruins de transporte coletivo, apropriações indevidas de espaços urbanos. A sustentabilidade dessa evolução precisa então ser analisada em relação à eficiência energética, as emissões de gases poluentes e a redução dos espaços urbanos, o que traz sérias consequências à qualidade de vida da população.

Figura 1 - Evolução da frota de veículos, do PIB *per capita* e da população no Brasil, 1998-2010



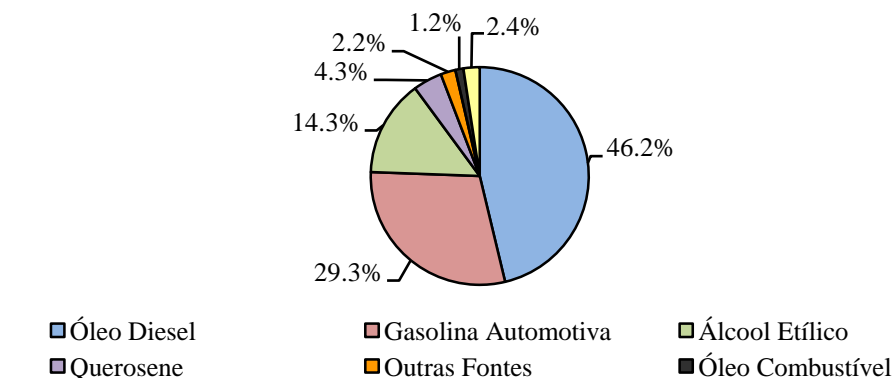
Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no DENATRAN, 2013; IBGE, 2014

O uso do automóvel também traz consequências positivas para a sociedade. Segundo Vasconcellos e Mendonça (2010), a indústria automobilística foi importante para o contexto do transporte motorizado individual na disputa com o transporte público de massa e, também para o governo federal como fonte de receitas de impostos. Outro argumento a favor do uso do automóvel é em relação ao deslocamento mais rápido da residência para o local de trabalho, de forma a aumentar a produtividade do trabalho. O automóvel é uma alternativa de deslocamento possível devido ao serviço ruim prestado pelo transporte urbano público. Embora os automóveis sejam importantes na prestação de serviços à população, o seu padrão ineficiente de uso para deslocamento ao trabalho gera consequências negativas para a sociedade.

Em decorrência da formação das cidades e das grandes aglomerações, um dos problemas mais comuns é o maior tráfego. Isso conduz a espaços urbanos cada vez mais congestionados, com custos maiores de dinheiro e tempo de deslocamento e problemas ambientais, como a poluição. No Brasil, 52,21% do total dos trabalhadores empregados fora do domicílio gastaram de seis a trinta minutos no deslocamento da residência ao local de trabalho em 2010. Cerca de 11,4% levaram mais de uma hora. O tempo médio de deslocamento foi de 32 minutos (CENSO/IBGE, 2010). Independente dos ganhos das economias de aglomeração, o mau planejamento urbano conduz a espaços cada vez mais congestionados nas cidades, maior tempo de deslocamento, e como consequência, menor produtividade e menor eficiência energética em áreas urbanas. Por isso, a importância de repensar as políticas de transporte urbano e mobilidade do ponto de vista da eficiência energética.

Em termos de consumo de energia, a ampliação da frota de veículos em circulação no Brasil repercute no aumento do consumo de combustíveis. De 1970 a 2000, o consumo de gasolina automotiva aumentou 80,0%. Como consequência, nos últimos anos, 2010 a 2012, existem uma pressão crescente do consumo de gasolina sobre a produção. O consumo energético de gasolina está superando a sua produção. A gasolina respondeu por 29,30% do consumo de energia no setor de transportes e o óleo diesel por 46,20% em 2013 (Figura 2). O grande problema desse consumo exagerado de combustíveis fósseis é a emissão de poluentes. As políticas de eficiência energética são uma ferramenta crucial para conter o crescimento acelerado do consumo de energia, contribuindo para reduzir as emissões de gases poluentes e atenuando o esgotamento dos recursos energéticos.

Figura 2 – Estrutura do consumo de energia no setor de transportes no Brasil, por combustível, 2013



Fonte: Brasil (2014a).

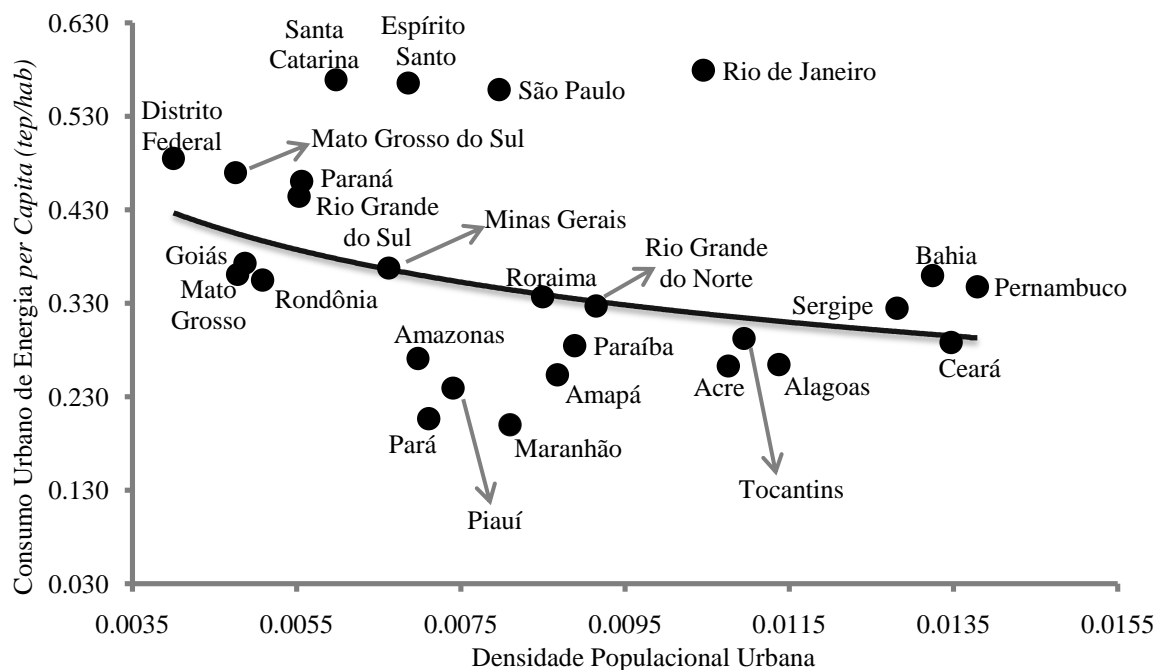
Em relação à energia elétrica, esta mantém uma considerável participação no consumo energético residencial. A maioria dos equipamentos presentes nas residências requer esta fonte de energia. A expansão acelerada do consumo de energia elétrica embora possa representar uma melhoria da qualidade de vida, também apresenta algumas consequências a serem avaliadas. A possibilidade de esgotamento dos recursos, os impactos ao meio ambiente e os elevados níveis de investimentos exigidos na busca de novas fontes de energia, são algumas dessas consequências. Essas seriam as principais justificativas para as políticas voltadas ao uso eficiente de energia.

Os estudos da literatura internacional tem ressaltado a importância da ocupação da terra e das políticas de transporte sobre o consumo de energia. Recentemente, Glaeser e Kahn (2004) analisaram o fenômeno do espalhamento urbano³ para os Estados Unidos, indicando como causa o uso massivo do automóvel. Brownsntone e Golob (2009) mostram que a densidade habitacional é inversamente proporcional ao consumo de energia (combustível). Newman e Kenworthy (1989a e 1989b) enfatizaram que o padrão de cidades espalhadas com sistemas de transporte direcionados ao uso do automóvel, não pode ser visto como mais econômico em relação à energia, ou seja, o mais eficiente. Naess (1995) percebeu que existe uma forte relação entre uso de energia *per capita* e área urbana *per capita* para os países da Noruega, Suécia, Dinamarca e Islândia. O autor constatou que existe o consumo exacerbado de petróleo e a cidade espalhada não é a forma mais econômica do ponto de vista energético. Newman *et al.* (1995) relataram o perfil das cidades com dois padrões de desenvolvimento. Um envolve o espalhamento e, logo, a baixa densidade. O outro enfatiza o transporte público e as altas concentrações de residências e empregos nos subcentros das cidades. Portanto, o desenvolvimento das cidades é abordado da seguinte forma: cidade densa e transporte público, em contraste, cidade espalhada e automóvel.

A Figura 3 mostra o consumo total de energia no meio urbano, exclusive o consumo industrial, e a densidade populacional urbana. Pode-se observar que quanto mais densa é a Unidade da Federação, menor é o consumo *per capita* de energia. No entanto, cabe ressaltar que os padrões de consumo *per capita* e densidade populacional urbana ainda precisam ser mais bem investigados, uma vez que muitas cidades com elevada densidade populacional são da região Nordeste, que também apresenta menor renda.

³ Nos EUA, o termo é *urban sprawl*. Este surgiu na década de 60 com a definição de urbanização em baixas densidades, não planejada e dependente do automóvel (NADALIN, 2010; KNAAP; TALEN, 2005).

Figura 3 – Consumo total de energia no meio urbano, exclusive o consumo industrial, e densidade populacional urbana por Unidade da Federação: 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014, com base em BEN (2014); EPE (2013); ANP (2014); GASNET (2014); CENSO/IBGE (2010); EMBRAPA (2005).

Nota: A densidade populacional urbana foi calculada com base na população urbana em cada UF e sua área urbana em m².

As cidades mais compactas e com maior densidade populacional urbana tendem a consumir menos energia *per capita*, devido à menor dependência dos automóveis. Uma malha urbana densa não avança sobre o ambiente no seu entorno, preservando espaços naturais e os ecossistemas, e a menor impermeabilização dos solos. Os sistemas de transportes podem ter maior frequência e uma melhora no serviço prestado devido ao maior número de usuários por zona de transporte. Conforme Lima *et al.* (2003), as cidades europeias na busca por padrões de sustentabilidade são orientadas a esta forma urbana compacta e ao transporte público de massa. Por outro lado, as cidades mais espalhadas possuem um maior consumo *per capita* de energia. A literatura referente aos processos de dispersão urbana mostra que são constantes as ligações entre o espalhamento urbano e o desencadeamento de problemas ambientais variados. As cidades mais dispersas envolvem maiores distâncias para chegar aos destinos intencionados e aumento dos congestionamentos. Isso leva a maior dependência da mobilidade individual por meio do uso do automóvel e aumento do consumo de combustível. Como consequência, ocorre o aumento da emissão de poluentes atmosféricos.

No estudo envolvendo os consumos de gasolina *per capita* nas cidades americanas, Newman e Kenworthy (1989a) mostraram que o processo de reurbanização e reorientação das prioridades pelo sistema de transporte são medidas que podem ser adotadas para diminuir a dependência do automóvel. O mesmo estudo enfatiza que a reurbanização intensificaria as atividades urbanas dentro da região já urbanizada. Gosling e Walking (1992) mostraram que a eficiência energética é um importante elemento de consideração do planejamento urbano. Kenworthy e Laube (1999) também salientaram que uma região pode reformular seus sistemas de transportes mais orientados aos modos não-motorizados. A redução no consumo de energia para o setor dos transportes carece de políticas de ordenamento do território juntamente com planejamento dos transportes e mobilidade, a fim de reduzir a dependência

dos automóveis (RIBEIRO *et al.*, 2007). Woodcock *et al.* (2007) sugerem que, além de aumentar as fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, é necessário evitar os deslocamentos pendulares e diminuir a distância de deslocamento. Assim, a densidade urbana é um importante elemento no consumo de energia.

No Brasil, existem poucos estudos ligando as áreas de Economia Urbana e de Economia de Energia. Pampolha (1999), em um estudo sobre as 27 capitais brasileiras, mostrou o relacionamento entre espalhamento urbano e consumo de energia com transportes. O autor concluiu que a população e as variáveis espaciais relacionadas às áreas urbanizadas explicam o consumo de energia por transporte em 92,0% da variação observada. Costa (2001) avaliou o consumo de energia com transportes para municípios acima de 50 mil habitantes no Estado de São Paulo e confirmou a influência da densidade populacional sobre o consumo de energia com transportes. Com base nesses estudos, a implementação de estratégias de conservação de energia à escala urbana seria fundamental para a economia brasileira e, ao mesmo tempo, um importante nicho de pesquisa.

O adensamento urbano previsto para os próximos anos, a intensificação do uso do automóvel e seu padrão ineficiente de uso, descritos anteriormente, indicam a necessidade e a importância de se pensar nos problemas que surgirão ao nível da ocupação do solo e uso de energia. Por isso, é relevante estudar a relação entre as opções de desenvolvimento urbano e o consumo energético no Brasil.

3. ECONOMIA ESPACIAL URBANA MONOCÊNTRICA E MODELAGEM NUMÉRICA DE SIMULAÇÃO

O modelo de Von Thünen, de localização do uso do solo, evidencia o uso de terras agrícolas e fornece a base para os trabalhos elaborados no campo da Economia Urbana. Adaptado por Alonso (1964) para o contexto das cidades, o modelo mantém o cenário de único centro de empregos (negócios). Os fazendeiros são substituídos por trabalhadores no percurso da residência para o local de trabalho e os custos de transporte são analisados como custos de deslocamento diário. Este modelo de cidade monocêntrica foi a estrutura dominante da área de Economia Urbana nos anos 70 e possibilitou grandes contribuições teóricas na área de Economia Urbana (ALONSO, 1964; MILLS, 1967; MUTH, 1969). Estes trabalhos inspiraram a chamada Nova Economia Urbana (NEU).

O modelo básico de Economia Urbana é conhecido como modelo AMM (ALONSO, 1964; MILLS, 1967; MUTH, 1969). Este trabalha com a ideia de um *trade-off* entre acessibilidade aos centros de emprego e a escolha de residência pelas famílias. Ou seja, as decisões são tomadas com base nos custos de deslocamento diário da residência para o local de trabalho e o desejo de espaço habitacional. A configuração espacial é de um círculo com raio r do centro até o limite da área urbana. As cidades possuem uma região central que proporciona empregos. Nesta literatura, este centro é chamado *Central Business District* (CBD).⁴ O CBD é o local com maior densidade de empregos e onde encontram-se as atividades tradicionalmente *locus* de comércio, serviços e funcionalismo público. No ponto mais distante do CBD, os indivíduos consomem uma maior quantidade de terras. Entretanto, estes incorrem em ambos os custos com transporte e tempo despendido maiores. Os indivíduos que moram próximos ao CBD têm lotes de menor tamanho, mas em compensação, têm maior acessibilidade ao emprego.

⁴ O CBD também é denominado na literatura de centro de negócios.

A formalização mais moderna do modelo AMM segue a estruturação apresentada por Fujita (1989).⁵ Nessa formalização, considera-se: N trabalhadores idênticos (consumidores) que se deslocam diariamente, ida e volta, para o CBD. Ao nível dos consumidores existirá uma função utilidade estritamente quase-côncava caracterizada como $U(z, s)$, onde z representa a quantidade do bem composto, que inclui todos os bens de consumo com exceção do solo, e s é o consumo do bem habitação, ou seja, o consumo de terra. Admite-se que o consumo do bem habitação é representado pelo tamanho do lote da residência. Assume-se ainda que o preço da sub-cesta z é o numerário, independente do local de residência, e o preço do bem habitação P_s varia conforme a localização na cidade. Com base nesses elementos, a função utilidade é dada por:

$$U(z, s) \tag{01}$$

Com

$$\frac{\partial U(z, s)}{\partial z} > 0 \quad \frac{\partial U(z, s)}{\partial s} > 0 \tag{02}$$

A função $U(z, s)$ é crescente em ambos os bens. Um consumidor gastará sua renda Y na aquisição do bem composto, com renda da terra e uma parcela com transporte. Portanto, a uma distância r do CBD ($r=0$ no CBD), a restrição orçamentária do consumidor é assumida como:

$$z + R(r)s + T(r) = Y \tag{03}$$

Na equação (03), $R(r)$ é o aluguel por unidade de terra à distância r do CBD; $T(r)$ é o custo de deslocamento para o trabalho em r . O problema do consumidor pode então ser expresso como:

$$\max_{r, z, s} U(z, s) \tag{04}$$

Sujeito a

$$z + R(r)s = Y - T(r) \tag{05}$$

No problema de maximização da utilidade em (04) e (05), $Y - T(r)$ é a renda líquida em r , isto é, a renda disponível para consumir determinadas quantidades de z e s . Além disso, $r \geq 0$, $z > 0$ e $s > 0$. Conforme Fujita (1989), o modelo pode ser orientado pelo modelo básico da escolha residencial do consumidor. As escolhas locacionais são feitas sob condições de competição perfeita, com o objetivo de maximizar a utilidade. Cabe ao consumidor à escolha de somente um local de residência, sendo essa restrita pelo aluguel da terra, o custo de deslocamento ao trabalho e sua restrição orçamentária. Sob a utilidade é assumido que, independente da localização, os consumidores são idênticos em preferências e renda, e por isso devem obter a mesma utilidade. A partir deste contexto teórico, originou-se o conceito de função *bid rent* (ALONSO, 1964).

⁵ Uma abordagem consolidada sobre a estruturação do modelo AMM também pode ser encontrada em Brueckner (1987).

Uma função *bid rent*, ou seja uma função oferta de aluguel, $\psi(r,u)$, é definida como o aluguel máximo por unidade de terra que o consumidor está disposto a pagar em cada localização r , para um nível de utilidade constante, u (FUJITA, 1989). Com base no problema de maximização, a função *bid rent* se define como:

$$\psi(r,u) = \max_{z,s} \left\{ \frac{Y - T(r) - z}{s}, s.a. \ U(z,s) = u \right\} \quad (06)$$

Na equação (06), $Y - T(r) - z$ é a quantidade de unidades monetárias disponíveis para a despesa com o aluguel da terra; $[Y - T(r) - z]/s$ configura o aluguel por unidade de terra em r , isto é, $R(r)$. Para obter a função *bid rent*, é necessário maximizar esse aluguel a partir de uma cesta de consumo apropriada, sujeita à restrição $U(z,s) = u$. A solução desta restrição de utilidade em relação ao bem composto z permite que se encontre a equação da curva de indiferença $z = Z(s,u)$, que é uma função de s e u . Consequentemente, a *bid rent* pode ser reescrita como uma expressão do problema da escolha residencial sem restrição:

$$\psi(r,u) = \max_s \frac{Y - T(r) - Z(s,u)}{s} \quad (07)$$

Ao obter a solução dos problemas de maximização em (06) e (07), encontra-se o tamanho do lote denotado por $S(r,u)$. Para a continuidade da análise deste modelo, é importante obter as demandas Marshalliana e Hicksiana por terra, em que o preço do bem composto é um. A primeira é encontrada a partir da solução do problema de maximização da utilidade sobre a renda da terra (R) e a renda líquida (I), como segue:

$$\max_{z,s} U(z,s) \quad (08)$$

Sujeito a

$$z + Rs = I \quad (09)$$

A demanda Marshalliana, como função de R e I , é justamente o tamanho do lote ideal, sendo denotada por $\hat{s}(R,I)$. A partir desta consideração, o valor máximo para o problema é dado pela função de utilidade indireta:

$$V(R,I) = \max_{z,s} \{U(z,s) / z + Rs = I\} \quad (10)$$

Consequentemente, pela definição de *bid rent*, temos:

$$u = V[\psi(r,u), Y - T(r)] \quad (11)$$

Quanto à demanda Hicksiana, esta é obtida da solução do seguinte problema de minimização:

$$\min_{z,s} z + Rs \quad (12)$$

Sujeito a

$$U(z, s) = u \quad (13)$$

Neste problema de minimização de despesas com aluguel de terras R e nível de utilidade u , obtém-se o tamanho do lote ideal, que é justamente a função de demanda Hicksiana por terra, $\tilde{s}(R, u)$. Baseado nas demandas Marshalliana e Hicksiana, uma identidade que define a função de demanda pelo tamanho do lote pode ser extraída como:

$$S(r, u) \equiv \hat{s}[\psi(r, u), Y - T(r)] \equiv \tilde{s}[\psi(r, u), u] \quad (14)$$

Uma das principais contribuições desta análise de estrutura urbana diz respeito às propriedades da função *bid rent* e do tamanho do lote. Ao aplicar o teorema do envelope em $u = V[\psi(r, u), Y - T(r)]$, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi(r, u)}{\partial r} &= -\frac{T'(r)}{S(r, u)} < 0 \\ \frac{\partial \psi(r, u)}{\partial u} &= -\frac{1}{S(r, u)} \frac{\partial Z(s, u)}{\partial u} < 0 \end{aligned} \quad (15)$$

A equação (15) implica que o tamanho do lote (preço por metro quadrado) varia em função do custo de deslocamento diário da residência para o local de trabalho em r . A inclinação da *bid rent* depende do custo de transporte $T(r)$. Em outras palavras, a *bid rent* diminui com a distância ao CBD, devido a compensação aos consumidores dos crescentes custos pendulares. O consumidor, ao escolher otimamente sua localização residencial, enfrenta um *trade-off*. Quanto mais distante do CBD, maiores serão o tempo despendido e os custos de transporte (combustível, depreciação, custo do veículo, tarifa do transporte público e outros custos), menor será o aluguel por unidade de terra e maior o consumo de terra (lotes maiores). Em contraste, quanto mais próximo ao centro de empregos, mais elevado será o aluguel da terra, porém os custos pendulares e o consumo de terra são ambos menores. Em outras palavras, os consumidores trocam o aumento nos custos de transporte por mais espaço para a residência.

Lançando luz sobre o comportamento da indústria de produção de habitação, assume-se que a produção de habitação é dada por terra (l) e capital (k) como insumos, sendo sua função denotada $H(k, l)$. Esta produção designa uma relação entre o volume de capital investido e a quantidade de terra usada. A partir desta consideração, presume-se que as famílias residem em apartamentos com diversas unidades de moradia, inserindo a verticalidade das habitações. Dois preços são considerados: o preço do aluguel de moradia, pago pelas famílias, e o preço do aluguel da terra, pago pelas firmas. Segundo Brueckner (1987), o lucro na produção de habitação é dado por

$$\pi = pH(k, l) - ik - Rl \quad (16)$$

Na equação (16), R é a renda da terra por metro quadrado; i é a renda por unidade de capital. Denotando $D = k/l$ como a razão capital-terra ou densidade estrutural, que representa a verticalidade das habitações, e resolvendo o problema de maximização do lucro, chega-se às seguintes condições:

$$\frac{\partial R}{\partial r} < 0; \quad \frac{\partial D}{\partial r} < 0 \quad (17)$$

A renda da terra e a densidade estrutural decrescem em função da distância r do CBD. Quanto mais próximo do centro, maior é a medida da altura dos edifícios (D) e também o nível de capital. Ou seja, próximo do CBD a terra é mais cara. Nas localizações mais distantes, utiliza-se mais terra e menos capital. Conforme Brueckner (1987) observa-se nas cidades reduções da altura dos edifícios na medida em que aumenta a distância em relação ao centro de negócios

A partir destas considerações, duas possibilidades são permitidas para análise do modelo: cidade fechada e cidade aberta. Para o modelo de cidade fechada, o suposto básico é que não existe migração. O tamanho da população (N) é exógeno e a utilidade (u) é determinada endogenamente no equilíbrio entre oferta e demanda por habitação. Um aumento na renda agrícola (R_A) conduz a uma redução do tamanho espacial da cidade e, portanto, ocorre uma diminuição do limite da área urbana. O nível de utilidade também se torna inferior. Desse modo, o tamanho do lote seria menor e a densidade populacional aumentaria em todas as localizações. Quando a renda das famílias, Y , aumenta, os trabalhadores ficam em condições melhores e o nível de utilidade aumenta. Isso implica no acréscimo da demanda por habitação e, conseqüentemente, no crescimento da cidade. Os impactos causados pelo aumento dos custos de deslocamento ($T(r)$) seriam contrários aos gerados pelo acréscimo da renda familiar (BRUECKNER, 1987).

No modelo de cidade aberta, o suposto básico é que podem ocorrer fluxos migratórios. A população (N) é endógena e a utilidade (u) obtida pelos consumidores é fixada exogenamente. Um aumento na renda agrícola (R_A) tem um impacto simples sobre o equilíbrio. A fronteira da cidade seria encolhida, reduzindo a população e permanecendo inalterada a densidade das localidades interiores. No caso de um acréscimo da renda familiar (Y), isso provocaria aumentos no preço de habitação, na renda da terra e na densidade estrutural. A cidade tornar-se-ia maior com prédios mais altos (expansão da área da cidade), que por sua vez, faz os tamanhos da habitação caírem. Os indivíduos seriam atraídos para a cidade. Uma cidade com renda elevada teria uma maior população e também uma área maior. Desse modo, essa cidade seria mais densa e possuiria um preço por metro quadrado de habitação mais caro, em relação a uma cidade com renda baixa.

O ponto de partida para a aplicação computacional de simulação urbana foi o trabalho de Muth (1975). Este simulou cidades americanas caracterizadas por viagens pendulares de automóvel. Com esse trabalho, surgiram outros estudos para investigar os padrões de desenvolvimento urbano (ALTMANN; DESALVO, 1981; SULLIVAN, 1985; BERTAUD; BRUECKNER, 2005). Um estudo americano recente tem ressaltado a importância da ligação entre as áreas urbanas e o uso de energia por meio de modelos numéricos de simulação urbana. Larson, Liu e Yezer (2012) mostraram que aumentos nos preços da gasolina resultam em redução de energia residencial, devido aos efeitos indiretos dos preços de habitação próximos ao CBD. Com este efeito, a cidade torna-se mais compacta e a densidade estrutural aumenta próximo ao centro de empregos. O modelo, desenvolvido por Larson, Liu e Yezer (2012), surgiu em decorrência da falta de um modelo que relacione desenvolvimento urbano e políticas de transportes para o uso de energia nas cidades. A literatura sobre os modelos numéricos de simulação urbana aplicados à economia brasileira é limitada, principalmente,

pela dificuldade, ou mesmo impossibilidade, da obtenção de dados das variáveis urbanas.

A contribuição relevante de um modelo como o proposto no presente artigo é a possibilidade de analisar a ligação entre os resultados de um modelo numérico de simulação urbana e as consequências no consumo residencial de energia e no deslocamento diário da residência para o local de trabalho. Um ponto positivo da abordagem proposta é que, no futuro, modelos urbanos de simulação numérica desse tipo possam ser utilizados para avaliar as políticas de desenvolvimento urbano e as implicações energéticas em áreas urbanas (LARSON *et al.*, 2012).

4. MODELAGEM DE SIMULAÇÃO URBANA E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAGEM PARA O BRASIL

A estrutura teórica do modelo a ser utilizado nas simulações deriva do modelo *Urban Energy Footprint Model* (UEFM) desenvolvido por Larson, Liu e Yezer (2012), bem como os respectivos avanços de Larson e Yezer (2014). Este modelo está amparado nos supostos da teoria de cidades monocêntricas apresentada na seção 3. O modelo de cidade aberta será o apropriado para conduzir as simulações. A justificativa é a livre circulação de indivíduos dentro e fora da cidade. Algumas características do UEFM merecem destaque: o emprego exógeno fora do CBD, o congestionamento endógeno e a relação não linear entre o consumo de combustível e a velocidade, que serão destacadas ao longo desta seção.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO URBANA

Um importante requisito de equilíbrio para o tipo de modelagem proposta é a condição de iso-utilidade. Segundo esta cada família na cidade conseguirá a mesma utilidade, não importando a localização da residência. Isso garante a seguinte “equação de Muth”:

$$\frac{dr}{dk} = -\frac{dT}{dk} \frac{1}{h} \quad (18)$$

Na equação (18), r é o aluguel por unidade de terra; k é a distância ao centro; T é a soma do tempo despendido e do custo de deslocamento, isto é, tempo e dinheiro gastos nos deslocamentos pendulares; h é o tamanho do lote das residências. A equação (18) determina um padrão espacial dos preços de habitação. O preço reduz com a distância k do CBD a uma taxa suficiente para compensar o custo de deslocamento diário da residência para o local de trabalho. Isso significa que o consumidor que reside mais distante do CBD tem maiores custos com transporte, mas é compensado com uma residência maior. Caso isso não ocorresse, todos os indivíduos viveriam próximos ao centro (LARSON *et al.*, 2012; LARSON; YEZER, 2014).

Com relação ao emprego, este é dividido entre o CBD e o local fora do centro de negócios, respectivamente, conforme a equação 19. Assim, existem indivíduos que se deslocam diariamente, ida e volta, para o CBD e aqueles que trabalham localmente, sendo estes chamados de *walkers*. A distribuição espacial dos locais de trabalho é determinada pelo gradiente da densidade de emprego, que segue uma exponencial negativa. Diversos trabalhos estimam a função de densidade de emprego, como exemplo, McMillen (2004) e para o Brasil, Nadalin (2010). O emprego total é dado por

$$E = E_{CBD} + E_{OCBD} = E_{CBD} + \int_{K_{CBD}}^{K_{E^*}} E_{dens}(0)e^{-gk} dk \quad (19)$$

Na equação (19), k é a distância ao centro; k_{CBD} é o raio médio do CBD; $E_{dens}(0)$ é a densidade de emprego no centro do CBD com parâmetro de decaimento, ou gradiente de densidade, g ; K_{E^*} representa os empregos locais preenchidos fora do CBD.

O modelo calibrado replica o padrão espacial de habitação para cinco cidades brasileiras,⁶ bem como os supostos teóricos da Economia Urbana Monocêntrica. A função de utilidade, $U(y, h)$, é calibrada para produzir renda e elasticidades-preço da demanda por habitação que são consistentes com a literatura, assumida ser uma *Constant Elasticity of Substitution* (CES):

$$U = [\beta_1 y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta} \quad (20)$$

Na função em (20), h é o consumo de habitação, representado pelo tamanho do lote de residência medido em metros quadrados; y é o consumo do bem composto, que inclui todos os bens de consumo com exceção do solo; β_1 e β_2 são os parâmetros estruturais da distribuição; $1/(1-\eta)$ é a elasticidade de substituição constante, entre o tamanho do lote e o bem composto. A restrição orçamentária das famílias é dada por $I = y + rh + T$, em que I é a renda das famílias; T é a soma do tempo despendido e do custo de deslocamento; r é o aluguel por unidade de terra; o preço do bem composto é definido como o *numeraire* (numerário), ou seja, normalizado em um.

A função de produção da habitação, perfeitamente competitiva e com retornos constantes, com base numa especificação CES é dada por:

$$H = A[\alpha_1 S^\rho + \alpha_2 L^\rho]^{1/\rho} \quad (21)$$

Nesta função, H é a produção de habitações, com S e L como os insumos estrutura e terra, respectivamente; α_1 e α_2 são os parâmetros estruturais da distribuição; $1/(1-\rho)$ é a elasticidade de substituição constante entre S e L . O insumo estrutura é a estrutura da habitação. Uma habitação é construída sobre a terra, de modo que a terra também está na função de produção. A terra e as estruturas são substituíveis até certo ponto, ou seja, é possível construir mais unidades habitacionais em um lote vazio ou em cima de outra estrutura, aumentando a densidade. O capital é a estrutura das edificações, representado por S . Este insumo estrutura está em unidades monetárias, isto é, o numerário na função de produção. Já o insumo terra é representado pelo tamanho do lote.

Para analisar a relação entre a velocidade de deslocamento e o volume de tráfego, o modelo UEFM usa a abordagem de Muth (1975) e Sullivan (1985). A velocidade é uma função não linear limitada, onde: $v(k_{CBD}) = v_{mínima}$ e $v(k) = v_{máxima}$. Desse modo, a velocidade de deslocamento diário num determinado local está inversamente associada com o volume de tráfego, conforme Larson, Liu e Yezer (2012) e Larson e Yezer (2014):

⁶ As cinco cidades são Belém, Feira de Santana, Cuiabá, Juiz de Fora e Londrina.

$$v(k) = \frac{1}{a + bV(k)^c} \quad (22)$$

Na equação (22), $v(k)$ é a velocidade de deslocamento diário a uma distância k do CBD; $V(k)$ é o volume de tráfego através da localização k ; a, b, c são os parâmetros da função de congestionamento. Outros fatores como a condição de pavimento, a geometria da via e o comportamento do motorista, dentre outros, também podem influenciar a velocidade dos veículos.

Os trabalhadores se deslocam de suas residências para o local de trabalho por meio do automóvel. Para efeito de simulação, considera-se o deslocamento por automóvel, como meio de transporte privado. Desse modo, o transporte público não será abordado no presente trabalho. Logo, os trabalhadores incorrem em custos de transportes ou se deslocam sem custo e sem consumo de energia, para seus empregos locais (*walkers*). Nesse caso, os postos de trabalho locais oferecem um salário mais baixo do que os trabalhos localizados no CBD, ou seja, $W_L = W - T(k)$, onde W é o salário, ou seja, a renda das famílias que se deslocam diariamente para o CBD; $T(k)$ é a soma de tempo despendido e do custo de deslocamento em função da distância ao centro.

Com base na especificação do modelo UEFM, os custos de deslocamento a caminho do CBD incluem os custos fixos anuais de possuir um automóvel (m_0), a depreciação do automóvel por milha rodada (m_1) e o custo do combustível. Este último está associado com a velocidade do veículo de acordo com uma função do processo de engenharia denotada por $g = G(v(k))$ e o preço da gasolina p_g . Destaca-se que o combustível usado como referência é a gasolina. O custo de tempo despendido é uma fração constante da taxa real salarial ΓW . Esse custo será representado pelo percentual da renda das famílias gasto com transporte urbano. Logo, o custo de deslocamento, segundo Larson e Yezer (2014), é dado por:

$$T(k) = m_0 + m_1k + p_g \int_0^k \frac{1}{G(v(k))} dk + \Gamma W \int_0^k \frac{1}{v(k)} dk \quad (23)$$

A equação (23) desempenha um importante papel no modelo proposto, pois mudanças nos custos marginais de transporte, devido a um aumento no preço da gasolina, por exemplo, tem efeitos diretos sobre a estrutura das cidades. O estacionamento por dia de trabalho não foi considerado neste trabalho para facilitar as simulações e diminuir o grau de complexidade da modelagem. No entanto, o modelo não é oculto em relação ao preço de estacionamento. Essa variável pode ser incluída e, é importante considerar que se o preço da terra sobe no CBD, ou o custo do estacionamento, isso desestimula a moradia longe do centro de empregos, bem como o deslocamento via automóvel.

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO DOMÉSTICO

Uma vez implementado e calibrado o modelo será necessário estimar o consumo de energia das residências ou obter as elasticidades das equações de consumo por meio da literatura. Isso permite o relacionamento entre o uso doméstico de energia e as características da habitação geradas pelo modelo de simulação urbana. Os parâmetros encontrados são utilizados no processo de simulação, para calcular as implicações do consumo de energia de diversos

eventos do mercado e das políticas de desenvolvimento urbano. Por esse motivo, são considerados quatro itens principais que afetam o consumo de energia das residências: área construída em pés quadrados, renda domiciliar, preço de eletricidade medido pela tarifa média de energia elétrica e tipo de estrutura, isto é, as tipologias de edificações residenciais (casas e apartamentos, neste trabalho). A equação pode ser estimada por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) ou qualquer outro método semelhante, podendo ser descrita sob a forma funcional log-linear, do seguinte modo:

$$\ln C_i = \phi_1 + \phi_2 \ln A_i + \phi_3 \ln Y_i + \phi_4 \ln P_i + \phi_5 S'_i + \varepsilon_i \quad (24)$$

A equação (24) tem C como o consumo energético da família i ; A como a área construída da residência (casas e apartamentos) *per capita*; Y como a renda domiciliar *per capita*; P como o preço de eletricidade, mensurado pela tarifa média de energia elétrica; S como um vetor de variáveis que descreve o tipo de estrutura *per capita*, isto é, a tipologia habitacional no Brasil (casas e apartamentos); $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5$ são os parâmetros comportamentais a serem estimados ou obtidos da literatura. Os coeficientes ϕ_2, ϕ_3 e ϕ_4 representam, respectivamente, as elasticidades da demanda residencial de energia das famílias com relação à área construída da residência, as elasticidades-renda domiciliar e preço da eletricidade.

4.3 CONSUMO ENERGÉTICO DOS VEÍCULOS

A equação de consumo energético dos veículos, discutida por Larson, Liu e Yezer (2012), deriva dos estudos sobre a eficiência do combustível de West *et al.* (1999). O consumo de combustível de um veículo, para ciclos de condução urbana, é estimado por um modelo polinomial simplificado, apenas em função de sua velocidade. Neste caso, outros itens relevantes do consumo, como a massa do veículo, potência, aceleração, o nível de ocupação e o ciclo de condução não são contabilizados por esta função. A equação do consumo energético dos veículos é dada por:

$$mpg_i = d + \sum_{j=1}^4 \sigma_j v_i^j + e_i \quad (25)$$

A equação (25) apresenta o consumo de combustível como uma função da velocidade desenvolvida por certo veículo. Nesta, mpg é o combustível em milhas por galão; v é a velocidade dada em milhas por hora; d é o valor da constante; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ são os parâmetros comportamentais a serem estimados. As estimativas destes parâmetros serão usadas para a simulação do consumo de gasolina como função da velocidade desenvolvida pelo veículo.

4.4 ESCOLHA DAS CIDADES BRASILEIRAS

Seguindo a indicação da literatura, em Larson, Liu e Yezer (2012), foram selecionadas cinco cidades no país, cujo padrão inicial é a existência de um único centro de negócios e localizado na sua região central. Para evitar a presença de cidades com padrão policêntrico foram selecionadas cinco cidades médias no Brasil. As cidades brasileiras representam bem este modelo monocêntrico. A maioria das cidades são monocêntricas, com exceção das capitais, que possuem mais de um centro principal de empregos. Nas cidades policêntricas reforça-se a importância das economias de aglomeração. Com o objetivo de obter parâmetros estruturais

para uma cidade monocêntrica representativa do Brasil, optou-se por selecionar uma cidade de cada região do país. As cidades escolhidas são similares em termos de PIB *per capita*, mas são completamente diferentes em termos de regionalização. Estas cidades foram: Belém (PA) – Região Norte, Feira de Santana (BA) – Região Nordeste, Cuiabá (MT) – Região Centro-oeste, Juiz de Fora (MG) – Região Sudeste, Londrina (PR) – Região Sul.

A partir de dados do Censo Demográfico do IBGE (2010) e do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013), foram ordenadas as características das cidades médias de cada região, enfatizando as características demográficas, o PIB *per capita*, a área total e demais indicadores socioeconômicos. Desse modo, foram escolhidas as cinco cidades com maior semelhança, preservando a representatividade de uma para cada região do país.

4.5 BASE DE DADOS E PARÂMETROS-CHAVE

O Quadro 1 mostra em detalhes os dados necessários para a calibragem do modelo, com a descrição de cada variável, as unidades de medida e as respectivas fontes, para o ano-base 2010 empregado nas simulações.

Além dos parâmetros estruturais das funções de utilidade e de produção de habitação provenientes da calibragem, também é necessário obter os parâmetros comportamentais destas funções derivados de estimações econométricas. Este conjunto de dados foi obtido da literatura a partir de Larson, Liu e Yezer (2012) e Larson e Yezer (2014). A falta de estimativas para os parâmetros de substituição nas funções de utilidade e produção de habitação no Brasil torna necessário recorrer a parâmetros da literatura internacional. Isso pode ser explicado pela ausência de pesquisas brasileiras na área e pela dificuldade de obtenção dos dados de algumas variáveis de escolha residencial. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo.

Quadro 1 – Dados para a calibragem do modelo, 2010*

| Variável | Descrição | Unidade** | Fonte |
|--|--|------------------|---|
| Tamanho do Lote | Área total do terreno | acre | Prefeituras municipais |
| Área da residência | Área construída | pé quadrado | Prefeituras municipais |
| Área da cidade | Área da unidade territorial | milhas quadradas | IBGE |
| Raio da cidade ⁷ | Raio da cidade | milhas | Elaboração própria |
| Renda média domiciliar | Renda média domiciliar | dólares | IBGE |
| Unidades de habitação | Número total de domicílios | unidades | IBGE |
| Tempo de deslocamento casa-trabalho | Média ponderada | minutos | IBGE |
| Percentual de casas | Percentual de casas | % | IBGE |
| Percentual de apartamentos | Percentual de apartamentos | % | IBGE |
| Energia consumida na residência, <i>per capita</i> | Energia consumida na residência <i>per capita</i> | mmBTUs/hab*** | CELPA, COELBA, CEMAT, CEMIG, COPEL, ANP, IBGE |
| Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i> | Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i> | mmBTUs/hab | ANP, IBGE |

Fonte: Elaboração própria, 2014

Nota: *Ano-base dos dados utilizados para a calibragem do modelo empregado nas simulações

** Unidades de medida no padrão americano para facilitar as comparações com a literatura internacional

***Tep=Tonelada Equivalente de Petróleo.

⁷ O raio da cidade parte do CBD até a extremidade da cidade. Assumindo um círculo, o raio é dado por $k = \sqrt{A/\pi}$, em que k é o raio, A é a área da cidade e $\pi=3.14$.

Tabela 1 – Parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo de simulação urbana

| Símbolo | Descrição | Parâmetro | Unidade | Fonte |
|---|--|-----------|----------------------|--|
| Parâmetros da Função Utilidade | | | | |
| β_1 | Parâmetro do bem composto | 1 | ---- | <i>Numeraire</i> |
| β_2 | Parâmetro do tamanho do lote | 0.2030 | ---- | Calibrado |
| $1/(1-\eta)$ | Elasticidade de substituição | 0.75 | ---- | Altmann e DeSalvo (1981) |
| \bar{U} | Utilidade | 6438 | ---- | Calibrado |
| Parâmetros da Função de Produção de Habitação | | | | |
| α_1 | Parâmetro do insumo estrutura | 1.1 | ---- | Muth (1975); Altmann e DeSalvo (1981) |
| α_2 | Parâmetro do insumo terra | 0.9 | ---- | Muth (1975); Altmann e DeSalvo (1981) |
| $1/(1-\rho)$ | Elasticidade de substituição | 0.75 | ---- | Altmann e DeSalvo (1981) |
| A | Parâmetro da tecnologia | 0.32 | ---- | Calibrado |
| Parâmetros de Emprego | | | | |
| $E_{dens}(0)$ | Densidade de emprego no centro de negócios | 11641 | ---- | Calibrado |
| g | Gradiente da densidade de emprego | 0.125 | ---- | Nadalin (2010) |
| E_{CBD} / E | Percentual de trabalhadores que se deslocam diariamente para o CBD | 64 | % | Proporcional ao número de trabalhadores que se deslocam para o trabalho (CENSO 2010/IBGE) |
| K_{CBD} | Raio médio do CBD | 1 | ---- | Calibrado |
| Parâmetros da Velocidade de Deslocamento | | | | |
| v_{min} | Velocidade pendular mínima | 6.2 | milhas por hora | Adaptado para o Brasil com base em Muth (1975) |
| v_{max} | Velocidade pendular máxima | 37 | milhas por hora | Código Brasileiro de Trânsito (1997) |
| c | Parâmetro de curvatura na função de velocidade de deslocamento | 1.75 | ---- | Muth (1975) |
| t_L | Tempo de deslocamento para os trabalhadores locais | 10 | minutos | CENSO 2010/IBGE |
| Parâmetros do Custo de Deslocamento | | | | |
| Símbolo | Descrição | Parâmetro | Unidade | Fonte |
| Parâmetros do Custo de Deslocamento | | | | |
| m_0 | Custo fixo anual de possuir um automóvel | 4824.65 | dólares | Elaboração própria (2014) |
| m_1 | Custo anual da depreciação de um automóvel por milha rodado | 0.137 | dólares/milha rodada | Elaboração própria (2014) |
| p_g | Preço mínimo da gasolina | 4.6396 | dólares/galão | ANP (2014) |
| τ | Custo de tempo de deslocamento (fração do salário) | 0.5 | % | Larson <i>et al.</i> (2012) |
| Parâmetros do Uso da Terra | | | | |
| p_L^a | Preço de reserva da terra agrícola | 209 | dólares/acre | Gasques e Bastos (2008) |
| θ | Percentual de terra usado para habitação | 51 | % | Elaboração própria (2014) |
| θ_R | Percentual de terra usado para as rodovias | 21 | % | Litman (2012) |
| Parâmetros do Consumo Energético Doméstico | | | | |
| ϕ_1 | Constante | 6.02 | ---- | Adaptado de Larson <i>et al.</i> (2012) a partir da relação entre o consumo de energia dos EUA e do Brasil |

| | | | | |
|--|--|-------------|------|---|
| ϕ_2 | Elasticidade - área da residência | -0.07 | ---- | Adaptado de Lenzen <i>et al.</i> (2006) |
| ϕ_3 | Elasticidade - renda domiciliar | 0.202 | ---- | Gomes (2010) |
| ϕ_4 | Elasticidade-preço da energia elétrica | -0.111 | ---- | Gomes (2010) |
| ϕ_5 | Parâmetro da tipologia habitacional: | | | |
| | Casas | -0.0746 | --- | Larson <i>et al.</i> (2012) |
| | Apartamentos | -0.310 | | |
| Parâmetros do Consumo Energético dos Veículos | | | | |
| d | Constante | 0.23025849 | ---- | Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), CBT e INMETRO |
| σ_1 | Parâmetro do consumo de combustível | 1.933225 | ---- | Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), CBT e INMETRO |
| σ_2 | Parâmetro do consumo de combustível | -0.0520949 | ---- | Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), CBT e INMETRO |
| σ_3 | Parâmetro do consumo de combustível | 0.0006357 | ---- | Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), CBT e INMETRO |
| σ_4 | Parâmetro do consumo de combustível | -0.00000345 | ---- | Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), CBT e INMETRO |

Fonte: Elaboração própria, 2014

A partir da definição da metodologia, da escolha das cidades para obtenção dos parâmetros estruturais da cidade monocêntrica representativa e dos demais parâmetros comportamentais, o modelo de simulação urbana foi calibrado. Os resultados foram implementados computacionalmente utilizando o *software* MATLAB, versão 9.0.

5. RESULTADOS

5.1 CENÁRIO BÁSICO DA CIDADE MONOCÊNTRICA

A relação entre as variáveis reais selecionadas para as cidades monocêntricas escolhidas para o estudo e as variáveis simuladas é apresentada na Tabela 2. Os poucos pontos de divergência entre os valores reais e os valores simulados são devido à população homogênea sobre a cidade. Isso significa que o controle por dois ou mais grupos de renda, dado o tamanho das casas e apartamentos em função da renda, não é abordado neste artigo. Embora o Brasil apresente a característica de que não necessariamente se tem habitações menores no centro de empregos para famílias com renda mais elevada, o controle por grupos de renda não foi feito.

O cenário *baseline* encontrado tem a capacidade de gerar trajetórias compatíveis com a realidade, uma vez que este cenário é compatível ao observado no mundo real. Cabe ressaltar que o objetivo da calibragem é gerar uma cidade monocêntrica representativa, para testar hipóteses teóricas do campo de estudos da Economia Urbana. A modelagem adotada não necessariamente gera valores exatamente iguais aos valores médios das cinco cidades para o *baseline*, mas sim uma boa aproximação para uma cidade monocêntrica brasileira.

A imposição de um único grupo de renda fez com que a cidade simulada apresentasse valores menores que a cidade real. A área simulada da cidade é menor em relação ao valor real em 8,4%, o raio em 1,1% e, o tempo de deslocamento em 20,0%. O percentual de casas na amostra de cidades reais é ligeiramente menor do que o valor simulado em 2,53%. Já o percentual de apartamentos apresentou valores maiores que os dados reais das cidades. O

aumento da área da residência entre as cidades reais e as simuladas foi de 34,0%, enquanto o aumento do tamanho do lote foi de 71,0%.

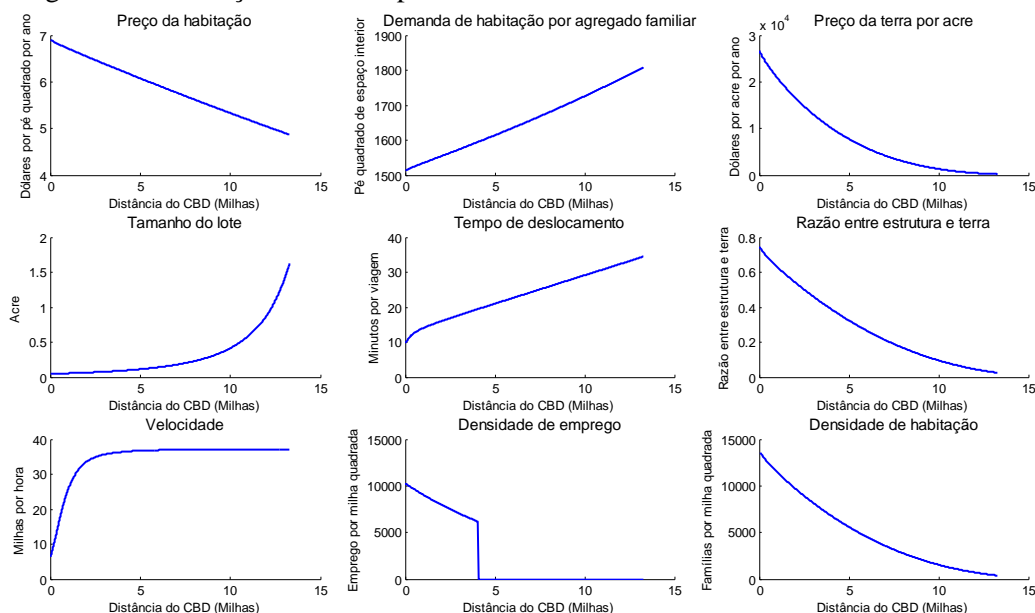
Tabela 2 – Calibragem do modelo UEFM

| Variáveis | Valores reais | Valores simulados |
|---|---------------|-------------------|
| Tamanho do lote (acres) | 0,14 | 0,24 |
| Área da residência (pés quadrado) | 1.218,58 | 1.630,79 |
| Área da cidade (milhas quadradas) | 701 | 642 |
| Raio da cidade (assumindo círculo) (milhas) | 14,446 | 14,29 |
| Renda média domiciliar (dólares) | 19.506,00 | 24.048,00 |
| Número total de residências | 201.686 | 201.686 |
| Tempo de deslocamento (minutos) | 30,5 | 24,3 |
| Percentual de casas (%) | 79,0 | 81,0 |
| Percentual de apartamentos (%) | 16,0 | 19,0 |
| Energia consumida na residência, <i>per capita</i> (mmBTUs/hab) | 4,1906 | 4,28 |
| Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i> (mmBTUs/hab) | 6,8515 | 27,17 |

Fonte: Elaboração própria, 2014

A relação espacial entre as características urbanas da cidade representativa é apresentada pela Figura 4. Os resultados são consistentes com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica. A especificação do modelo tradicional permite concluir que a renda da terra (preço na terra por acre) e a densidade estrutural (razão entre estrutura e terra) decrescem em função da distância do CBD (milhas). Cabe destacar que a razão entre capital-terra ou densidade estrutural representa a verticalidade das habitações. Quanto mais próximo do centro de empregos, maior é o preço da terra por acre e também maior é a medida da altura dos edifícios. Isso implica que a terra se torna mais cara à medida que se aproxima do CBD. Nas localizações mais distantes, utiliza-se mais terra e menos capital.

Figura 4 – Simulações *baseline* para as características urbanas das cidades escolhidas

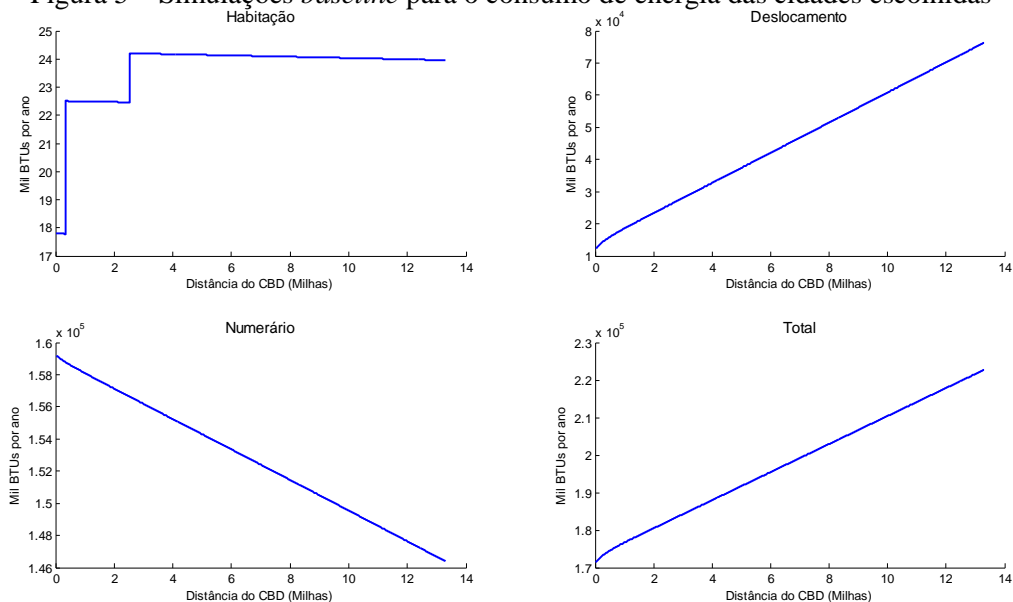


Fonte: Elaboração própria, 2014

O padrão de distribuição espacial do uso de energia nas cidades é apresentado na Figura 5. O consumo de energia na habitação aumenta à medida que se distancia do CBD até um ponto em que permanece sem muita alteração. Os saltos no consumo de energia da habitação são

devidos à mudança na tipologia habitacional, de apartamentos para casas, e a densidade estrutural. Nas cidades, quanto mais distante do CBD menor é a altura dos edifícios. Isso implica em um consumo mais elevado de energia. O consumo de energia gasto nos deslocamentos pendulares também é maior conforme aumenta a distância ao centro de negócios. Isso é explicado pelo tempo de operação do veículo. Portanto, no ponto mais distante do CBD maior é o consumo de energia gasto na habitação e no deslocamento.

Figura 5 – Simulações *baseline* para o consumo de energia das cidades escolhidas



Fonte: Elaboração própria, 2014

O consumo de energia do numerário, ou seja, dos setores público e comercial, diminui à medida que se distancia do CBD. É possível concluir que o CBD é o local com maior consumo de energia pelos setores público e comercial. Isso porque neste local encontram-se as atividades de comércio, serviços e funcionalismo público. No total, o consumo de energia é maior conforme aumenta a distância do centro de negócios.

5.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Os experimentos básicos realizados referem-se aos choques exógenos que foram inseridos nas equações do modelo proposto. Foram testadas três simulações: (a) aumento no preço da gasolina; (b) aumento na eficiência do consumo de combustível; (c) aumento na renda agrícola. Ambas serviram para avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética em uma cidade monocêntrica brasileira de médio porte.

O primeiro cenário de política envolve um choque exógeno de 10,0% no preço da gasolina. Os deslocamentos ficam mais caros e a cidade torna-se compacta, com área de queda de 4,6%. Isso leva a um aumento de 5,2% na densidade habitacional no CBD e também um aumento de 2,2% no aluguel residencial da terra. O raio da cidade diminui em 2,3%. A tipologia habitacional mais procurada foi pelos apartamentos, com aumento de 21,0% na quantidade. A densidade residencial aumenta em 4,8%. nas localizações centrais (perto do CBD) ocorreu aumento do preço por acre de habitação, da renda da terra e da densidade estrutural. Como consequência, a área da residência e o tamanho do lote caem em 0,3% e

1,2%, respectivamente. Conforme Brueckner (1987), em locais próximos ao CBD o tamanho do lote será menor e, conseqüentemente, a densidade populacional se torna superior.

Na medida em que a estrutura da densidade aumenta e o tamanho das residências diminui, o consumo doméstico de energia *per capita* cai 0,8%. A energia consumida no deslocamento diário cai 2,2% e o tempo de deslocamento médio para o trabalho declina em 1,3%. O consumo de energia total (residências e deslocamento) cai 0,3%. A economia de energia a partir de aumentos no preço da gasolina é maior nos deslocamentos diários, ou seja, no transporte de passageiros da residência para o local de trabalho, do que no uso doméstico. Os preços mais elevados da gasolina motivam o aumento da eficiência energética dos veículos. Com os deslocamentos mais caros, os indivíduos preferem morar mais próximo ao local de trabalho de forma a economizar energia. Como consequência, ocorrerá um menor uso de automóvel e menor poluição atmosférica nas cidades.

O segundo cenário envolve a economia de combustível. A frota nacional de veículos é assumida ser 10,0% mais eficiente. Isso implica no aumento da relação entre a velocidade do veículo e o consumo de combustível. A energia *per capita* consumida no deslocamento reduz 7,2%. A área da cidade aumenta em 4,7% e o raio em 2,3%. A área da residência e o tamanho do lote aumentam para 0,3% e 1,6%, respectivamente. Isso causa uma redução de 4,5% na densidade populacional urbana. Em virtude da expansão da cidade e do raio, a tipologia habitacional mais procurada são as casas. O percentual de apartamentos declina em 15,8% e o percentual de casas aumenta em 3,7%. A densidade residencial declina em 4,5% e, isso faz com que, um efeito de segunda ordem esteja por trás dessa implicação. Desse modo, a energia consumida na habitação aumenta em 0,4%.

O aumento da eficiência do combustível de um determinado veículo e, portanto, a economia de combustível, tem efeitos diretos e indiretos sobre o uso de energia. O efeito direto refere-se a queda da energia consumida no deslocamento diário da residência para o local de trabalho. O efeito indireto surge a partir da menor densidade habitacional. Por outro lado, um aumento no preço da gasolina não tem efeito direto. No entanto, surge o efeito indireto no declínio do tempo de deslocamento e aumento da densidade habitacional, em resposta aos maiores custos de deslocamento, uma vez que transporte e habitação estão interligados.

O terceiro cenário envolve um choque exógeno de 10,0% na renda agrícola. Um aumento na renda agrícola afeta o preço de reserva da terra. O aluguel da terra aumenta 29,7%. Segundo Brueckner (1987), o impacto de um aumento na renda agrícola é simples e ocorre sobre o equilíbrio do uso da terra, de modo a encolher a fronteira urbana. Isso produz uma redução no tamanho espacial da cidade de 1,8% e no raio da cidade de 0,9%. A área da residência declina 0,04% e o tamanho do lote cae 2,0%. Logo, a densidade residencial aumenta 1,9%. O percentual de apartamentos aumenta 5,3% e o percentual de casas declina 1,2%. Esse resultado é uma consequência direta da redução espacial no tamanho da cidade.

Pode-se concluir que a grande relevância deste trabalho é contribuir para a literatura nacional, no campo da Economia Urbana, a partir da análise empírica da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte sobre a eficiência energética em áreas urbanas brasileiras. Nas simulações urbanas deste trabalho, a política de transporte está relacionada a um choque no preço da gasolina, consequência, por exemplo, da imposição de um imposto. O modelo monocêntrico estudado é importante na análise de planejamento urbano. No caso específico das cidades brasileiras, a serem utilizadas no estudo empírico, o monocentrismo precisa ser considerado. Embora as cidades escolhidas para este estudo sejam de porte médio, metrópoles

e cidades brasileiras, como Belo Horizonte e Rio de Janeiro, também podem ser consideradas cidades monocêntricas com um centro de empregos e um centro histórico bem definido na região central.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo foi avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética nas cidades brasileiras de médio porte. A hipótese apresentada foi que o consumo eficiente de energia pode estar relacionado com o espaço habitacional, com os deslocamentos e com a estrutura espacial das cidades. Para testar essa hipótese foi utilizado um modelo numérico de simulação urbana com a fundamentação teórica baseada no modelo padrão de Economia Urbana, de cidades monocêntricas, descrito por Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969). Desse modo, foi construído um modelo de simulação urbana, adaptado para análise de choques de política energética para a economia brasileira, com base na integração dessa modelagem com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos diários intra-urbanos.

A construção do modelo para o Brasil tomou como estratégia empírica a escolha de um grupo de cinco cidades brasileiras, para realizar o procedimento de calibragem, a fim de gerar uma cidade monocêntrica representativa de porte médio. Os critérios de escolha envolveram a configuração urbana monocêntrica, diversificação geográfica, o tamanho semelhante da população e o indicador PIB *per capita*. As pesquisas sobre esse tema no Brasil são limitadas pela ausência de um modelo padrão que ligue o planejamento urbano e as políticas de transportes para o uso de energia, e principalmente, pela impossibilidade da obtenção de dados de variáveis urbanas.

Os resultados da cidade representativa simulada foram compatíveis com as evidências da literatura de Economia Urbana Monocêntrica. A renda da terra e a densidade estrutural decrescem em função da distância ao CBD. Os resultados mostraram que quanto mais próximo do centro de empregos, maior é a medida da altura dos edifícios e também o nível de capital. Logo, próximo ao CBD a terra é mais cara. Nas localizações mais distantes, utiliza-se mais terra e menos capital. A densidade de habitação também diminui conforme aumenta a distância do centro de negócios. Isso é explicado pelo fato de que a distâncias maiores os edifícios são curtos e os espaços para habitação são maiores, implicando em um número menor de moradias e também com poucos indivíduos. No ponto mais distante do CBD, os indivíduos consomem uma maior quantidade de terras (lotes maiores). Como consequência, o consumo de energia é mais elevado em decorrência do aumento no espaço interior da unidade habitacional.

Os resultados mostraram que choques de 10,0% nos preços da gasolina resultam em redução de energia residencial, devido aos efeitos indiretos dos preços de habitação próximos ao CBD. A cidade torna-se mais compacta e a densidade estrutural (prédios mais altos) aumenta próximo ao centro de empregos. Um choque uniforme de 10,0% no aumento da eficiência do combustível mostrou que efeitos diretos e indiretos são considerados sobre o uso de energia nas cidades. O efeito direto implica na redução da energia consumida no deslocamento diário e o efeito indireto surge a partir da menor densidade habitacional. Um choque uniforme de 10,0% na renda agrícola resultou em uma redução espacial da cidade e, portanto, ocorreu redução no consumo total de energia (residência e deslocamento) nas cidades. Assim, as simulações de política energética mostraram que a interação entre eficiência energética e a

estrutura espacial das cidades deve ser considerada na avaliação do uso do solo e das políticas de transporte no Brasil.

A versão do modelo proposto, no presente trabalho, deve ser vista como a primeira tentativa de avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética em áreas urbanas em um modelo de simulação urbana calibrado para o Brasil. A partir dos resultados encontrados é possível construir várias extensões deste trabalho para fins de políticas de desenvolvimento urbano e uso de energia nas cidades. Conforme Larson, Liu e Yezer (2012), a contribuição relevante é que, no futuro, modelos numéricos de simulação urbana desse tipo possam ser utilizados como um método padrão para avaliar as políticas nas áreas de Economia Urbana e Economia de Energia.

O que se recomenda ao final desse artigo é que sejam feitos avanços na calibragem dos parâmetros da função de produção de habitação, parâmetros de emprego e estimação econométrica do consumo energético dos veículos. Além disso, os parâmetros do uso da terra também podem ser aprimorados para se mostrarem mais condizentes com a realidade brasileira, já que pesquisas brasileiras não estudam, por exemplo, o percentual de todo o solo destinado à habitação. Uma outra extensão que pode ser adotada seria a diversificação das classes de renda das famílias no modelo, de modo a gerar uma cidade representativa mais próxima da realidade empírica. Estes avanços podem aumentar a confiabilidade da aplicação da modelagem proposta para análise de política pública.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, W. **Location and land use**. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- ALTMANN, J. L. ; DESALVO, J. S. Tests and extensions of the Mills-Muth simulation model of urban residential land use. **Journal of Regional Science**, v. 21, n. 1, p. 1-21, 1981.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Vendas, pelas distribuidoras, dos derivados combustíveis de petróleo (barris equivalentes de petróleo)**. Disponível em: <www.anp.gov.br/?dw=11049>. Acesso em: 13 mar. 2014.
- BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Rio de Janeiro: EPE, 2014.
- BERTAUD, A. ; BRUECKNER, J. K. Analyzing building-height restrictions: predicted impacts and welfare costs. **Regional Science and Urban Economics**, v. 35, n. 2, p.109-125, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Programas**. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 5 mar. 2014.
- BROWNSTONE, D. ; GOLOB, T. F. The impact of residential density on vehicle usage and energy consumption. **Journal of Urban Economics**, v. 65, n. 1, p. 91 – 98, 2009.
- BRUECKNER, J. The structure of urban equilibria: a unified treatment of the Muth-Mills Model. In: MILLS, E. S. **Handbook of regional and urban economics**. Amsterdam: North Holland, 1987. v. 2, cap. 20.
- COSTA, G. C. F. **Uma avaliação do consumo de energia com transportes em cidades do Estado de São Paulo**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2001.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO - DENATRAN. **Estatística, frota 2013**. Disponível em: <www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acesso em: 12 mar. 2014.
- EMBRAPA. **Mapeamento e estimativa da área urbanizada do Brasil com base em imagens orbitais e modelos estatísticos**. Campinas, 2005. Disponível em: <<http://www.urbanizacao.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 6 set. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro, 2013.

FUJITA, M. **Urban economic theory: land use and city size**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989.

FUJITA, M. ; THISSE, J. F. **Economics of agglomeration: cities, industrial location and regional growth**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

GAIGNE, C. ; RIOU, S. ; THISSE, J. F. Are compact cities environmentally friendly? **Journal of Urban Economics**, v. 72, n. 2-3, p. 123-136, 2012.

GASNET. **Vendas de gás**. Disponível em: < <http://www.gasnet.com.br/conteudos/Vendas/2>>. Acesso em: 5 set. 2014.

GASQUES, J. G. ; BASTOS, E. T. Terra – preços no Brasil. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 14-15, 2008.

GLAESER, E. L. ; KAHN, M. E. Sprawl and urban growth. In: HENDERSON, H. ; THISSE, J. (Ed.). **Handbook of regional and urban economics**. Amsterdam: North Holland, 2004. v. 4, cap. 56.

GOMES, L. S. F. **A demanda por energia elétrica residencial no Brasil 1999-2006: uma estimativa das elasticidades-preço e renda por meio de painel**. 2010. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto, São Paulo, 2010.

GOSLING, M. C. ; WALKER, A. J. Energy efficiency within the urban design process. **Cities**, v. 9, n. 2, p. 111-116, 1992.

IBGE. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <www.censo2010.ibge.gov.br>. Acesso em: 6 mar. 2014.

IPEA. **Gastos das famílias das regiões metropolitanas brasileiras com transporte urbano**. 2012. (Texto para discussão IPEA, n. 154). Disponível em: < http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/comunicado/120920_comunicadoipea0154.pdf>. Acesso em: 8 mar. 2014.

KENWORTHY, J. R. ; LAUBE, F. B. Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. **Transportation Research Part A**, n. 33, p. 691-723, 1999.

KNAAP, G. ; TALEN, E. New urbanism and smart growth: a few words from the academy. **International Regional Science Review**, v. 28, n. 2, p. 107-118, 2005.

LARSON, W. ; LIU, F. ; YEZER, A. Energy footprint of the city: Effects of urban land use and transportation policies. **Journal of Urban Economics**, v. 72, n. 2, p. 147-159, 2012.

LARSON, W. D. ; YEZER, A. M. **The energy implications of city size and density**. Washington : George Washington University, 2014. (Working paper). Disponível em: < <http://www.gwu.edu/~iiep/assets/docs/papers/2014WP/YezerIIEPWP201416.pdf>>. Acesso em: 8 mar. 2014.

LENZEN, M. *et al.* A comparative multivariate analysis of household energy requirements in Australia, Brazil, Denmark, India and Japan. **Energy**, v. 31, n. 2-3, p. 181-207, 2006.

LIMA, R. S. *et al.* Espalhamento urbano: mito ou realidade no Brasil? O caso das cidades médias. **Revista dos Transportes Públicos**, v. 25, p. 31-46, 2003.

LITMAN, T. **Transportation land valuation: evaluating policies and practices that affect the amount of land devoted to transportation facilities**. Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2012. Disponível em: < <http://www.vtpi.org/land.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2014.

MCMILLEN, D. P. Employment densities, spatial autocorrelation, and subcenters in large metropolitan areas. **Journal of Regional Science**, v. 44, n. 2, p. 225-244, 2004.

MILLS, E. S. An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. **The American Economic Review**, v. 57, n. 2, p. 197-210, 1967.

MUTH, R. F. **Cities and housing**. Chicago: University of Chicago Press, 1969.

MUTH, R. F. Numerical solution of urban residential land-use models. **Journal of Urban Economics**, v. 2, n. 4, p. 307-332, 1975.

NADALIN, V. G. **Três ensaios sobre economia urbana e mercado de habitação em São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Economia Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NAESS, P. **Urban form and energy use for transport – a nordic experience**. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1995. 327p.

NEWMAN, P. *et al.* Can we overcome automobile dependence? physical planning in an age of urban cynicism. **Cities**, v. 12, n. 1, p. 53-65, 1995.

NEWMAN, P. W. G. ; KENWORTHY, J. R. Gasoline consumption and cities: a comparison of U.S. cities with a global survey. **Journal of the American Planning Association**, v. 55, n. 1, p. 24-37, 1989a.

NEWMAN, P. W. G. ; KENWORTHY, J. R. **Cities and automobile dependence: a source book**. Aldershot, England: Gower Technical, 1989b. 388p.

PAMPOLHA, V. M. P. **Espalhamento urbano e consumo de energia para transportes: o caso das capitais brasileiras**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1999.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. **Atlas do desenvolvimento humano no Brasil**. 2013. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/consulta/>>. Acesso em: 6 mar. 2014.

RIBEIRO, S. K. *et al.* Transport and its infrastructure. In: **Climate change 2007**. New York: Cambridge University Press, 2007. Mitigation. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

SULLIVAN, A. M. The general-equilibrium effects of the residential property tax: Incidence and excess burden. **Journal of Urban Economics**, v. 18, n. 2, p. 235-250, 1985.