



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
FACULDADE DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
MESTRADO EM ECONOMIA**

ANDRESSA LEMES PROQUE

**O EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO USO DA TERRA E DAS
POLÍTICAS DE TRANSPORTE SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM ÁREAS URBANAS**

SALVADOR

2014

ANDRESSA LEMES PROQUE

**O EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO USO DA TERRA E DAS
POLÍTICAS DE TRANSPORTE SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
EM ÁREAS URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Economia.

Área de concentração: Economia Regional e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Ferreira dos Santos

SALVADOR

2014

Ficha catalográfica elaborada por Vânia Cristina Magalhães CRB 5- 960

Proque, Andressa Lemes

P962 Efeito da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte sobre a eficiência energética em áreas urbanas./ Andressa Lemes Proque. – Salvador, 2014.

156f. Il.; quad.; fig.; tab.

Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia, Universidade Federal da Bahia, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Ferreira dos Santos.

1. Transporte - Políticas. 2. Economia urbana. 3. Energia elétrica. I. Santos, Gervásio Ferreira dos. II. Título. III. Universidade Federal da Bahia.

CDD – 330.91732



Universidade Federal da Bahia
Faculdade de Economia
Programa de Pós-Graduação em Economia
Mestrado e Doutorado em Economia

TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRESSA LEMES PROQUE

**“O EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO USO DA
TERRA E DAS POLÍTICAS DE TRANSPORTE SOBRE A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM ÁREAS URBANAS”**

Aprovada em 20 de novembro de 2014.

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Economia pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Gervásio Ferreira dos Santos
(Orientador - PPGE/ECO/UFBA)



Prof. Dra. Gisele Ferreira Tiryaki
(PPGE/ECO/UFBA)



Prof. Dr. Edson Paulo Domingues
(UFMG)

Ao grande herói da minha vida, meu amado e saudoso pai, Mário Proque (grandão), que sonhou o meu sonho e, mais que isso, fez o possível para torná-lo realidade.

AGRADECIMENTOS

Este é um momento admirável e único. Agradeço primeiramente a DEUS pelo dom da vida e por ter me dado coragem e persistência no desenvolvimento desta pesquisa. Obrigada por ser bondoso e misericordioso!

Em especial, ao meu querido pai Mário por ter me ensinado que a vida é feita de sonhos, desafios, derrotas, vitórias e valores. Agradeço por ter transmitido a segurança necessária para que em todos os momentos difíceis eu nunca pensasse em desistir. Obrigada por me mostrar a importância do estudo. Obrigada pelas vibrações positivas vindas do Céu. Grande exemplo de amor! Grande incentivador! Saudades eternas!

A minha querida mãezinha Hedwiges pelo amor incondicional e por preencher a minha vida com tantos momentos alegres e lindos. A todos os meus familiares que acreditaram e me ajudaram na conclusão dessa importante etapa da minha vida. Em especial, aos padrinhos Juca e Renaze, pelo apoio, compreensão e pela felicidade com que preenchem o meu coração quando estamos juntos. A minha tia Renilda por mostrar que podemos dar um belo sorriso até nos momentos mais tristes da vida. Em resumo, “(...) às vezes muitas pedras surgem pelo caminho, mas em casa alguém feliz te espera pra te amar (...) [Anjos de Resgate]”.

A meu orientador, professor Gervásio Santos, pelo fundamental incentivo para a realização desta pesquisa. Agradeço-lhe pela paciência, pelos conselhos, pela segurança transmitida, pela amizade e por despertar meu interesse nas áreas de economia de energia e economia urbana, no momento mais difícil da minha vida (falecimento do meu pai). Exemplo de pesquisador e professor a ser seguido, sempre acessível e entusiasmado! Tenho admiração pelo seu trabalho!

Ao pesquisador americano William D. Larson, pelo estímulo e apoio para a realização deste trabalho. Obrigada pela paciência, parceria, atenção dispensada, pelas dicas com o modelo UEFM, por todos os e-mails respondidos, pela força.

Aos professores Edson Paulo Domingues e Gisele Tiryaki que, compondo a minha banca examinadora, deram grandes contribuições para o aperfeiçoamento desta pesquisa. Obrigada pelas críticas construtivas que enriqueceram meu trabalho e por todas as sugestões!

Ao curso de mestrado em economia. Ao corpo docente desta instituição, em especial ao professor Gentil, pelos grandes ensinamentos, contribuindo de forma decisiva na formação dos alunos, e pela amizade ao longo do tempo. Aos secretários Ruy, Max e Jaqueline pela ajuda sempre que possível. A Vânia Magalhães pela atenção recebida. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o curso.

Ao amigo Max Battisti, técnico do IBGE, pela grande ajuda com os dados. Obrigada pela atenção dispensada! Aos amigos, Ailton Cunha, Daniel Silva, Hélio Almeida, Ramon Guabiroba, pelas grandes contribuições durante a realização deste trabalho. As concessionárias de energia elétrica, CELPA, COELBA, CEMAT, CEMIG e COPEL, pelo fornecimento dos dados. A ANP e as prefeituras das cidades de Belém, Feira de Santana, Cuiabá, Juiz de Fora e Londrina, por disponibilizarem o banco de dados municipais.

Agradeço de modo geral a todos os amigos Campanhenses e aqueles da jornada pela querida cidadezinha de Viçosa da graduação. Em especial, à UFV pela importante base na minha formação como economista. Ao professor Francisco Cassuce, orientador da graduação, por todas as críticas e ensinamentos durante a iniciação científica, que enriqueceram minha formação. Ao professor Evaldo Henrique pelo apoio e pelas sugestões ao longo deste trabalho.

A minha amiga Daiana (Dai), companheira de república, parceira de carnavais e dos momentos de desespero, obrigada por tudo. Todos os momentos desfrutados naquela casa do Cabula foram únicos e vão deixar saudades. A exemplo das conversas jogadas fora durante os cafés das 16h ou no momento do delicioso risoto do almoço, e até mesmo, das conversas durante a saga contra as cigarras que não nos deixavam estudar. A minha amiga Gilmara (Gil), pelo carinho, atenção e companhia em diversos momentos. Obrigada por me apresentar o São João da Bahia, festa inesquecível! A minha amiga Verônica (Vel) pelas palavras de incentivo, por cada sorriso compartilhado e pela presença constante. A minha amiga Carolina (Carolzita), por me mostrar que a vida tem um sabor especial e simples. Obrigada por todas as conversas, mensagens e a acolhida de uma irmã. Meninas, no coração de cada uma haverá saudades e a certeza de que estaremos juntas em pensamento. Aos queridos amigos e companheiros de curso, pelos momentos maravilhosos que passamos juntos, em especial: Elizabeth, Cícero, Daniel, Dênis e Ramon. Agradeço a amiga Érica Imbirussú, sempre presente nas conversas. Com vocês, os momentos na “Grande Bahia” foram intensos e alegres.

Agradeço, em especial, ao Dante Löwenthal pelos quase 8 anos de convivência, durante o período da graduação e do mestrado. Obrigada pela parceria, atenção e por se fazer sempre presente na minha vida. Mesmo seguindo caminhos diferentes, não estaremos longe de sermos esquecidos!

A amiga Daniela Lima pelas dicas, pelos conselhos e pelo suporte sempre que possível na confecção deste trabalho. Obrigada pela amizade!

As minhas amigas Claudinéia (Néia) e Ivanessa, pelo carinho e companhia nos últimos meses em Salvador. Foi muito bom ter a presença de vocês nesta fase da minha vida. Obrigada pelas boas risadas, pela pimenta de cada dia (inesquecível), por me mostrar que o rolinho chinês é muito bom, pelo cuidado comigo e, mais que isso, pela amizade!

Aos amigos Amarildo e Vado, por cada sorriso compartilhado, palavra de carinho e cada bom dia, que me fazia mais feliz ao passar na portaria do condomínio do Cabula e da Federação.

A cidade de Salvador, pelos momentos maravilhosos vividos!

(...) Baiano sou eu, é você, somos nós (...) [Saulo Fernandes]

Enfim...

Graças a estas pessoas especiais (e a outras que infelizmente não consegui citar), consegui superar os desafios e vencer as situações inesperadas que surgiram ao longo do mestrado. Sem a presença de todos vocês, a trajetória teria sido mais difícil de percorrer.

Do fundo do meu coração, a todos vocês **MUITO OBRIGADA!**

“Hoje em dia, o ser humano apenas tem ante si três grandes problemas que foram ironicamente provocados por ele próprio: a super povoação, o desaparecimento dos recursos naturais e a destruição do meio ambiente. Triunfar sobre estes problemas, vistos sermos nós a sua causa, deveria se a nossa mais profunda motivação.”

Jacques Yves Cousteau (1910-1997)

“A cidade avançada não é aquela em que os pobres andam de carro, mas aquela em que os ricos usam transporte público”.

Enrique Peñalosa

“O carro é o principal sonho de consumo do brasileiro. De outro lado, a expansão da infraestrutura viária é limitada. Temos, então, um problema de crescimento assimétrico.”

Ricardo Bertin

“As cidades, e sobretudo as grandes, ocupam, de modo geral, vastas superfícies, entremeadas de vazios. Nessas cidades espraiadas, característica de uma urbanização corporativa, há interdependência do que chamo de categoriais espaciais relevantes desta época: tamanho urbano, modelo rodoviário, carência de infraestruturas, especulação fundiária e imobiliária, problemas de transporte, extroversão e periferização da população, gerando, graças às dimensões da pobreza e seu componente geográfico, um modelo específico de centro-periferia. Cada qual destas realidades sustenta e alimenta as demais e o crescimento urbano, é, também, o crescimento sistêmico dessas características. As cidades são grandes porque há especulação e vice-versa; há especulação porque há vazios e vice-versa; porque há vazios as cidades são grandes. O modelo rodoviário urbano é fator de crescimento disperso e do espraiamento da cidade. Havendo especulação, há criação mercantil da escassez e o problema do acesso à terra se acentua. Mas o déficit de residências leva à especulação e os dois juntos conduzem à periferização da população mais pobre e, de novo, ao aumento do tamanho urbano. As carências em serviços alimentam a especulação, pela valorização diferencial das diversas frações do território urbano. A organização dos transportes obedece a essa lógica e torna ainda mais pobres os que devem viver longe dos centros, não apenas porque devem pagar caro seus deslocamentos como porque os serviços e bens são mais dispendiosos nas periferias. E isso fortalece os centros em detrimento das periferias, num verdadeiro ciclo vicioso.”

SANTOS (1996, p.95-96)

RESUMO

O objetivo desta dissertação é avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética na economia brasileira. A taxa de urbanização brasileira, medida pelo percentual da população urbana, é de 85,0%, sendo esta uma das mais altas do mundo. O Brasil possui mais de 200 milhões de habitantes e as respectivas cidades enfrentam graves problemas relacionados com infraestrutura e mobilidade urbana, que conduzem a espaços urbanos cada vez mais congestionados, aumento do tempo de deslocamento, maior poluição e redução da eficiência energética. Nesse sentido, as características do processo de desenvolvimento urbano têm influência sobre o consumo de energia. As cidades mais compactas e com maior densidade populacional urbana tendem a consumir menos energia *per capita*, devido à menor dependência dos automóveis. Por outro lado, as cidades mais espalhadas possuem um maior consumo *per capita* de energia. Com base nesses elementos e na evidência de que poucos estudos empíricos têm investigado a relação entre desenvolvimento urbano e uso de energia nas cidades, no presente trabalho será calibrado um modelo numérico de simulação urbana para gerar uma cidade monocêntrica representativa, a partir de uma média de dados de cinco cidades brasileiras. A fundamentação teórica do presente trabalho, bem como do modelo de simulação urbana, está baseada no modelo padrão de Economia Urbana, de cidades monocêntricas, descrito por Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969). O modelo proposto fornece uma conexão entre as áreas de Economia Urbana e a de Economia de Energia, através da integração entre a modelagem de simulação urbana com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos intra-urbanos. 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 Brazilian urbanization rate, measured by the percentage of the urban population, is about 85.0%, this being one of the highest in the world. Brazil has more than 200 million inhabitants and their cities face serious problems related to infrastructure and urban mobility, leading to increasingly congested urban spaces, increased commuting time, greater pollution and reduction of energy efficiency. In spite of this, 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. On the other hand, the most cities throughout the world have higher energy consumption per capita. Based on these elements and in the fact that few empirical studies have investigated the relationship between urban development and energy use in cities, in this work will be calibrated a numerical model of urban simulation for a representative monocentric city based on average data from five Brazilian cities. The theoretical background of this work, as well as the urban simulation model, is based on the standard model of urban economics and monocentric cities, described by Alonso (1964), Mills (1967) and Muth (1969). The proposed model provides a connection between the areas of Urban Economics and Energy Economy, through the integration between the modeling of urban simulation with equations of energy consumption in dwellings and intra-urban commuting. 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.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1-	Evolução da taxa de urbanização (%) por regiões no Brasil, 1950-2010	24
Gráfico 2-	Evolução da frota nacional circulante no Brasil, 2003-2013	27
Gráfico 3-	Frota circulante de veículos por UF: 2003 e 2013	28
Gráfico 4-	Evolução da frota de veículos, do PIB <i>per capita</i> e da população no Brasil, 1998-2010	29
Gráfico 5-	Evolução do consumo energético de gasolina, etanol e GNV no Brasil, 2007-2013	31
Figura 1-	Consumo de gasolina, etanol e GNV <i>per capita</i> no Brasil, 2010	32
Gráfico 6-	Estrutura do consumo de energia elétrica por setor no Brasil, 2010*	34
Figura 2-	Consumo de energia elétrica residencial <i>per capita</i> no Brasil, 2010	35
Gráfico 7-	Participação (%) das fontes de energia no consumo residencial de energia no Brasil, 2003-2012	36
Gráfico 8-	Estrutura do consumo de energia no setor transportes no Brasil, 2010	37
Gráfico 9-	Participação (%) das fontes de energia no consumo do setor transporte rodoviário no Brasil, 2003-2012	38
Gráfico 10-	Evolução da matriz energética brasileira, 2005 e 2030	42
Gráfico 11-	Evolução do consumo de energia elétrica do setor residencial em relação ao aumento no número de domicílios com energia elétrica, 2001-2013	46
Figura 3-	Consumo de energia <i>per capita</i> e densidade populacional urbana por UFs: 2010	50
Figura 4-	Formação dos anéis concêntricos de Von Thünen	55
Figura 5-	Triângulo Locacional de Weber	56
Figura 6-	Os hexágonos de Christaller	57
Figura 7-	Modelo do cone de demanda de Lösch	59
Figura 8-	Modelo simples de cidade monocêntrica	63
Figura 9-	Vias radiais de transportes	64
Figura 10-	A cesta de consumo de equilíbrio em r	67

Quadro 1-	<i>Bid rent</i> e função tamanho do lote	68
Figura 11-	O mercado de aluguéis da terra	74
Figura 12-	Cidade fechada: Efeito de um aumento nos custos de deslocamento sobre a renda da terra	77
Figura 13-	Configuração Urbana Duocêntrica	82
Figura 14-	Anéis em torno do CBD	89
Figura 15-	Relação entre a eficiência do combustível e a velocidade do veículo	96
Figura 16-	Localização das cidades escolhidas para a calibragem do modelo, com seus respectivos CBDs	98
Figura 17-	Divisão de bairros e o CBD da cidade de Belém, 2010	99
Figura 18-	Divisão de bairros e o CBD da cidade de Feira de Santana, 2010	101
Figura 19-	Divisão de bairros e o CBD da cidade de Cuiabá, 2010	103
Figura 20-	Divisão de bairros e o CBD da cidade de Juiz de Fora, 2010	104
Figura 21-	Divisão de bairros e o CBD da cidade de Londrina, 2010	106
Quadro 2-	Dados para a calibragem do modelo, 2010*	108
Figura 22-	Simulações <i>baseline</i> para as características urbanas das cidades escolhidas	115
Figura 23-	Simulações <i>baseline</i> para o consumo de energia das cidades escolhidas	116
Figura 24-	Principais relações causais de choques no preço da gasolina, na eficiência do combustível e na renda agrícola	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Participação (%) dos trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento casa-trabalho, 2010	30
Tabela 2-	Consumo final energético por fonte (10^3 tep)	33
Tabela 3-	Parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo de simulação urbana	109
Tabela 4-	Calibragem do modelo UEFM	114
Tabela 5-	<i>Baseline</i> e cenários contrafactuais	120

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMM	Modelo Alonso-Mills-Muth
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanco Energético Nacional
BR	Brasil
CBD	<i>Central Business District</i>
CBT	Código Brasileiro de Trânsito
CELPA	Centrais Elétricas do Pará
CEMAT	Centrais Elétricas Matogrossenses
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CES	<i>Constant Elasticity of Substitution</i>
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
CONPET	Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CP	Centro-Periferia
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DPVAT	Danos Pessoas Causados por Veículos Automotores de Via Terrestre
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética

FIPE	Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
GT	Grupo Técnico
IBGE	Instituto Nacional de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEF	Instituto de Estudos Financeiros
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
MME	Ministério de Minas e Energia
MPG	Milhas por Galão
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
NEU	Nova Economia Urbana
NGE	Nova Geografia Econômica
ORNL	<i>Oak Ridge National Laboratory</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDEs	Planos Decenais de Energia

PIB	Produto Interno Bruto
PNEf	Plano Nacional de Eficiência Energética
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROINFA	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SINDIREPA-SP	Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios de São Paulo
TEP	Tonelada Equivalente de Petróleo
UEFM	<i>Urban Energy Footprint Model</i>
UF	Unidade da Federação
VLT	Veículos Leves sobre Trilhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	DESENVOLVIMENTO URBANO, POLÍTICAS DE TRANSPORTE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	23
2.1	ESTRUTURA URBANA E MOBILIDADE NAS CIDADES NO BRASIL	23
2.2	EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E DESLOCAMENTO NO BRASIL	33
2.3	PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	39
2.4	ESTRUTURA URBANA E CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL	42
3	ECONOMIA ESPACIAL URBANA E A MODELAGEM NUMÉRICA DE SIMULAÇÃO	53
3.1	ESPAÇO E A TEORIA ECONÔMICA	53
3.2	A NOVA GEOGRAFIA ECONÔMICA (NGE)	59
3.3	ECONOMIA ESPACIAL URBANA	62
3.3.1	Configuração Urbana Monocêntrica Tradicional	62
3.3.1.1	A função <i>bid rent</i>	65
3.3.1.2	A indústria de habitação	70
3.3.1.3	O equilíbrio urbano do uso da terra	71
3.3.1.4	A cidade fechada e a aberta	75
3.3.1.5	Limitação da Economia Urbana Monocêntrica	78
3.3.2	Configuração Urbana Policêntrica	79
3.4	MODELAGEM NUMÉRICA DE SIMULAÇÃO	83
4	MODELAGEM DE SIMULAÇÃO URBANA E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAGEM PARA O BRASIL	85
4.1	CARACTERÍSTICAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO URBANA	85
4.2	CALIBRAGEM DO MODELO	91
4.3	CONSUMO ENERGÉTICO DOMÉSTICO	94
4.4	CONSUMO ENERGÉTICO DOS VEÍCULOS	95
4.5	ESCOLHA DAS CIDADES BRASILEIRAS	97
4.5.1	Belém	98
4.5.2	Feira de Santana	100
4.5.3	Cuiabá	102
4.5.4	Juiz de Fora	103
4.5.5	Londrina	105
4.6	BASE DE DADOS E PARÂMETROS-CHAVE	107
5	RESULTADOS	112
5.1	CENÁRIO BÁSICO DA CIDADE MONOCÊNTRICA	112
5.2	RELAÇÕES CAUSAIS REFERENTES AO MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO PROPOSTO	116
5.3	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	119
5.3.1	Choque no Preço da Gasolina	122
5.3.2	Choque na Eficiência de Consumo de Combustível	123
5.3.3	Choque na Renda Agrícola	124

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
	REFERÊNCIAS	130
	APÊNDICES	137
	ANEXOS	154

1 INTRODUÇÃO

O objetivo desta dissertação é avaliar a distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética nas cidades brasileiras de médio porte. As políticas de eficiência energética são uma ferramenta importante para conter o crescimento acelerado do consumo de energia e contribuem para reduzir as emissões de dióxido de carbono e atenuar o esgotamento dos recursos energéticos. Questões como ocupação do solo, zoneamento da cidade e áreas verdes são fundamentais para entender o uso de energia. Desse modo, os desdobramentos do uso do solo urbano e das políticas de transporte sobre a eficiência energética serão avaliados neste trabalho utilizando um modelo numérico de simulação urbana.

O processo de urbanização acelerado é um tema conhecido na teoria econômica. A partir da Revolução Industrial, esse processo foi intenso devido à necessidade de mão de obra nas indústrias. No Brasil, a taxa de urbanização evidencia que, nos últimos 60 anos, a parcela urbana da população mais que duplicou. Nos dias atuais, os grandes centros urbanos exibem dificuldades e necessidades que influenciam as condições de habitação, a saber: urbanização de áreas impróprias, padrão de uso ineficiente do automóvel, congestionamentos de tráfegos, maior tempo de deslocamento, maior consumo de energia, poluição atmosférica e dos rios, e outros problemas ambientais em virtude do crescimento acelerado e sem planejamento urbano. Como consequência, muitas cidades do país apresentam deseconomias de aglomeração.

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, com isso, o padrão ineficiente de uso; (ii) crescimento do consumo de combustíveis; (iii) expansão do consumo de energia elétrica. Isso ocorre devido ao crescimento dos rendimentos reais do trabalho das classes de menor renda e que residem nas regiões periféricas das áreas urbanas. Dados recentes apontam para um crescimento acelerado da frota de veículos automotores e, conseqüentemente, do consumo de combustível no Brasil. Ambos os processos vem acontecendo sem um controle apropriado no país. No longo prazo, esses fatores, juntamente

com a expansão do consumo de energia, 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.

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. Além disso, os sistemas de transportes podem ter maior frequência e uma melhora no serviço prestado devido ao maior número de usuários por zona de transporte. Por outro lado, as cidades mais espalhadas possuem um maior consumo *per capita* de energia. As cidades mais dispersas envolvem maiores distâncias para chegar aos destinos intencionados. Se não houver um sistema de transporte de massa eficiente, 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. Além disso, o crescimento descontrolado das cidades reduz as zonas rurais férteis e a cobertura vegetal. Desse modo, a densidade urbana é um importante elemento no consumo de energia.

O campo de estudos da Economia Urbana foi inaugurado com o modelo de localização de Von Thünen (1826). O modelo apresenta a localização de diferentes atividades produtivas agrícolas no espaço ao redor de um centro econômico. Este forneceu as bases para o modelo de Alonso (1964), posteriormente aprimorado no modelo Alonso-Mills-Muth (AMM), e inspirou decisivamente a Nova Economia Urbana (NEU). A Economia Urbana tradicional baseia-se em um modelo de cidade circular com um espaço no centro da cidade, *Central Business District* (CBD), responsável pelas atividades de comércio, indústria e serviços públicos, de modo a concentrar todo o emprego local. Os modelos de cidade monocêntrica contemplam o *trade-off* entre acessibilidade e escolha de residências pelas famílias, empregando como variável relevante o tempo de deslocamento diário da residência ao local de trabalho. Desse modo, a localização é importante na distância de deslocamento entre a residência e o local de trabalho. Na evolução desses modelos, diversos estudos em Economia Urbana passaram a considerar a cidade com mais de um centro.

Os estudos da literatura internacional tem ressaltado a importância da ocupação do solo e das políticas de transporte sobre o consumo de energia. Glaeser e Kahn (2004) analisaram o fenômeno do espalhamento urbano para os Estados Unidos, indicando como causa o uso excessivo do automóvel. Este fenômeno de cidades vem ocorrendo no Brasil e em várias partes do mundo. Autores como Newman e Kenworthy (1989a e 1989b), Naess (1995), defendem que o consumo de energia com transportes deixa de ser eficiente em função do espalhamento urbano. Isso pode ampliar a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e a extensão desnecessária da infraestrutura urbana de modo a impactar o uso de energia. Brownstone e Golob (2009) concluíram ainda que a densidade habitacional é inversamente proporcional ao consumo de energia do automóvel. Gosling e Walker (1992) mostraram que a eficiência energética deve ser considerada nos estágios do planejamento urbano. Essas evidências sugerem que, nos últimos anos, houve uma intensificação do metabolismo das atividades humanas com respeito ao consumo energético.

Embora existam poucos estudos ligando as duas áreas de pesquisa no Brasil, existe evidências empíricas da forte relação entre os padrões de desenvolvimento urbano e uso de energia. Pampolha (1999), em seu estudo sobre as 27 capitais brasileiras, mostrou que a população e as variáveis espaciais relacionadas às áreas urbanizadas explicam o consumo de energia por transporte em 92% da variação observada. 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. Nessas condições, a implementação de estratégias de conservação de energia em áreas urbanas é de fundamental importância para a economia brasileira.

A energia é um bem de consumo necessário para a manutenção de um padrão de bem-estar. Desse modo, a hipótese levantada neste trabalho é que o consumo eficiente de energia está relacionado com o espaço habitacional, os deslocamentos e a estrutura espacial das cidades. Essa questão tem sido tema de frequentes discussões no Brasil, com base na evidência do rápido crescimento das cidades e do adensamento urbano, do padrão ineficiente de uso de automóveis e do aumento do consumo de energia. As pesquisas sobre esse tema têm sido limitadas pela ausência de um modelo que ligue o planejamento urbano e políticas de transporte para o uso de energia. O *Urban Energy Footprint Model* (UEFM) desenvolvido por Larson e outros (2012) surgiu para ligar as áreas de Economia Urbana e Economia de

Energia, através da integração entre a modelagem de simulação urbana com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos intra-urbanos. Logo, a dissertação aborda o seguinte problema:

Qual é o efeito da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética no Brasil?

O tratamento do problema sugere alguns desafios teóricos e empíricos. Se fez necessário conhecer as características habitacionais das cidades e definir um referencial teórico que contemple a Economia Urbana e forneça uma base para explicar o uso de energia nas cidades. A estrutura da organização espacial das atividades de uma cidade vem sendo debatida através de modelos agrupados no campo da Economia Urbana. O uso eficiente de energia é um tema mundial com implicações ambientais e sociais de amplo debate, principalmente com relação ao setor de 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 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 desta dissertação é que transporte urbano e habitação estão interconectados. Os resultados de modelos numéricos de simulação urbana mostram 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. Por esse motivo, surge a relevância de estudar a relação entre as opções de desenvolvimento urbano e o consumo energético.

Além desta introdução, a dissertação é composta de mais cinco capítulos. No Capítulo 2, será realizada 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. Os principais elementos abordados serão o crescimento das cidades, o aumento da frota de veículos, a expansão do consumo de combustível e de

energia elétrica, além das principais medidas de eficiência energética residencial. A análise da ocupação desordenada do solo urbano e da intensificação do padrão ineficiente de uso do automóvel permite observar a expansão acelerada do consumo de energia elétrica, a possibilidade de esgotamento dos recursos energéticos (maior uso dos combustíveis fósseis) e impactos negativos para o meio ambiente, como a poluição atmosférica. Desse modo, o problema de pesquisa da dissertação é estruturado ao longo do capítulo, com base na forte influência das políticas de transportes e ocupação do solo sobre a energia.

O Capítulo 3 tratará do referencial teórico-metodológico que servirá de base para a realização da pesquisa. Esse referencial será baseado na Economia Urbana e permitirá fundamentar a análise da eficiência energética no uso do solo e nas políticas de transporte urbano em função da distribuição espacial das cidades brasileiras. Além de uma revisão sobre a introdução do espaço na teoria econômica, o capítulo mostra o surgimento da Nova Geografia Econômica (NGE). Em seguida, serão apresentados os fundamentos da estrutura teórica básica dos modelos de cidades monocêntricas que são a base ao modelo UEFM. Por outro lado, o capítulo também apresenta o surgimento das cidades com pluralidade de centros. Ao final do capítulo, será apresentada uma revisão de trabalhos empíricos que se utilizam da modelagem numérica de simulação urbana.

No Capítulo 4, será desenvolvida a metodologia do trabalho. Serão expostas as principais características do modelo de simulação urbana, bem como os procedimentos de calibragem e as equações de energia. O modelo a ser utilizado faz a conexão entre as áreas de Economia Urbana e Economia de Energia. Os fundamentos teóricos do modelo são apresentados por Larson e outros (2012) e derivam do modelo AMM de Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969). Em seguida, serão especificadas as equações de consumo energético doméstico e dos veículos. Ao final do capítulo será apresentado o banco de dados e os parâmetros-chave utilizados para a calibragem do modelo empregado nas simulações, além do procedimento de seleção das cidades brasileiras que servirão de base para o estudo.

O Capítulo 5 apresentará os resultados das simulações realizadas. Os dados reais das cidades serão comparados com os resultados dessas simulações. As relações causais de cada choque, de acordo com as equações do modelo, serão apresentadas neste capítulo. Ao todo, serão realizadas três simulações. Na primeira, serão simuladas as implicações de um choque de

10,0% no preço da gasolina sobre as variáveis urbanas. Na segunda, mimetizaram-se os impactos de um aumento de 10,0% na eficiência do combustível do veículo. Na terceira, são simulados os efeitos de um aumento de 10,0% na renda agrícola.

Por fim, no capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais deste trabalho.

2 DESENVOLVIMENTO URBANO, POLÍTICAS DE TRANSPORTE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

No presente capítulo, será desenvolvida uma análise integrada entre o crescimento urbano, o setor de transporte e os elementos que os relacionam, tais como a acessibilidade, os deslocamentos e o uso da terra, de maneira a gerar uma abordagem do desempenho energético das cidades. O objetivo a ser atingido no capítulo é a estruturação do problema de pesquisa especificado na introdução. Os principais elementos abordados são a estrutura de consumo de energia no Brasil, especificamente nos setores de transportes, as medidas e políticas brasileiras de eficiência energética, a estrutura espacial das cidades e os sistemas de energia. Desse modo, a partir da ocupação desordenada do solo urbano e da intensificação do padrão ineficiente de uso do automóvel, o capítulo busca verificar ainda se o consumo eficiente de energia estaria associado ao espaço habitacional, aos deslocamentos e a estrutura espacial das cidades. Ao final do capítulo, pode ser observada uma forte influência das políticas de transporte e ocupação do solo sobre a energia.

2.1 ESTRUTURA URBANA E MOBILIDADE NAS CIDADES NO BRASIL

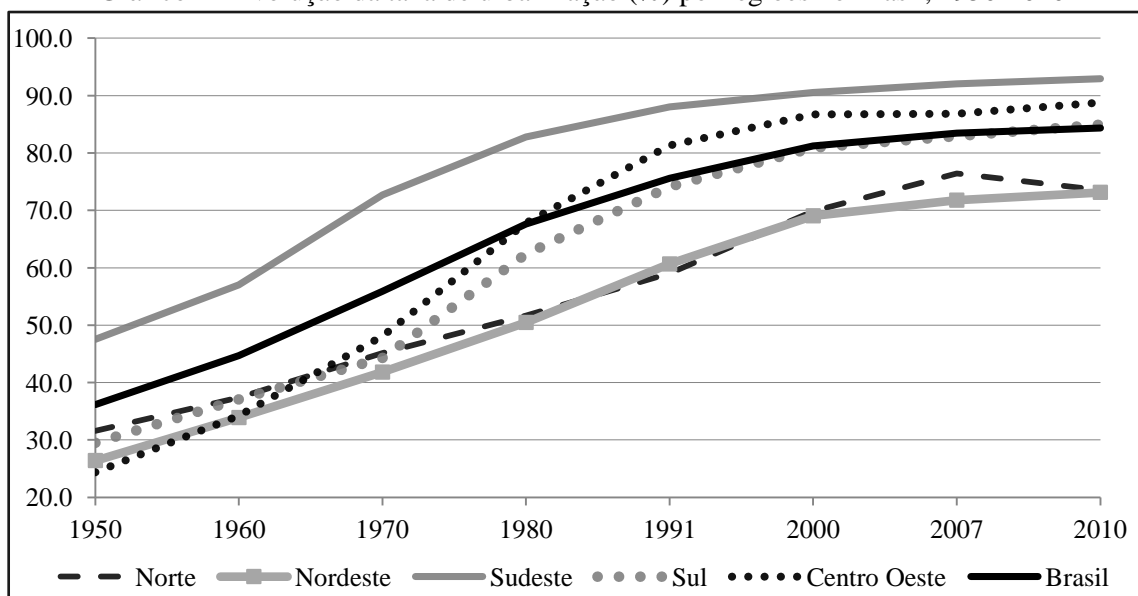
Os espaços urbanos são vistos como polos atratores de oportunidades de bem estar devido aos benefícios das aglomerações de indivíduos. Estes espaços também concentram diversos problemas econômicos e socioambientais. No início do século XXI, os grandes centros urbanos exibem dificuldades e necessidades que influenciam as condições de habitação, a saber: urbanização de áreas impróprias, adensamento urbano, congestionamentos de tráfegos, maior tempo gasto nos deslocamentos diários, maior consumo de energia, poluição dos rios e problemas ambientais em virtude do crescimento muitas vezes desordenado e sem planejamento urbano. Como consequência, muitas cidades apresentam deseconomias de aglomeração, menor eficiência energética e menor produtividade. Desse modo, o aumento da densidade populacional é maior que a capacidade de provisão de infraestrutura adequada.

A formação das cidades está vinculada aos estudos sobre economias de aglomerações, que apontam que estas derivam de forças aglomerativas e desaglomerativas. As forças aglomerativas assumem duas formas, economias de especialização e de urbanização, e são explicadas pela concentração da população e atividades econômicas. Com a expansão dos

espaços urbanos uma série de problemas surge, tais como a elevação dos preços dos serviços urbanos e salários. Isso conduz a fatores desaglomerativos uma vez que as atividades humanas se dispersam para outras localidades. Logo, surge a limitação no crescimento das cidades pelo acréscimo dos custos nos serviços que são influenciados pela aglomeração (MARTINS, 2003).

O processo de desenvolvimento das cidades, a partir da Revolução Industrial, foi intenso devido à necessidade de mão-de-obra nas indústrias. Com a redução do número de trabalhadores no campo, houve um incremento significativo da população urbana. O Gráfico 1 mostra a evolução desse intenso processo de urbanização da sociedade brasileira. Nos últimos 60 anos a parcela urbana da população mais que duplicou. Pode-se observar que em 20 anos a população urbana passou de 36,16% do total, em 1950, para 55,92%, em 1970. Depois desse período, o processo de urbanização tornou-se cada vez mais acelerado, alcançando 81,23% em 2000. As migrações internas contribuíram para essa trajetória de crescimento. Em 1950, a região Sudeste era responsável por 47,55% da população que residia nas áreas urbanas, enquanto a região Norte, por 31,49%. Essas duas regiões apresentaram assim as maiores taxas de urbanização no Brasil. Esse cenário se alterou em 2010, com a região Sudeste apresentando 92,95%, e agora a região Centro Oeste com a segunda maior taxa de urbanização, de 88,8%.

Gráfico 1 - Evolução da taxa de urbanização (%) por regiões no Brasil, 1950-2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base em IBGE, 2014

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). Entre 1998-2012, a população brasileira residente aumentou 18,7%. Esta que era de 163.385.796 habitantes, em 1998, passou para 193.946.886 habitantes, em 2012. Esse crescimento populacional, juntamente com o problema do adensamento urbano, não acompanhou a implantação de uma infraestrutura de circulação e de condições de habitabilidade necessárias ao processo, o que acabou gerando um fenômeno da periferização em muitas grandes cidades. Essa falta de planejamento urbano tem sérias implicações socioeconômicas e ambientais, tais como problemas sociais, para o país e tem sido objeto de pesquisa.

O processo de urbanização começou a se intensificar internacionalmente a partir da Revolução Industrial. As cidades, desde então, possuem uma história que influencia o formato atual. No Brasil, existe a tendência da população de renda mais elevada habitar as regiões centrais, enquanto os grupos de baixa renda ocupam o entorno das aglomerações urbanas, na chamada periferia (CÔRTEZ, 2008). Nas regiões centrais coexiste infraestrutura adequada com melhores condições de vida e bem-estar. Em contrapartida, nas áreas periféricas predominam as condições precárias com as famílias habitando áreas impróprias. Nessas áreas, geralmente observa-se a ausência de serviços urbanos e sociais básicos, além de universidades, bibliotecas, parques e outros. Esse cenário evidencia a segregação residencial em função da renda. A locomoção da classe de renda mais elevada geralmente é feita por automóveis, enquanto a de baixa renda utiliza o transporte público inadequado, já que poucas cidades no país possuem sistemas de transporte metroviário.

Essa breve análise sugere a tendência do padrão de dispersão espacial da população no Brasil. Embora a população de renda mais elevada geralmente reside nos centros, também é possível verificar recentemente a procura de maiores áreas de habitação em regiões com baixa densidade e menos tráfego, por esta classe de renda mais elevada. Segundo Villaça (2011), em São Paulo, a população de renda mais elevada vem deixando o centro da cidade em direção aos bairros residenciais mais ricos. Esta população também tem acesso ao transporte mais rápido e, portanto, ao uso do automóvel além do consumo de mais espaço habitacional (VASCONCELOS, 2001). Quanto às regiões geograficamente periféricas, estas atraem a

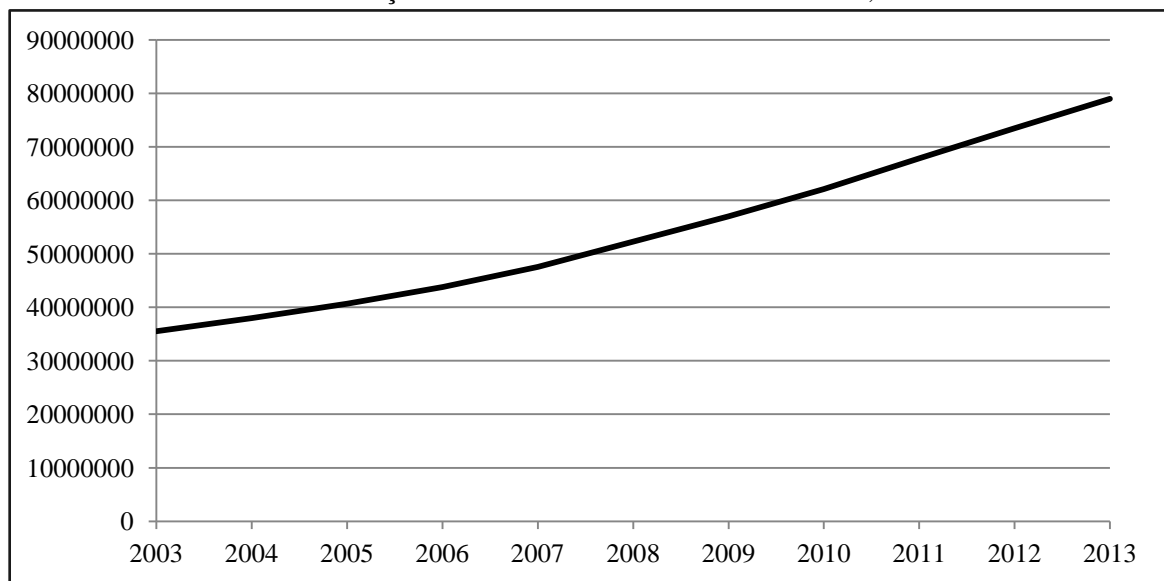
população de menor renda devido ao menor preço dos terrenos. Nadalin (2010) elencou três fatores pelo qual a população de menor renda, de São Paulo, passou a habitar as regiões periféricas: (i) disponibilidade de terrenos a serem ocupados irregularmente; (ii) oferta pública de conjuntos habitacionais desde a década de 1960; (iii) terrenos urbanizados de baixo preço. Os respectivos moradores gastam mais tempo e dinheiro no deslocamento pendular da residência para o local de trabalho, tendo como desvantagem a residência longe do emprego. Desse modo, as classes de renda familiar podem determinar a dispersão espacial da população entre as regiões.

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, com isso, o padrão ineficiente de uso; (ii) crescimento do consumo de combustíveis; (iii) expansão do consumo de energia elétrica. Isso devido ao crescimento dos rendimentos reais do trabalho das classes de menor renda e que residem nas regiões periféricas das áreas urbanas. Dados recentes apontam para um crescimento acelerado da frota de veículos automotores e, conseqüentemente, do consumo de combustível no Brasil. Ambos os processos vem acontecendo sem um controle apropriado no país. No longo prazo, esses fatores, juntamente com a expansão do consumo de energia, 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.

O padrão ineficiente de uso do automóvel traz conseqüências negativas para a sociedade. A urbanização acelerada e desordenada torna-se desfavorável à racionalização e à economia de combustível. As conseqüências ambientais são muito danosas uma vez que grande parte da energia consumida e derivada do petróleo é altamente poluente. A frota nacional total de veículos no Brasil no período de 10 anos mais que dobrou. Entre 2003 e 2013, a frota nacional circulante aumentou consideravelmente em 122,0%. Conforme o Gráfico 2, esta que era 35.501.041, em 2003, passou para 78.984.887, em 2013. Esse crescimento comprova a importância do modal rodoviário no setor de transportes no país e a dimensão do fenômeno

nacional crescente do consumo de combustíveis. A maior parte do consumo de combustível ocorre no uso intensivo de derivados de petróleo. Isso causa os graves problemas ambientais nos grandes centros urbanos, devido às emissões de poluentes veiculares e gases de efeito estufa. Esse fenômeno, juntamente com os engarrafamentos nos centros urbanos, a precariedade do transporte público de massa e uma frota obsoleta, tem sido tema de diversas pesquisas. Nesse contexto, a distribuição espacial da frota de veículos fornece uma avaliação da evolução desta frota por Unidade da Federação (UF).

Gráfico 2 - Evolução da frota nacional circulante no Brasil, 2003-2013

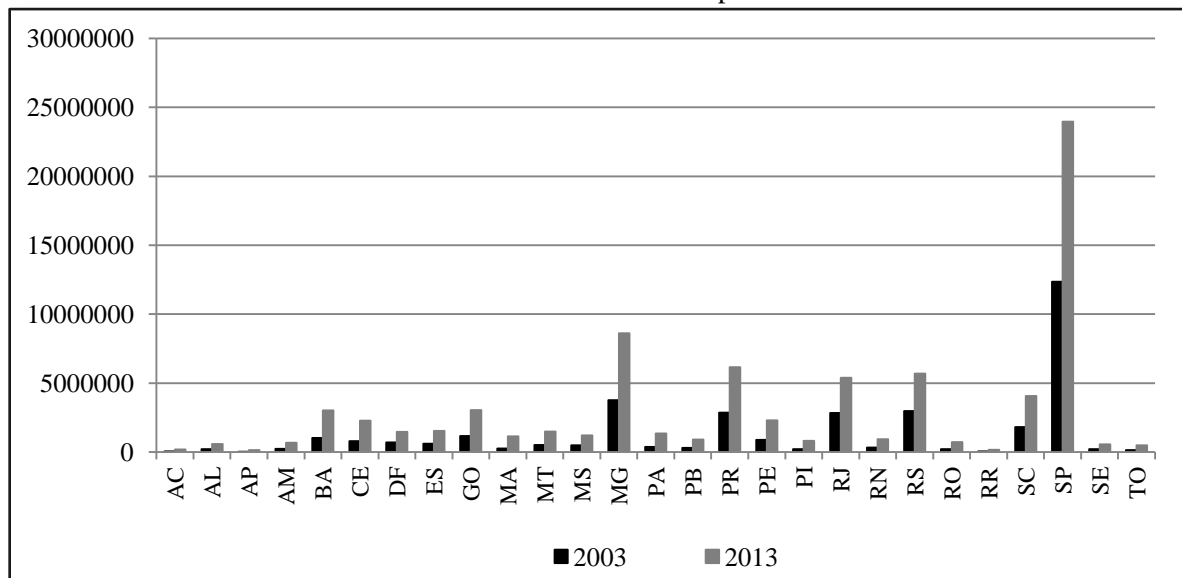


Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no DENATRAN, 2014

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 como descrito anteriormente.

O Gráfico 3 exibe a frota circulante de veículos por Unidade da Federação para os anos de 2003 e 2013. Em 2003, o Estado de São Paulo era responsável por 34,79% da frota circulante de veículos, enquanto que o Estado de Minas Gerais, por 10,60%. Esse cenário não se alterou em 2013, com os dois estados apresentando a maior parte da frota circulante no Brasil. Por outro lado, os Estados do Amapá e de Roraima, em 2003, apresentaram o menor percentual de toda a frota circulante no país, sendo 0,12% e 0,14% respectivamente. Em 2013, estes dois estados também são os que possuem a menor frota circulante de veículos no país. Em resumo, mais uma vez, os dados apontam para o aumento da frota de veículos no Brasil. Esse aumento da frota circulante de veículos leva a padrões ineficientes de uso. Logo, o padrão de uso que é ineficiente e não necessariamente a posse do veículo.

Gráfico 3 – Frota circulante de veículos por UF: 2003 e 2013



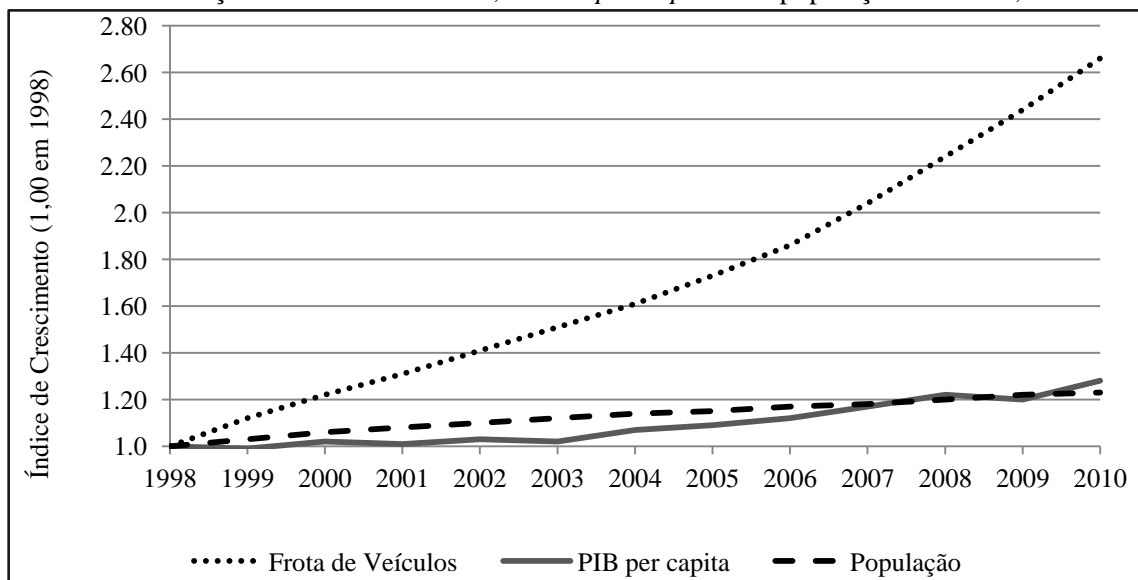
Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no DENATRAN, 2014

A crítica ao crescimento da frota de veículos e ao seu padrão ineficiente de uso refere-se ao fato de que os ambientes urbanos estão cada vez mais congestionados por veículos e, assim, maiores são o custo e o tempo gasto em deslocamentos. A produtividade dos trabalhadores tende a diminuir com o maior tempo gasto nos deslocamentos intra-urbanos, uma vez que o nível de estresse e de atrasos é grande. Além dos congestionamentos, também surgem o problema de poluição atmosférica e do grande consumo de energia. Como consequência, menor é a eficiência energética e menor produtividade da economia nas cidades. Logo, torna-se necessário investir na infraestrutura viária, no melhoramento da circulação dos veículos e no incentivo ao uso de transporte público de massa. Por isso, iniciativas de desestímulo ao uso

do transporte motorizado individual em áreas urbanas, juntamente com investimentos públicos em transportes coletivos, são uma importante ferramenta de mobilidade urbana, com melhorias de bem-estar para a população urbana e eficiência energética para as cidades. Desse modo, a mobilidade nos centros urbanos, precisa estar relacionada ao maior uso do transporte coletivo, não somente para reduzir os congestionamentos nas ruas, mas também para reduzir o consumo de energia e a probabilidade de acidentes de trânsito nas cidades.

O Gráfico 4 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 ainda mais 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.

Gráfico 4 - 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

A análise exposta anteriormente fornece evidências sobre o conjunto de condições de mercado que prioriza o transporte rodoviário e, individual no Brasil. Esse sistema de transporte traz consequências negativas, como ineficiência energética, altos índices de

emissão de poluentes atmosféricos e acidentes. O modal ferroviário apresenta-ser-ia como melhor alternativa de transporte em massa, pois o consumo energético reduzido *per capita* é menor, ocupa também um espaço menor, polui menos em relação aos automóveis e ônibus e é livre de congestionamentos. Nesse sentido, o transporte urbano de massa traria grandes consequências para a estrutura das cidades e qualidade de vida nas áreas urbanas.

Um dos problemas mais comuns do crescimento urbano é o maior tráfego de veículos. A falta de cobertura da rede de transportes públicos e a respectiva ineficiência onde existe levaram a um aumento dos veículos em viagens pendulares. Isso gera congestionamentos, poluição e redução da qualidade de vida nos meios urbanos. Conforme a Tabela 1, a análise de tempo de deslocamento entre a residência e o local de trabalho no Brasil revela que, 32,1 milhões de indivíduos, que representa 52,21% do total de trabalhadores empregados fora do domicílio levavam de seis a trinta minutos para chegar ao trabalho em 2010. Do mesmo modo, aproximadamente 7 milhões, ou seja, 11,4% dos trabalhadores, gastavam mais de uma hora para chegar ao trabalho. Na região Sudeste encontra-se o maior percentual de trabalhadores que gastam mais de meia hora para chegar ao trabalho, enquanto que na região Sul o menor percentual. Considerando o aumento do número de veículos circulando no país entre 2010 e 2013, esses números já podem ter tido uma mudança significativa.

Tabela 1 – Participação (%) dos trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento casa-trabalho, 2010

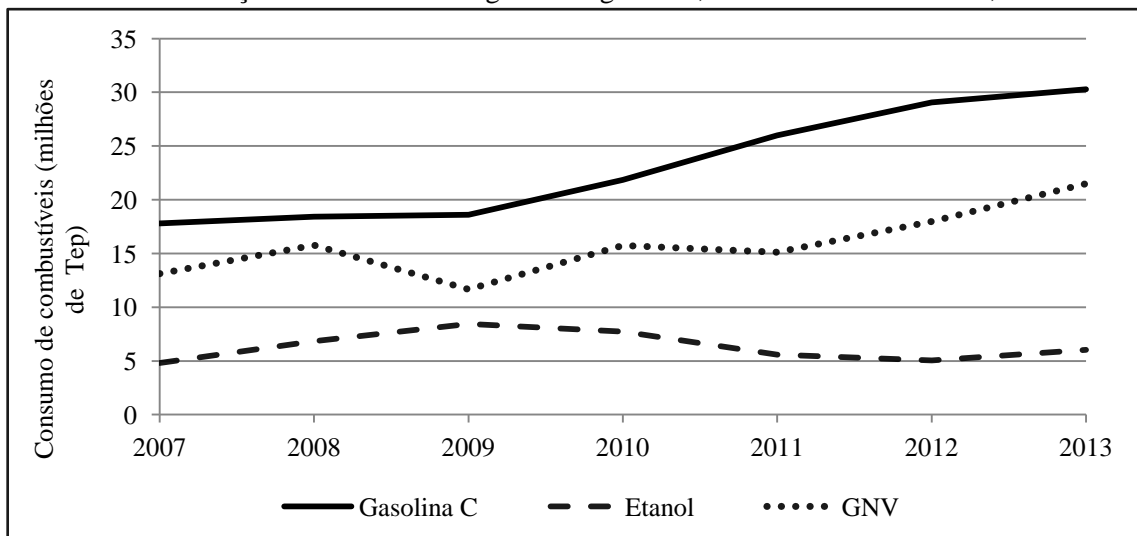
Tempo de deslocamento	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro Oeste
Até 5 minutos	13,06	16,96	15,40	9,86	16,12	14,70
De 6 minutos até meia hora	52,21	55,17	55,05	47,64	59,22	52,81
Mais de meia hora até uma hora	23,33	19,57	21,23	26,83	18,84	22,13
Mais de uma hora até duas horas	9,62	6,70	7,12	13,02	5,23	9,24
Mais de duas horas	1,78	1,60	1,20	2,65	0,58	1,12

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

O aumento do tempo de deslocamento, acompanhado do crescimento acelerado da frota de veículos automotores e seu padrão ineficiente de uso, tem resultado no aumento do uso de combustíveis no Brasil, em especial, a gasolina automotiva. O Gráfico 5 mostra a evolução do consumo energético de gasolina, etanol e gás natural veicular (GNV), entre 2007 e 2013. Dentro dessa evolução, o consumo de óleo diesel usado no transporte público não é abordado. Na modelagem de simulação urbana proposta, considera-se o deslocamento por automóvel, como meio de transporte privado. Por isso, a ênfase no consumo de gasolina, etanol e GNV ao longo do tempo. Na seção 2.2, será exposta a participação percentual do óleo diesel pelo

setor de transportes em 2010. Em resumo, o transporte público de massa não será abordado no contexto da modelagem de simulação urbana. Isso pressupõe um determinado grau de abstração em relação às estruturas das cidades brasileiras, mas não interfere nos resultados. Conforme Gráfico 5, é possível observar o aumento do consumo de combustíveis no período analisado. Em 2007, o consumo de gasolina era de 17.807 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP), enquanto o consumo de etanol e de GNV era de 4.808 e 13.116 milhões de tep, respectivamente. A partir desse ano aumentou ainda mais o consumo de combustíveis. Entre 2007 e 2013, o consumo de gasolina, etanol e GNV cresceu 70,0%, 25,0% e 64,0%, respectivamente. Este aumento acompanha o atual cenário do crescimento da frota de veículos. Com relação ao desenvolvimento das cidades, o problema que surge é o consumo exagerado do combustível e o uso impróprio do espaço viário, uma vez que as ruas passaram a ser utilizadas para estacionamento e não para circulação de mercadorias. Nesse contexto, é importante destacar também o esgotamento dos combustíveis fósseis. Por isso, a importância da substituição de combustíveis fósseis por outras fontes de energia e os planos de mobilidade urbana nas cidades.

Gráfico 5 - Evolução do consumo energético de gasolina, etanol e GNV no Brasil, 2007-2013

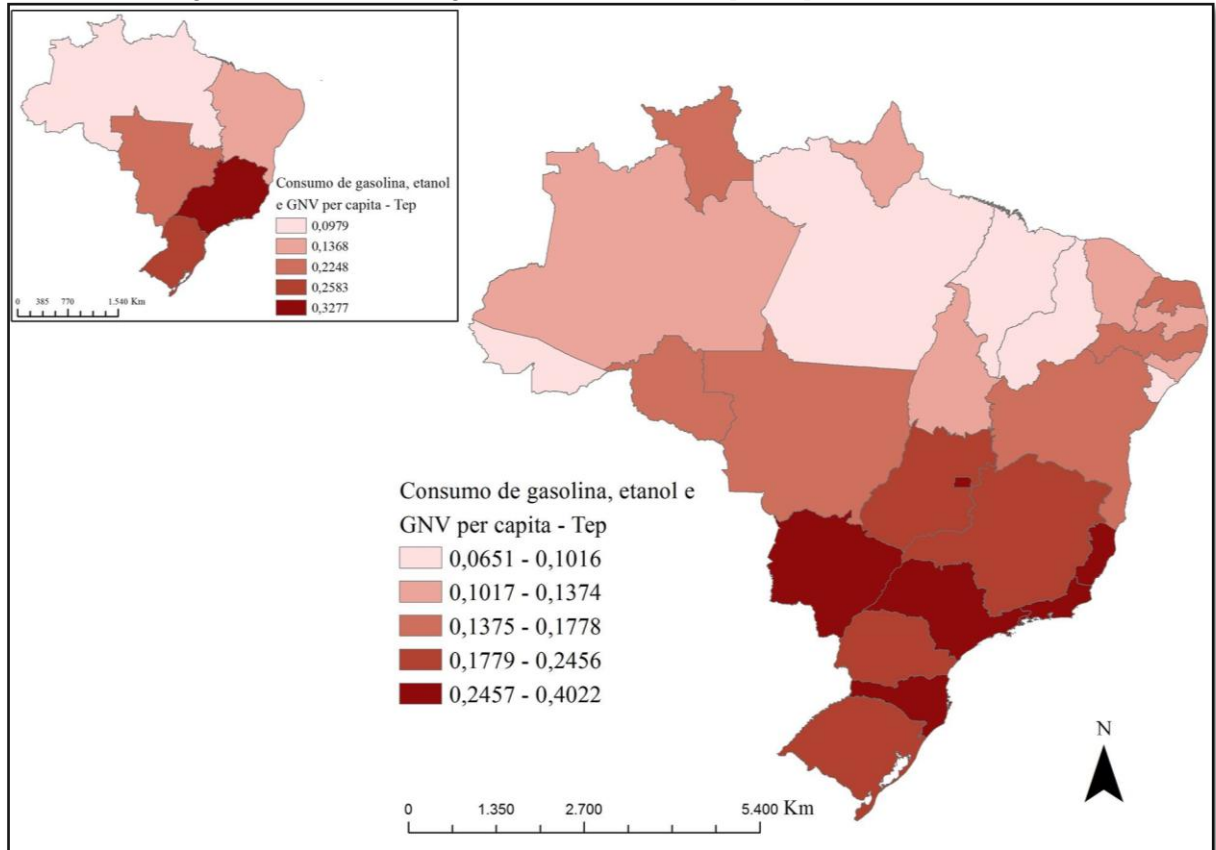


Fonte: Elaboração própria, 2014 com base na ANP, 2014; GASNET, 2014

A Figura 1 mostra a distribuição espacial do consumo de gasolina, etanol e GNV *per capita* por Unidade da Federação e Regiões para o ano de 2010. Os Estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Espírito Santo e Santa Catarina são os maiores consumidores. Em relação às regiões, o consumo *per capita* é altamente concentrado na região Sudeste. Na região Norte encontra-se o menor consumo *per capita* de gasolina, etanol e GNV, sendo de 1.550 milhões de tep,

enquanto que na região Sudeste o maior consumo, sendo de 26.229 milhões de tep. Como a região Sudeste tem um elevado contingente populacional, a região destaca-se como maior consumidora *per capita* em 2010.

Figura 1 – Consumo de gasolina, etanol e GNV *per capita* no Brasil, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base em ANP, 2014; GASNET, 2014; IBGE, 2010

Diante desse contexto, a integração entre os segmentos urbanos de transportes e a análise do uso de energia, com um planejamento adequado de longo prazo, pode conduzir a externalidades positivas, a saber: manutenção e qualidade dos espaços verdes e dos espaços públicos, eficiência dos transportes públicos de massa, facilitar a mobilidade do trânsito nas grandes cidades, redução da dependência do automóvel, diminuição das emissões de gases poluentes e aumento da eficiência energética. As iniciativas para uma melhor qualidade de vida aos habitantes das cidades são relevantes e oportunas. Por estes motivos, a importância do uso da terra e das políticas de transporte urbano do ponto de vista da eficiência energética das cidades no contexto atual. A economia de energia dentro desse quadro de desenvolvimento urbano será analisada na próxima seção.

2.2 EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E DESLOCAMENTO NO BRASIL

A energia é um bem de consumo necessário para a manutenção de um padrão de bem-estar e a maior parcela do seu uso ocorre nas cidades. Em relação à oferta interna de energia, que é o total da energia demandada no país, a participação de fontes não renováveis chegou a 54,9%, enquanto as fontes renováveis atingiram 45,1%, em 2010. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) (2014), a participação de fontes não renováveis, na oferta interna de energia, aumentou para 59,0% em 2013. Entre 2004 e 2010, o consumo final de derivados de petróleo aumentou 22,0%. Estes dados mostram a importância da busca por medidas de diversificação das fontes de energia, para aumentar os processos de substituição energética. O consumo de energia dos derivados de petróleo, de energia elétrica e do bagaço de cana foram as fontes com maiores participações em 2010, sendo 42,1%, 16,6% e 12,5%, respectivamente. As informações da Tabela 2 permitem considerar que o consumo de gasolina, óleo diesel e álcool etílico representaram um aumento considerável no uso de energia no Brasil entre 2000 e 2010. Nesse período, o etanol teve um aumento de 95,6% no consumo, o óleo diesel teve aumento de 40,6% no consumo e a gasolina 32,0%. Cabe ressaltar ainda que parte do aumento de 137,3% no consumo de gás natural ocorreu no segmento veicular.

Tabela 2 - Consumo final energético por fonte (10³ Tep)

Fonte	2000	2010	Variação %
Energia elétrica	28.509	39.964	40,2
Óleo diesel	29.505	41.498	40,6
Bagaço de cana	13.381	30.066	124,7
Lenha	13.627	17.052	25,1
Gás natural	7.115	16.887	137,3
Gasolina	13.319	17.578	32
Álcool etílico	6.457	12.628	95,6
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	7.844	7.701	-1,8
Outras fontes*	22.067	18.537	-16

Fonte: BEN, 2010, 2013

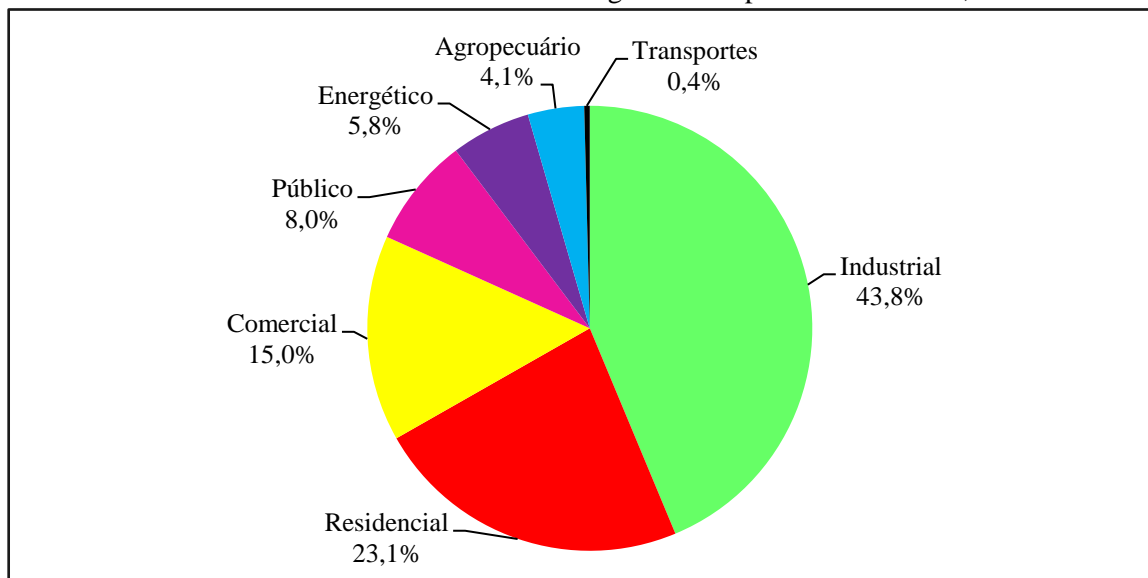
Nota: *Inclui óleo combustível, gás de coqueria, carvão vegetal, coque de carvão mineral.

A energia elétrica mantém uma considerável participação no consumo energético residencial. A maioria dos equipamentos presentes nas residências requer esta fonte de energia, tais como a demanda pelos serviços de aquecimento de água, preparação e armazenamento de alimentos, entretenimento. 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 setores industriais são os principais consumidores de energia elétrica. Em 2010, estes setores consumiam 43,8% no Brasil (GRÁFICO 6). O segmento residencial é o segundo com maior participação no consumo de energia elétrica no Brasil, representando 23,1% do consumo em 2010. A elevada taxa de urbanização, a expansão do setor de serviços e o rápido crescimento no número de edificações contribuíram para uma maior participação do segmento no consumo de energia elétrica. Os setores do segmento comercial e público representam 23,0% do consumo total. O setor de transportes consome apenas 0,4% do total. Ademais, somando o segmento residencial ao comercial e público, observa-se que os setores baseados em edificações consumiram 46,1% desse total, ultrapassando assim o consumo do industrial.

Gráfico 6 - Estrutura do consumo de energia elétrica por setor no Brasil, 2010*

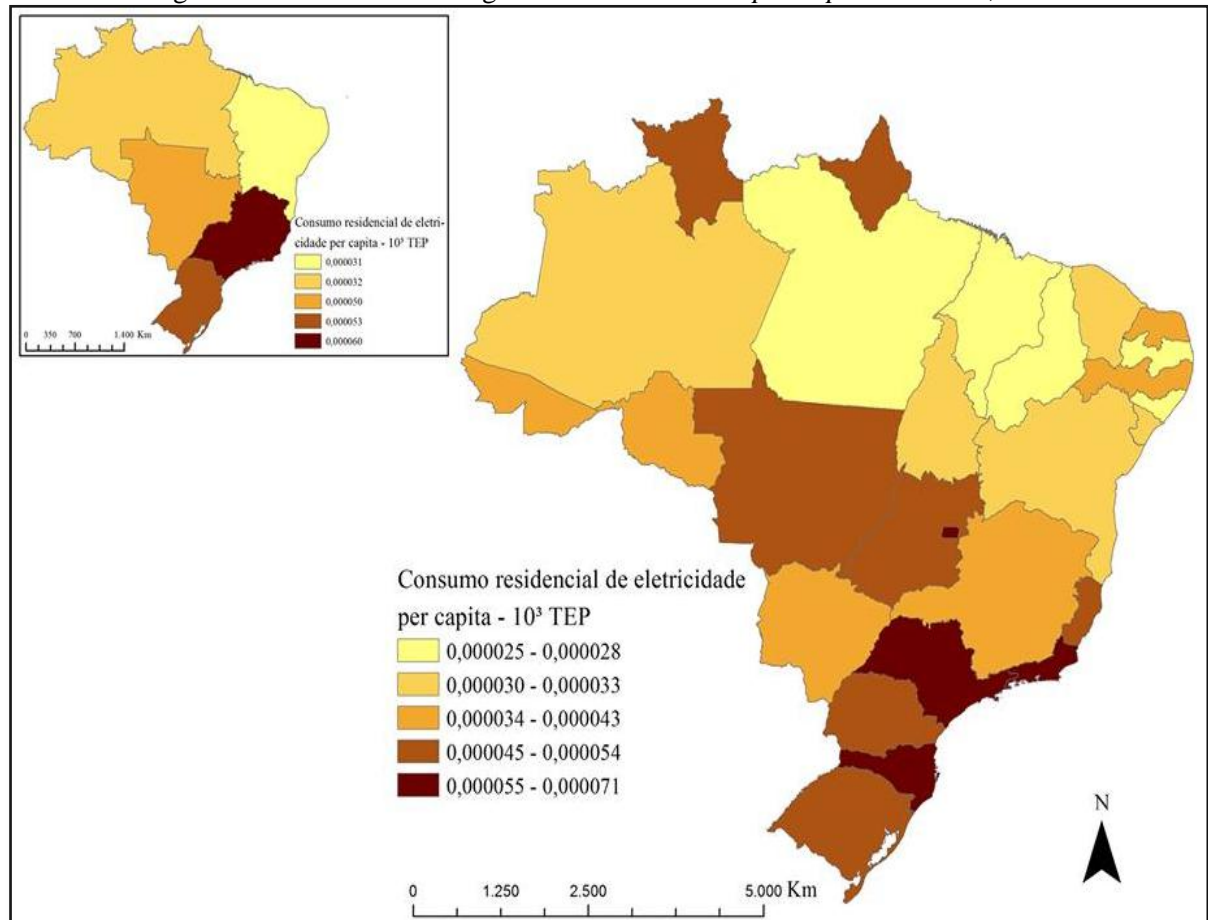


Fonte: BEN, 2013

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

A Figura 2 mostra a distribuição espacial do consumo de energia elétrica residencial *per capita*, entre as Unidades da Federação e as grandes regiões, no Brasil em 2010. No segmento residencial, o consumo *per capita* de energia elétrica é maior nos Estados de São Paulo, Distrito Federal, Rio de Janeiro e Santa Catarina, seguindo a maior renda dos consumidores. Como resultado, o maior consumo de energia está localizado na região Sudeste do Brasil. Entretanto, o menor consumo *per capita* de energia elétrica está na região Nordeste.

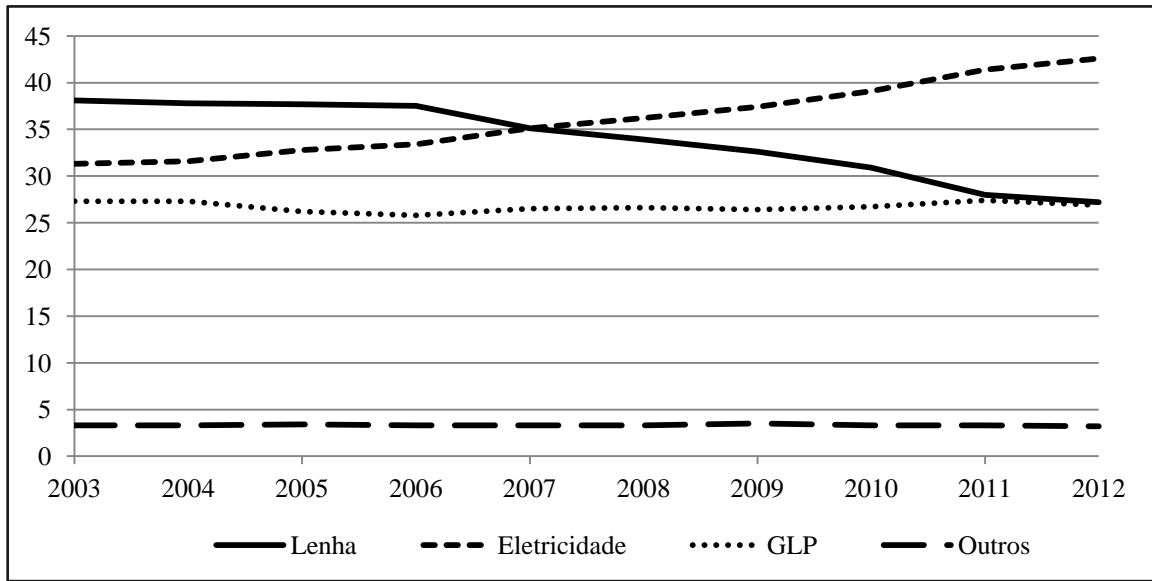
Figura 2 – Consumo de energia elétrica residencial *per capita* no Brasil, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no BEN, 2014; IBGE, 2010

O Gráfico 7 mostra a evolução estrutural do consumo residencial total de energia no Brasil entre 2003 e 2012. O consumo de energia elétrica nesse período aumentou 36,0% no segmento. Este ultrapassou o consumo de lenha que até 2006 contava com a maior participação, acima de 35,0%. Fontes de energia como a lenha, muito utilizada no meio rural, vêm se reduzindo em termos percentuais e perdendo importância ao longo dos anos. No período analisado, a lenha teve um decréscimo de 28,6%. Em relação ao ano de 2011, a lenha e o GLP apresentaram, respectivamente, decréscimo de 2,9% e 1,8%, enquanto a energia elétrica apresentou crescimento de 2,9%.

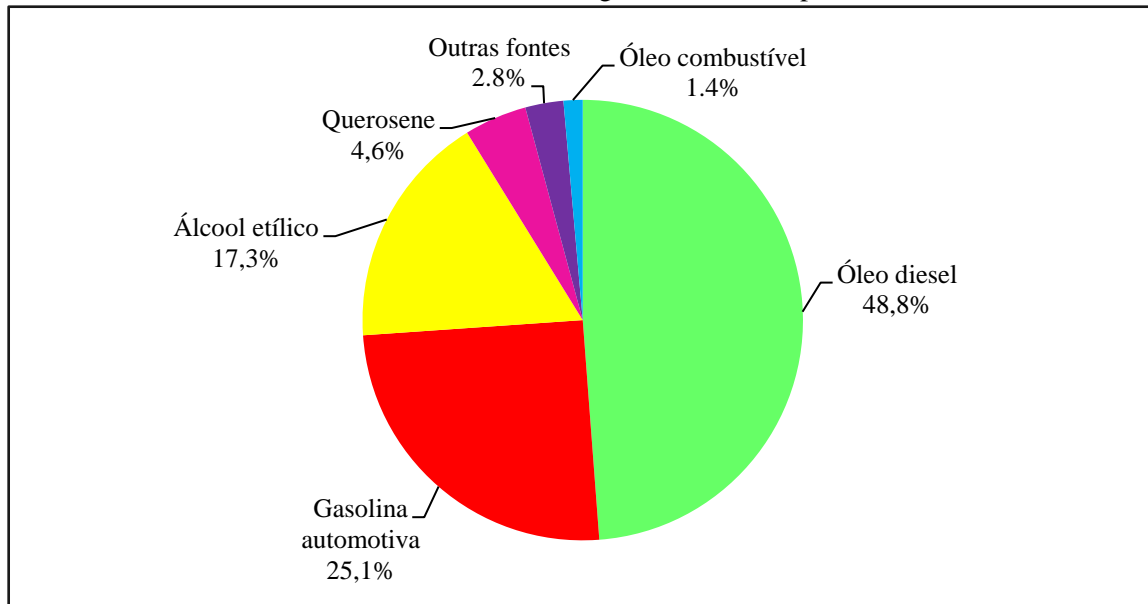
Gráfico 7 - Participação (%) das fontes de energia no consumo residencial de energia no Brasil, 2003-2012



Fonte: BEN, 2013

Em relação às fontes de energia utilizadas pelo setor de transportes, o óleo diesel representou o maior percentual em 2010 conforme o Gráfico 8. Do total de 69.720 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) de energia consumida pelo setor de transportes, o diesel representou 48,8%. O segundo maior percentual é a gasolina automotiva, com 25,1%. O óleo diesel e a gasolina, juntos representam 73,9% do total da energia consumida no setor de transportes. Embora várias medidas tenham sido adotadas para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, estas não têm sido suficiente para diminuir a taxa de crescimento com que os combustíveis fósseis vêm sendo utilizados. O Brasil apresenta várias alternativas para a expansão da oferta de energia alternativa, como etanol, biodiesel, geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis e outros. O investimento na oferta de energia proveniente dessas fontes precisa considerar o uso mais eficiente no setor de transportes. Desse modo, o uso urbano de energia e as respectivas políticas de eficiência energética no sistema de transporte precisam ser adotadas. Cabe destacar que não é somente a diversificação da matriz energética brasileira que levará as cidades serem mais eficientes. Nesse contexto, é preciso um conjunto de medidas em relação à mobilidade urbana e as questões energéticas.

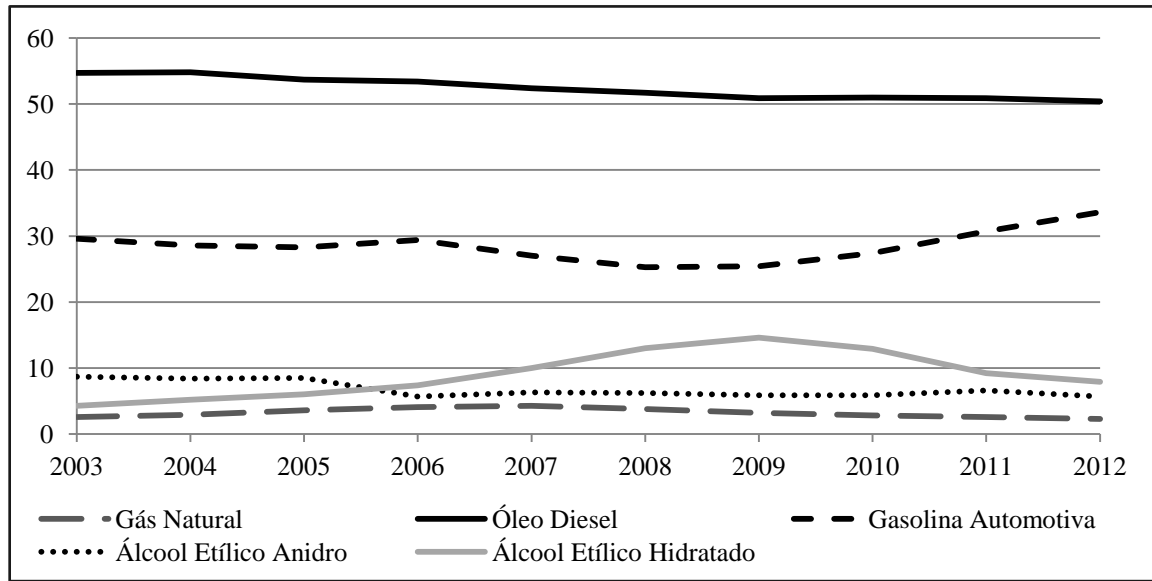
Gráfico 8 - Estrutura do consumo de energia no setor transportes no Brasil, 2010



Fonte: BEN, 2013

A maior parte do consumo de energia (combustível) no setor de transportes ocorre no modal rodoviário. O reconhecimento oficial das rodovias como modal prioritário destaca-se apenas no início dos anos 50. A construção de Brasília é um importante fator para este desenvolvimento, pois foi essencial para a integração com outras regiões do país. As rodovias consolidaram-se de uma maneira que a composição da matriz nacional de transportes de cargas tem predominância no modal rodoviário em detrimento dos transportes ferroviário e outros. Estas passaram a atrair a urbanização nos seus arredores, provocando uma mudança espacial na estrutura das cidades. Atualmente, o setor rodoviário brasileiro ainda tem a maior concentração na matriz nacional de transportes. O Brasil é um país que utiliza basicamente a modalidade rodoviária com 52,0% de participação do total de transporte de cargas em 2011, enquanto o modal ferroviário participa com 30,0% deste total. Os 18,0% restantes são compostos pelos modais de cabotagem, hidroviário e dutoviário (PNLT, 2012).

Gráfico 9 – Participação (%) das fontes de energia no consumo do setor transporte rodoviário no Brasil, 2003-2012



Fonte: BEN, 2013

Das fontes de energia do setor rodoviário, o óleo diesel representa a maior parcela de consumo. Conforme o Gráfico 9, essa participação se manteve acima de 50,0% entre 2003 e 2012. A gasolina automotiva é o segundo derivado mais consumido, com aproximadamente 30,0% do total da energia consumida no setor rodoviário. O álcool etílico hidratado aumentou sua participação até 2009, atingindo o pico com 14,6%, mas vem decrescendo desde então. Os demais segmentos mantiveram a participação inferior a 10% no período. A problemática nesse setor gira em torno de questões da sustentabilidade ambiental, com emissões de gases de efeito estufa (GEE)¹¹, e questões econômicas, com custos globais. O setor de energia no Brasil apresentou uma participação de 32,0% no total de emissões de dióxido de carbono equivalente em 2010, enquanto o uso da terra e florestas apresentaram 22,0% do total (BRASIL, 2013). Em relação aos custos do setor transportes, aumentos no preço do petróleo, por exemplo, causam impactos macroeconômicos na economia como um todo. O custo de vida da população encarece, uma vez que os produtos derivados do petróleo são usados como insumos necessários para o desenvolvimento de quase todas as atividades econômicas. Logo, o aumento no preço do combustível leva a aumentos nos custos de transportes. Isso proporciona maiores custos de produção e também maior preço do produto final.

¹¹ Dentre os gases de efeito estufa, estão: Dióxido de carbono (CO₂), Gás metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O) e gases fluorados.

O rápido crescimento do consumo de energia e o esgotamento dos recursos energéticos indicam a necessidade e a importância de se pensar nos problemas que surgirão no longo prazo, ao nível da ocupação da terra e uso urbano de energia. A preocupação com a eficiência energética no Brasil, dentro desse cenário de acelerado consumo de energia, tem resultado em programas de economia de energia e serão analisadas na próxima seção.

2.3 PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL

Na década de 70, depois do primeiro choque do petróleo, iniciou-se a preocupação dos governos com o suprimento de recursos energéticos. No Brasil, o uso de energia começou a aumentar consideravelmente após 1945, devido à urbanização acelerada no processo de industrialização e aumento da infraestrutura de modal rodoviário. Desde 1984, as políticas de eficiência energética tem desempenhado um papel importante na economia brasileira. O objetivo tem sido o de conter o rápido crescimento do consumo de energia e atenuar o esgotamento dos recursos energéticos, além de contribuir para a redução das emissões de dióxido de carbono. O uso eficiente de energia é um tema mundial e recorrente, que tem implicações ambientais e sociais para as cidades.

As bases para as ações de eficiência energética no Brasil foram iniciadas em 1984, com a adoção do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Esse programa coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) tem a finalidade de contribuir para a racionalização do uso da energia elétrica, informando aos consumidores sobre a eficiência energética de cada produto (INMETRO, 2014). Os produtos recebem etiquetas com faixas coloridas para informar o consumo de energia dos equipamentos. Fazem parte do PBE, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), criado em 1985, e o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET) de 1991. O PROCEL promove a racionalização do consumo de energia elétrica, por meio do Selo PROCEL de economia de energia, enquanto o Conpet busca incentivar o uso eficiente dos derivados de petróleo e do gás natural entre todos os setores. Ambos os programas integravam o Grupo Técnico (GT) para composição do regulamento técnico para as proposições da efficientização de energia em edificações, resultado da Lei de Eficiência Energética², que dispõe da Política Nacional de

² Lei 10.295/2001.

Conservação e Uso Racional de Energia. Outras medidas governamentais com reflexos na eficiência energética em áreas urbanas são o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf)³, que visa metas de economia de energia, e os Planos Decenais de Energia (PDEs), que estabelecem a conservação de energia elétrica. Desse modo, o Brasil tem se colocado por um longo período com referência internacional de temas de política de eficiência energética e gerenciamento da demanda.

Os regulamentos técnicos buscam gerar condições para etiquetagem da eficiência das edificações residenciais, comerciais e públicas. Estes regulamentos estabelecem requisitos mínimos de conforto térmico e desempenho energético, promovendo benefícios para toda a sociedade. O Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edifícios do PROCEL, o chamado PROCEL Edifica,⁴ define o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. O objetivo principal é promover a eficiência energética e o conforto térmico dessas edificações por meio do programa nacional de etiquetagem. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), para edifícios comerciais, de serviços e públicos, por exemplo, apresenta três pontos que devem ser analisados sobre a eficiência energética: o sistema de envoltória (paredes, cobertura e janelas), iluminação e condicionamento de ar. A etiqueta classifica estas edificações em diferentes níveis: A, sendo o edifício mais eficiente, até o E, menos eficiente, portanto os edifícios que consomem mais energia.

Uma iniciativa na área de transportes foi o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular para veículos leves (PBEV)⁵. Este foi inserido dentre da Lei de Eficiência Energética e classifica o consumo de combustível conforme a categoria definida a partir do tamanho ou uso do veículo. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) recebe uma nota de A (veículo mais eficiente) a E (veículo menos eficiente). Esse programa visa comparar as características de eficiência energética dos modelos dos veículos disponíveis no mercado (INMETRO, 2014).

A política energética brasileira é enfatizada pelo estímulo a diversificação das fontes de energia. O Programa Nacional do Álcool⁶ (PROÁLCOOL) incentivou a substituição dos

³ Portaria 594/2011.

⁴ Portaria 163/2009.

⁵ Portaria 391/2008.

⁶ Decreto 76.593/1975.

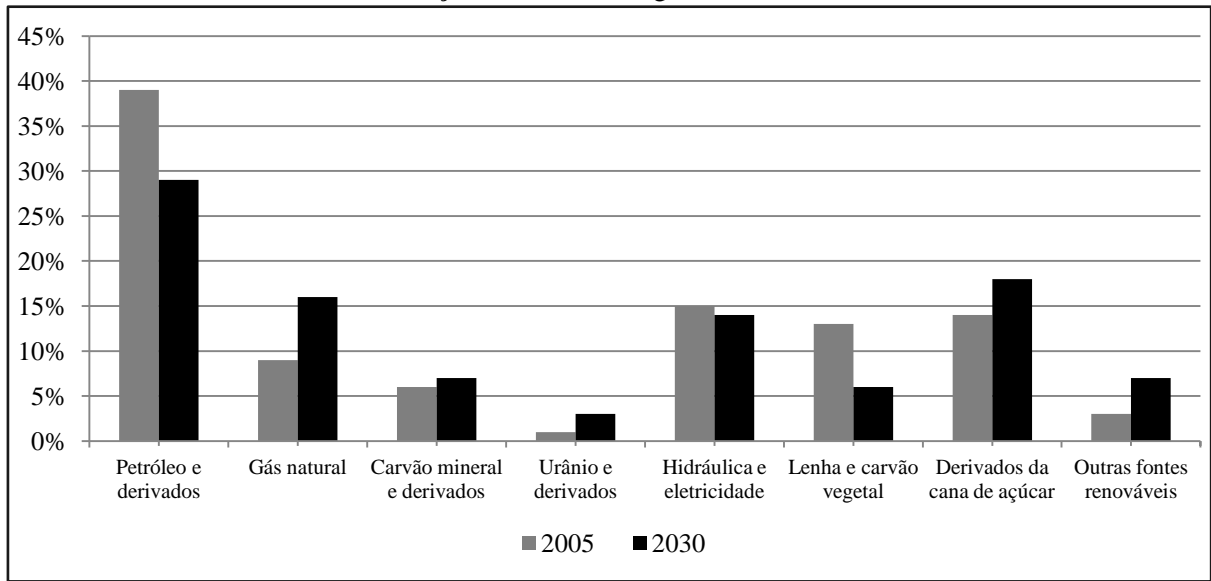
combustíveis derivados de petróleo por etanol. O Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica⁷ (PROINFA) foi instituído a fim de diversificar a matriz energética nacional e aumentar a participação da energia elétrica produzida a partir das fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse programa sinalizava a segurança do abastecimento posterior à crise energética e o consequente racionamento de 2001. Outro programa foi o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel⁸ (PNPB), lançado para inserir o biodiesel na matriz energética nacional, que ainda passa por dificuldades (BRASIL, 2014). Outras medidas complementares foram colocadas em prática na tentativa de diversificar a matriz energética e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, como a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Desse modo, a nível internacional o Brasil sempre se colocou como uma das maiores fronteiras de diversificação energética.

Em face da necessidade de se buscar formas racionais do uso de energia, as fontes alternativas como eólica, solar, biomassa são importantes para a redução da dependência dos combustíveis fósseis. Essa dependência deve-se principalmente pela concentração dos transportes rodoviários na matriz energética. As projeções para 2030 mostram que a fonte de energia petróleo e derivados diminuirá a participação na composição da matriz nacional. Conforme o Gráfico 10, essa participação diminuirá de 39,0% em 2005, para 29,0% em 2030 (EPE, 2007). No entanto, Pimentel (2011) mostra que o grande potencial do pré-sal e também das fontes renováveis de energia garantirão a segurança energética do Brasil. A substituição de energia elétrica por gás natural tem aumentando nos últimos anos e, até 2030 essa fonte de energia aumentará sua participação para 16,0%. Destaca-se também o acréscimo da participação dos derivados da cana de açúcar na matriz energética nacional. Ademais, a lenha e o carvão vegetal que representavam 13,0% em 2005, terão participação reduzida a 6,0% em 2030. Comparado aos padrões internacionais, o Brasil apresenta uma considerável diversificação da matriz energética. Uma política energética voltada para as cidades poderia tornar a distribuição do uso de energia, entre as respectivas fontes ainda mais sustentáveis.

⁷ Lei 10.438/2002.

⁸ Lei 11.097/2005.

Gráfico 10 - Evolução da matriz energética brasileira, 2005 e 2030



Fonte: EPE, 2007

A análise nesta seção descreveu as medidas e políticas brasileiras de eficiência energética que vêm sendo praticadas para conter o rápido aumento do consumo e estimular a diversificação das fontes de energia. Os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) (2013) indicam que persiste a participação do óleo diesel e da gasolina na composição do setor de transportes. Como consequência, ocorre o aumento da poluição local (ares urbanos), regional e global. No entanto, as medidas mitigadoras para a redução da poluição não tem sido suficientes para conter o crescimento dos combustíveis fósseis utilizados. Como esta questão se relaciona com o crescimento populacional e ao crescimento das cidades, é importante também que sejam analisadas questões como: desenvolvimento urbano, transportes e energia conjuntamente. Para tanto, a próxima seção explora a forma urbana do consumo de energia, sobretudo para os serviços de transporte urbano.

2.4 ESTRUTURA URBANA E CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL

Esta seção explora a relação entre a estrutura espacial das cidades e os sistemas de energia. As cidades se desenvolvem constantemente em escala e tamanho e as suas estruturas urbanas se alteram por meio das construções e reconstruções, o que configura os novos cenários urbanos. Nas últimas décadas, observa-se a concentração das metrópoles, que segundo o ponto de vista urbanístico desencadeia uma série de problemas comuns para as cidades. As grandes cidades brasileiras se defrontam com condições urbanas deficitárias em vários temas, sobretudo os de

infraestrutura e mobilidade urbana. O adensamento urbano juntamente com a intensificação do uso do automóvel e seu padrão ineficiente aponta para a necessidade de pensar na problemática do nível da ocupação do solo e do consumo energético. Desse modo, a implementação de estratégias de conservação de energia à escala urbana é importante para a economia brasileira.

As transformações em áreas urbanas do Brasil vêm gerando mudanças de elementos urbanos, tais como: os espaços construídos (residências, edifícios) e espaços não construídos (áreas livres, praças, sistema viário e outros). A configuração das cidades não se apresenta de forma ordenada, como modelo único e contínuo. As regiões no entorno dos centros das cidades tem um preço mais elevado dos solos e, por essa razão, o crescimento urbano desordenado levou a deslocação da habitação para periferia. As regiões periféricas surgem em resposta às necessidades de sobrevivência da população mais vulnerável e de baixa renda. Essa expansão deriva na dificuldade da mobilidade dos indivíduos, uma vez que as distâncias entre o local de trabalho e de habitação estabelecem deslocamentos cada vez maiores. Desse modo, se uma cidade possui população espalhada, vivendo em lugares periféricos longe do centro de empregos (centro comercial e empresarial), conseqüentemente a cidade terá um maior consumo de energia no setor de transportes. No entanto, se a cidade for densa e tiver um bom planejamento urbano, de modo que a distância entre o local de trabalho e de habitação seja menor, a energia consumida no deslocamento também será menor.

A necessidade do acréscimo da circulação dos indivíduos não foi sincronizada com obras que destinassem a melhoria dos meios de transportes urbanos de massa. Ao contrário, o uso ineficiente do automóvel passou a ganhar mais força. Esse processo encadeia um conjunto de problemas, como maiores congestionamentos, poluição, aumento acentuado do consumo de energia, ocupação de solos rurais ou florestais e diminuição dos espaços verdes. Isso implica que a forma urbana do consumo de energia precisa ser considerada na avaliação dos impactos de políticas energéticas e também na formulação de novas políticas energéticas.

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 urbano⁹ para os Estados Unidos, indicando como causa o uso massivo do automóvel. Este padrão de cidades vem ocorrendo em várias partes do mundo e também no Brasil. Outras pesquisas, como 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. Sobre o mesmo tema de estudo, 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 e outros (1995) mostraram que as cidades apresentam dois padrões de desenvolvimento. O primeiro envolve o espalhamento com baixa densidade populacional urbana. O segundo apresenta um movimento em direção aos subcentros com ênfase ao transporte público e alta concentração de residências e empregos em alguns locais. De acordo com os autores, a segunda forma é a mais importante para alcançar um consumo eficiente de energia. Logo, o desenvolvimento das cidades é visto de dois modos: cidade densa com maior uso do transporte público; cidade espalhada com maior uso do automóvel. Desse modo, a distribuição espacial de um tecido urbano pode influenciar diretamente no consumo eficiente de energia.

O fenômeno do espalhamento urbano, entendido como um crescimento urbano exagerado, pode causar vazios dentro da malha urbana. O governo pode ser o indutor dessa forma de desenvolvimento. Este permite a construção de habitações populares em regiões muito afastadas do centro e a invasão de áreas desocupadas nos limites das cidades (NADALIN, 2010). Cabe ainda considerar a possibilidade de falhas de mercado no uso do solo devido às alterações no valor social do espaço aberto, aos custos dos congestionamentos e diferentes níveis de oferta de infraestrutura pública (BRUECKNER, 2000). Em outro estudo, Glaeser e Kahn (2004) realçaram a piora na qualidade do ar, devido ao aumento das viagens motorizadas, como consequência do espalhamento urbano. 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

⁹ 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).

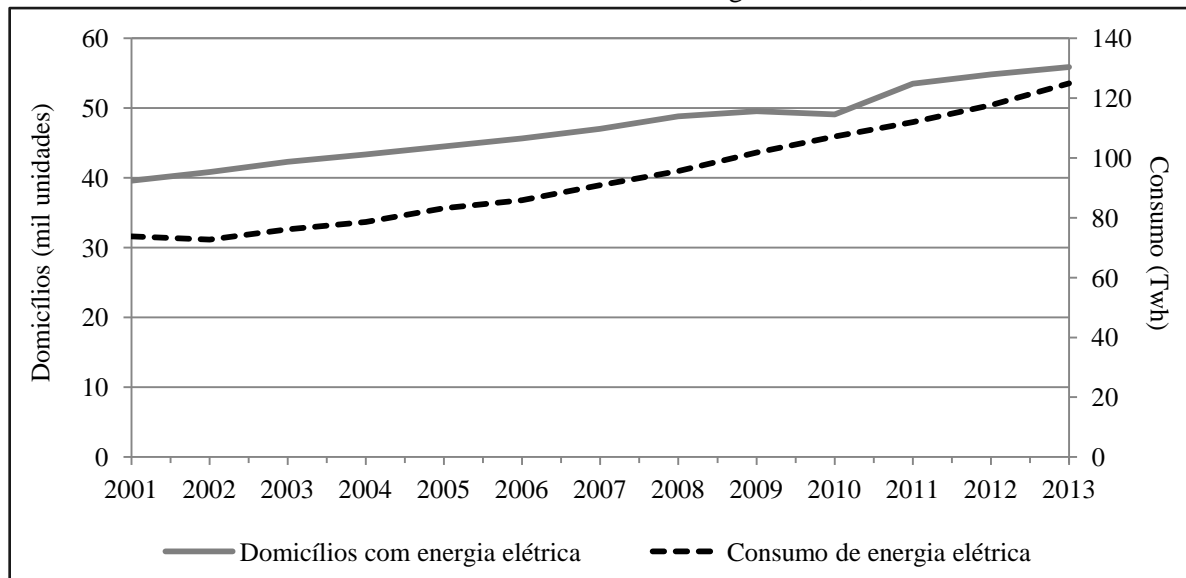
envolvem maiores distâncias para chegar aos destinos intencionados e aumento dos congestionamentos. Isso leva a maior dependência da mobilidade individual por meio do uso do automóvel e aumento do consumo de combustível. Como consequência, ocorre o aumento da emissão de poluentes atmosféricos. Além disso, o crescimento descontrolado das cidades reduz as zonas rurais férteis e a cobertura vegetal. Por fim, o espalhamento da cidade exige elevados investimentos na extensificação das redes e suportes de infraestrutura. Nesse sentido, a cidade espalhada seria, teoricamente, uma cidade que tenderia a ser menos eficiente do ponto de vista energético.

Em contraposição ao espalhamento urbano está a forma urbana das cidades compactas. Estas cidades têm maior densidade e consomem menos energia, pois possuem menor dependência dos automóveis. Posteriormente, Glaeser e Kahn (2010) relataram que as cidades mais densas têm menores emissões de dióxido de carbono. 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 e outros (2003), as cidades europeias na busca por padrões de sustentabilidade são orientadas a esta forma urbana compacta e ao transporte público de massa. Os argumentos contra a cidade compacta giram em torno da necessidade de mais espaço nas residências. No entanto, caso a mobilidade urbana seja eficiente, estas tendem a gerar maiores externalidades ambientais e energéticas.

Os fenômenos do espalhamento urbano e da cidade compacta influenciam diretamente a economia de energia, ou seja, a eficiência energética. A alta densidade populacional pode diminuir a fração de terra ocupada pela cidade. Com 49.226.751 unidades de domicílios urbanos (IBGE, 2010), as cidades brasileiras enfrentam um crescimento contínuo sobre todo o território nacional. A evolução do consumo de energia elétrica do setor residencial em relação ao aumento do número de domicílios urbanos ligados à rede de energia elétrica, no período de 2001 a 2013, pode ser observada no Gráfico 11. É possível observar uma maior evolução no consumo de energia elétrica em relação ao número de domicílios com energia elétrica. O número de domicílios com energia elétrica passou de 39.619 em 2001, para 55.857 mil unidades em 2013 (aumento de 41,0%). No entanto, a taxa de crescimento do consumo de

energia elétrica foi maior (69,0%). Isso mostra que o consumo *per capita* de energia elétrica vem aumentando no Brasil.

Gráfico 11 - Evolução do consumo de energia elétrica do setor residencial em relação ao aumento no número de domicílios com energia elétrica, 2001-2013



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base em IBGE, 2014; BEN, 2009, 2014

Embora existam poucos estudos ligando a área de Economia Urbana e a área de Economia de Energia no Brasil, existem evidências empíricas da forte relação entre os padrões de desenvolvimento urbano e uso 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.

Na análise de demanda por transportes um dos pontos mais importantes é a relação entre o modal de transporte e as características individuais e residenciais, as necessidades de execução das atividades espacialmente dispersas e a estrutura urbana. Uma medida importante nessa relação seria a diminuição do número de veículos em circulação e a melhora da qualidade dos transportes públicos urbanos para a fluidez do tráfego. Outra medida seria o uso

de veículos com motores e combustíveis mais eficientes. O incentivo ao transporte público também é de grande importância por favorecer o adensamento populacional e a concentração de comércio e serviços. Como consequência, haveria diminuição dos congestionamentos, da poluição, do desperdício de tempo com os movimentos pendulares e a ocupação mais racional do solo. Nesse sentido, para atingir um consumo mais econômico de energia, por passageiro, as políticas públicas devem sustentar um maior uso do transporte público de massa.

A multimodalidade e a intermodalidade dos transportes são questões cruciais para o desenvolvimento urbano. Para facilitar a mobilidade e ter como alternativa ao transporte tradicional de cargas do Brasil, a integração de mais de uma modalidade também precisa ser considerada. A intermodalidade facilita a passagem de um modo a outro em um mesmo deslocamento (tráfego misto). Essas medidas são importantes na diversificação dos modais de transportes e na otimização das rotas. No entanto, essas medidas requerem um equilíbrio da matriz de transporte, de modo que a oferta dos modais seja maior e mais diversificada. Uma política eficaz de transporte precisa contornar o declínio da importância relativa do modal rodoviário em proveito dos outros modais como ferroviário, hidroviário e dutoviário na matriz de transportes de cargas brasileira, de modo a gerar maiores ganhos econômicos e energéticos.

Os possíveis desequilíbrios provocados pelos sistemas de transportes públicos urbanos ineficientes diminuem o bem-estar dos indivíduos. Uma política de intermodalidade urbana surtiria o efeito de diminuir a hipertrofia rodoviária da matriz nacional de transportes e garantir a população melhores condições de acessibilidade em seus deslocamentos diários, e também segurança. A integração urbana entre sistemas sobre trilhos, tais como trens urbanos, metrô, veículos leves sobre trilhos (VLT), e outros meios de transportes como ônibus, permite a otimização do funcionamento dos diferentes modais de transportes e um desenvolvimento urbano mais sustentável. A intermodalidade permite maior eficiência energética ao desfavorecer o uso massivo do transporte motorizado individual, bem como a redução dos congestionamentos nas cidades e da poluição do meio ambiente. Uma rede de transportes públicos bem estruturada conduz a maior integração inter-setorial e regional na economia como um todo.

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. Em outra pesquisa, 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). Outro estudo, Woodcock e outros (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. Desse modo, a densidade urbana é um importante elemento no consumo de energia.

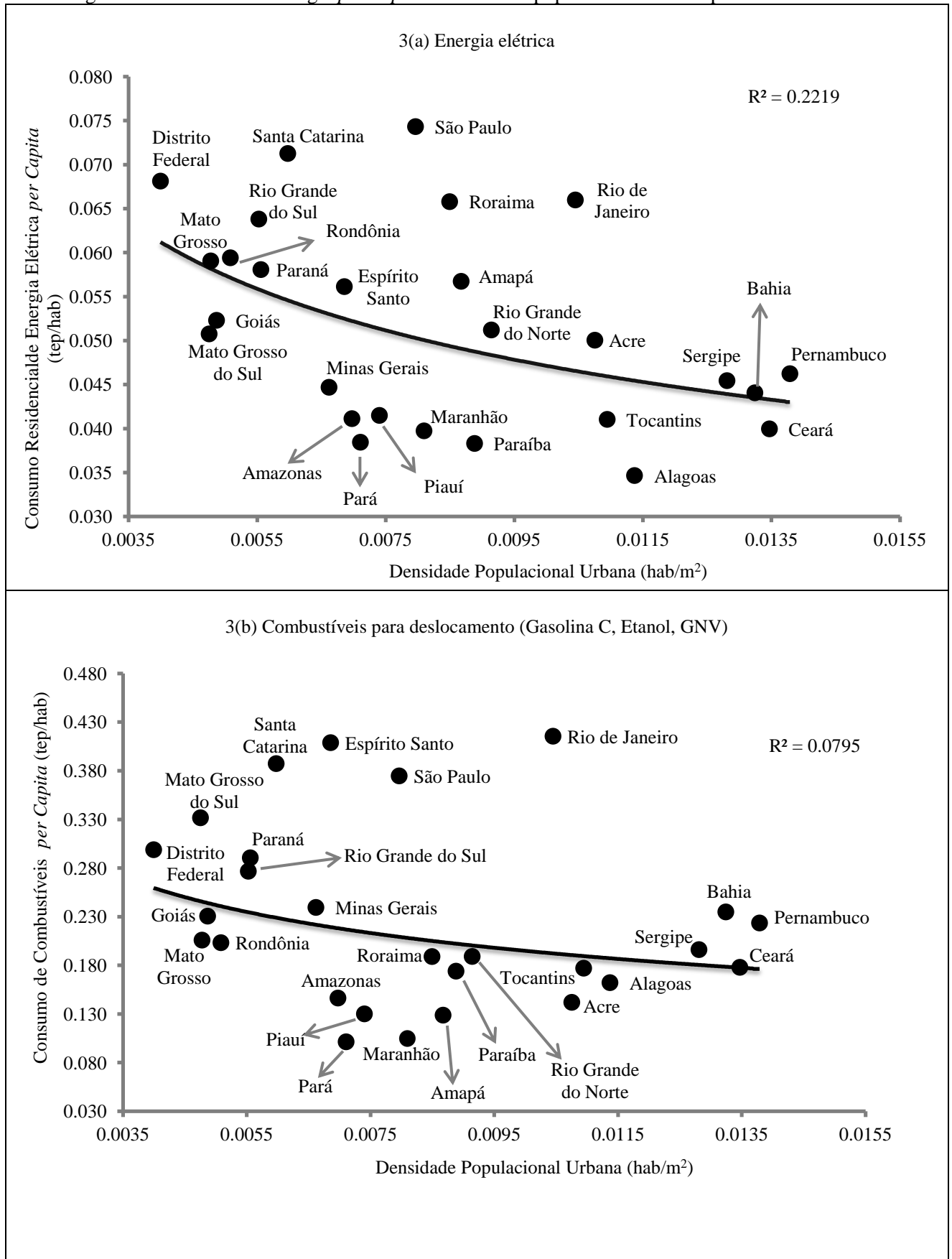
O adensamento urbano previsto para os próximos anos, a intensificação do uso do automóvel e seu padrão ineficiente de uso, descritos anteriormente, indicam a necessidade e a importância de se pensar nos problemas que surgirão ao nível da ocupação do solo e uso de energia. Dada a relevância da densidade urbana na economia de energia, um tecido urbano pode gradativamente reelaborar seus padrões de transporte, enfatizando o uso da terra mais misto, orientado ao transporte público de massa e aos modais não motorizados, com áreas e centros mais densos. Por isso, é relevante estudar a relação entre as opções de desenvolvimento urbano e o consumo energético no Brasil.

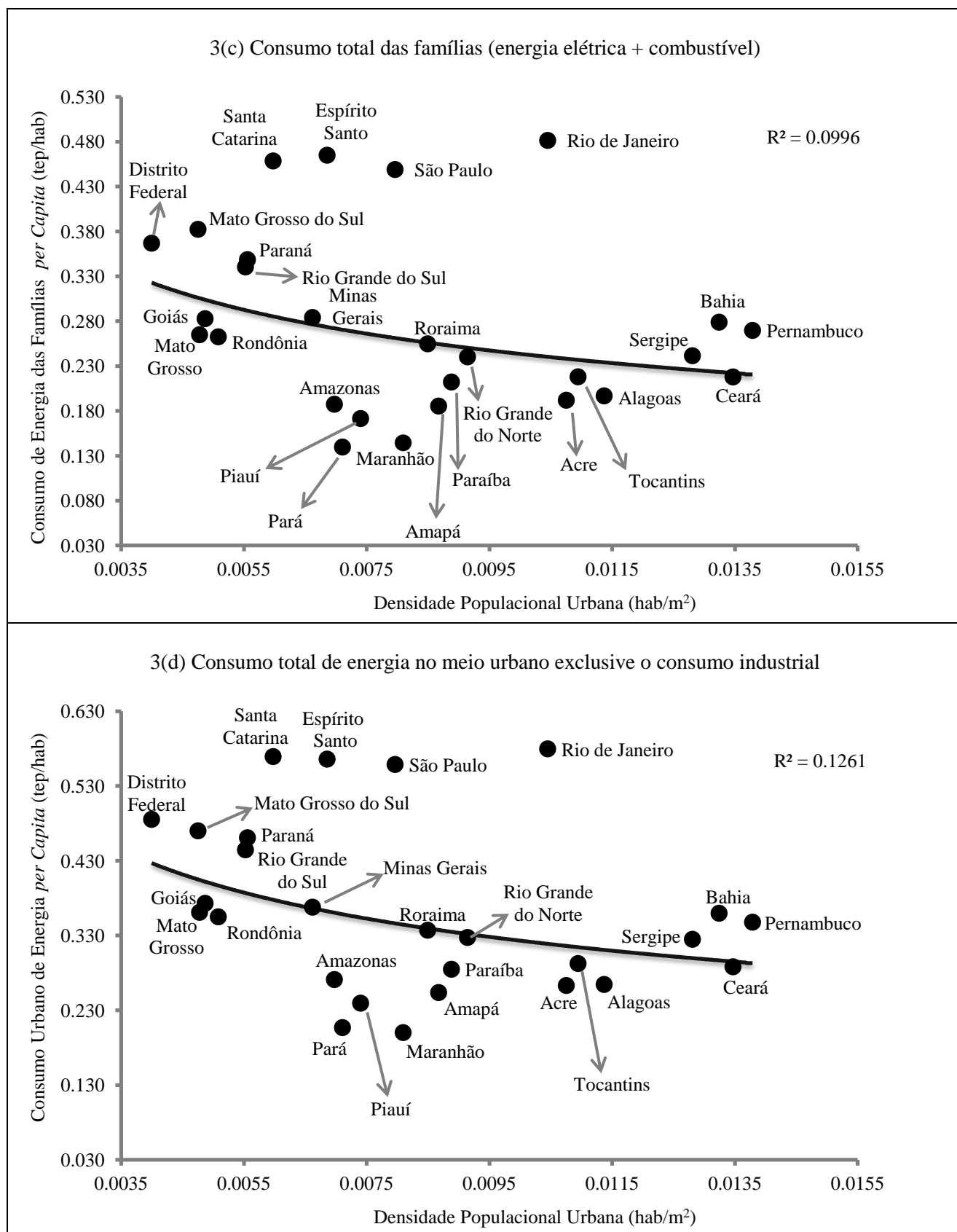
A Figura 3 mostra o consumo de energia *per capita* e a densidade populacional urbana por Unidade da Federação (UF), em 2010. Nessa Figura, são apresentados quatro tipos de consumo de energia analisados em relação à densidade populacional urbana: (a) consumo residencial de energia elétrica; (b) consumo de combustíveis para deslocamento; (c) consumo de energia das famílias; (d) consumo urbano de energia. O consumo de combustíveis, em (b), é representado por gasolina C, etanol e gás natural veicular (GNV). O consumo total de energia das famílias, em (c), é dado por consumo residencial de energia elétrica e consumo de combustíveis para deslocamento diário. Para representar o consumo total de energia no meio urbano, em (d), foi excluído o consumo industrial, e somados os outros tipos de energia, tais

como energia elétrica dos segmentos residencial, comercial e público, gasolina C, etanol, GNV e gás liquefeito de petróleo (GLP).

As cidades mais compactas e com maior densidade populacional urbana tendem a consumir menos energia *per capita*, devido à menor dependência dos automóveis. Por outro lado, as cidades mais espalhadas possuem um maior consumo *per capita* de energia. Cabe ressaltar que também é possível ter cidades maiores com centro de empregos bem densos sendo mais eficiente, se comparada a cidades mais compactas. Isso ocorre, por exemplo, em Nova York e Washington, nos Estados Unidos, onde tem transporte público de qualidade e infraestrutura. Desse modo, percebe-se a importância da política de transporte urbano para o contexto das cidades.

Na Figura 3, é possível perceber uma relação negativa e decrescente entre a densidade urbana e o consumo de energia nas Unidades da Federação. Isso pode significar que nas UFs com cidades mais espalhadas, com menor número de habitantes por metro quadrado, haveria um maior consumo de energia *per capita*. Estados como Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro apresentam-se como os maiores consumidores de energia *per capita* ficando no extremo superior da linha de tendência. Já os Estados de Alagoas e Tocantins ficaram no extremo inferior da linha de tendência, evidenciando menor consumo de energia *per capita* e também maior densidade populacional urbana. 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.

Figura 3 – Consumo de energia *per capita* e densidade populacional urbana por UFs: 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base em BEN, 2014; IBGE, 2010; EMBRAPA, 2005; ANP, 2014; GASNET, 2014; EPE, 2013

Diante do contexto apresentado até o momento, no presente capítulo, 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. 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.

Os elementos acima reforçam a importância de se estudar o desenvolvimento urbano e o uso de energia nas cidades. Desse modo, o presente estudo pressupõe o desenvolvimento e calibragem de um modelo numérico de simulação urbana para captar os efeitos de políticas de eficiência energética no uso da terra em áreas urbanas no Brasil, em 2010, para dar resposta ao problema de pesquisa apresentado. Para tanto também será necessário fundamentar teoricamente a estrutura e a concepção empírica das cidades.

No próximo capítulo, segue a apresentação da estrutura e concepção de cidades que se desenvolvem de forma circular em torno de um centro distinto. A investigação desse fenômeno parte da análise desenvolvida por Von Thünen (1826). Além da Economia Urbana Monocêntrica, é importante descrever os aspectos teóricos da dinâmica regional a partir do enfoque de Weber (1909), Christaller (1933), Lösch (1940) e Isard (1956). Esse referencial teórico-metodológico norteará a construção de um modelo numérico de simulação urbana para simular choques no setor de energia e na renda agrícola das famílias e os respectivos efeitos sobre a estrutura das cidades, uso da terra e eficiência energética.

3 ECONOMIA ESPACIAL URBANA E A MODELAGEM NUMÉRICA DE SIMULAÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar o referencial teórico que dará suporte à análise da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética na economia brasileira. A primeira seção apresenta a introdução do espaço na teoria econômica e em seguida descreve alguns elementos da Nova Geografia Econômica (NGE). Em seguida, são expostos também a estrutura teórica dos modelos de Economia Urbana, tomando como base a configuração urbana monocêntrica tradicional. A partir desta configuração, serão apresentados os modelos de cidades policêntricas. A seção final fará uma revisão da formalização de modelos numéricos de simulação urbana.

3.1 ESPAÇO E A TEORIA ECONÔMICA

A relação entre espaço e teoria econômica é comparativamente conhecida na esfera da Ciência Regional. No período até a década de 1950, alguns pesquisadores já se preocupavam com a questão da distribuição espacial do crescimento econômico (VON THÜNEN, 1826; WEBER, 1909; CHRISTALLER, 1933; LÖSCH, 1940; ISARD, 1956). Von Thünen (1826)¹⁰, foi o fundador da teoria do uso do solo e introduziu os elementos iniciais da importância de como a economia se organiza no espaço. Embora existissem estudos das áreas de geografia e economia considerando os aspectos espaciais, a conexão entre ambos não era formalizada adequadamente. A dificuldade em incorporar o espaço nas análises econômicas derivava do fato de que a teoria econômica padrão não considerava a competição imperfeita e as externalidades. O tratamento do espaço na teoria econômica evoluiu significativamente. A partir da Nova Geografia Econômica, nos anos 1990, buscou-se explicar a dinâmica das atividades econômicas no espaço, sobretudo, a formação das cidades.

O modelo de uso do solo de Von Thünen (1826) apresentou os fundamentos lógicos para a localização das atividades agrícolas no entorno das cidades pré-industriais da Alemanha. Von Thünen considerou uma cidade isolada do mundo exterior, abastecida por fazendeiros da zona rural, com a atividade agrícola organizada ao redor de um único centro consumidor

¹⁰ Von Thünen, precursor no estudo sobre a formação e estruturação do espaço agrícola, desenvolveu a obra “*Isolierte Staat*” (O Estado Isolado) publicada em 1826. A tradução da obra para a língua inglesa foi feita em 1966.

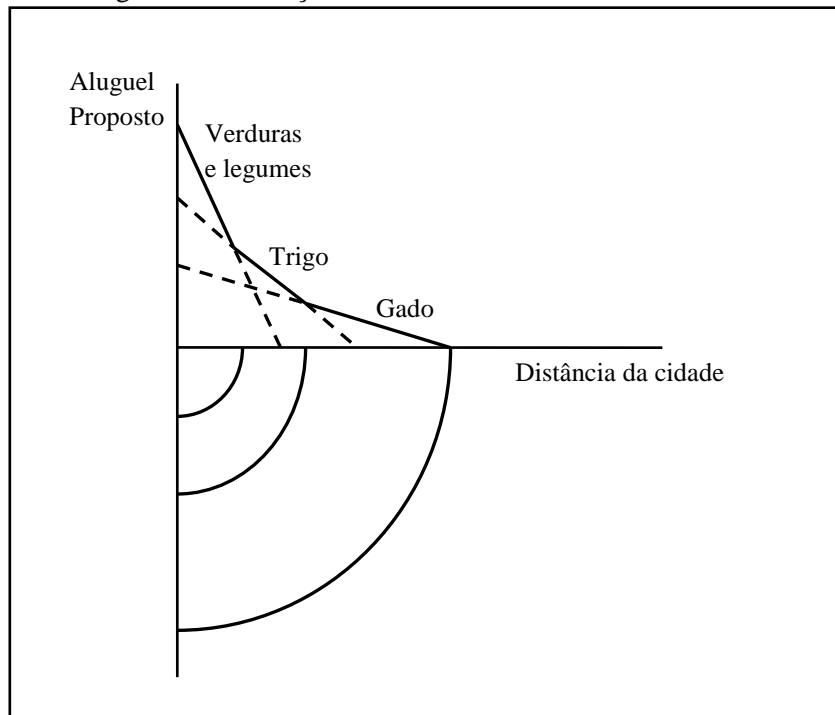
econômico. Este centro foi definido como uma cidade monocêntrica. As atividades são agrupadas de forma a constituir cinturões ou anéis concêntricos. Cada anel delimita a área de cultivo de um produto. Na decisão de localização ao longo do espaço, a distância em relação aos mercados urbanos é um fator chave como determinante dos custos de transporte. Esses custos são uniformes e proporcionais à distância. As áreas próximas ao centro urbano são poupadoras de custos de transporte e possuem aluguéis mais elevados, sendo alvo de disputa entre os produtores. O modelo evidencia como um conjunto de culturas é alocado em torno da cidade, a fim de maximizar a renda da terra, sendo esta dependente da distância ao centro consumidor. A partir de Von Thünen (1826) surgiu a concepção da renda fundiária urbana. Neste modelo, o mercado de terras é perfeitamente competitivo. Na distribuição dos terrenos cultiváveis existe uma concorrência não planejada entre fazendeiros e proprietários de terras, onde cada indivíduo agiria conforme seu próprio interesse (VON THÜNEN, 1966; FUJITA *et al.*, 1999; THISSE, 2011).

A configuração simples do modelo de Von Thünen supunha o espaço representado por uma planície sem diferenças de fertilidade nas regiões produtivas, com a terra sendo homogênea em todos os aspectos (FUJITA; THISSE, 2002). A diferença entre estas regiões acontecia devido à distância em relação ao centro. A alocação da terra próxima ao centro, para um tipo de cultura, afetaria os custos de produção das demais culturas. Isso faria com que a tarefa de determinar os tipos e a localização das plantações, não fosse tão simples. Contudo, o modelo apresenta a limitação de supor a existência e o tamanho da cidade, não explicando onde e como este surge. Ademais, também não examina os efeitos de aglomeração na formação dos anéis. Essa é uma crítica feita em Krugman e Fujita (2004), que apontam a necessidade de explicar as forças da concentração.

No modelo de Von Thünen, a concorrência entre os fazendeiros implicou na existência de um gradiente espacial de renda fundiária, com valor máximo na cidade e zero no limite mais afastado. A Figura 4 ilustra o surgimento do padrão de anéis concêntricos. A posição dos anéis depende das inclinações das curvas do gradiente de renda (funções *bid rent*). Estas são definidas como o aluguel máximo que os produtores, de uma determinada cultura, estariam dispostos a pagar pela terra a cada distância do centro. O preço de cada fração de terra é definido pelo custo de transporte. Quanto maior a distância do centro urbano maior seria o custo de transporte. Este maior custo seria compensado pelo menor custo do solo. Portanto, o

preço da terra agrícola (aluguel proposto) diminui com o aumento da distância ao centro, a uma taxa constante em cada anel. No equilíbrio, em concorrência perfeita, o gradiente de renda faz com que os fazendeiros cultivem apenas o suficiente, de cada produto, para atender a demanda (FUJITA *et al.*, 1999).

Figura 4 – Formação dos anéis concêntricos de Von Thünen



Fonte: FUJITA e outros, 2002, p. 32

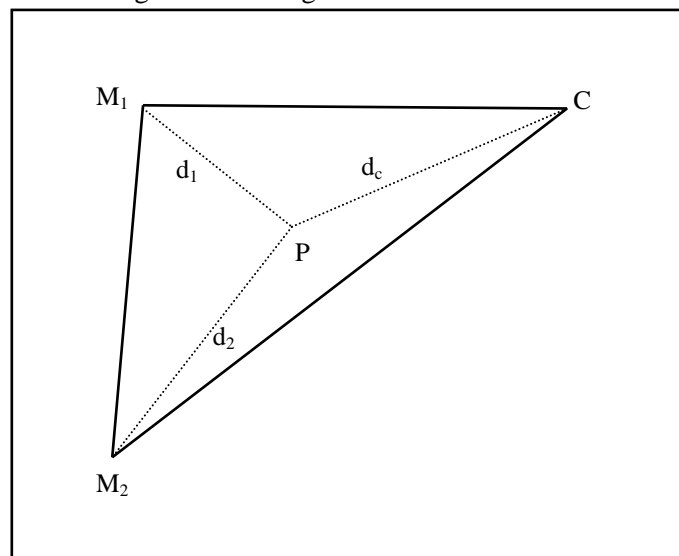
Nos anos 60, o modelo de localização do uso do solo agrícola em uma cidade monocêntrica, de Von Thünen, foi adaptado por Alonso (1964) para o contexto das cidades. Os fazendeiros foram substituídos por trabalhadores no percurso da residência para o local de trabalho e a cidade isolada foi substituída por uma região central de empregos (centro de negócios). A análise dos custos de transporte foi baseada nos custos de deslocamento diário da residência para o local de trabalho. Este modelo de cidade monocêntrica forneceu a base para uma vasta literatura teórica na área de Economia Urbana, como será visto mais adiante. O objetivo essencial dessa modelagem proposta por Alonso foi explicar a estrutura interna das cidades.

Seguindo os autores que se preocupavam com a distribuição espacial do crescimento econômico, Alfred Weber (1909)¹¹ objetivou estabelecer a localização de uma determinada

¹¹ Weber, estudioso da Teoria da Localização Industrial, desenvolveu a obra “*Über den Standort der Industrien*” publicada em 1909. A tradução da obra para a língua inglesa foi feita em 1957.

atividade industrial. Este considerou que três fatores eram responsáveis pela decisão locacional das atividades industriais: o custo de transporte, o custo de mão de obra e as forças de aglomeração e desaglomeração. As indústrias escolheriam uma localização num espaço geográfico cujos custos de transporte fossem mínimos. Com isso, os custos de transporte associados às matérias primas e aos produtos finais teriam um papel importante na determinação do local ótimo onde as indústrias se estabeleceriam. Weber encontrou o ponto onde os custos totais de transporte fossem os menores possíveis, por meio do triângulo locacional (FIGURA 5). Em um dos vértices, tem-se o ponto de consumo (mercado), C . Nos outros vértices, estão as fontes de matérias primas (insumos), M_1 e M_2 , que ofereceriam maior vantagem. O custo de transporte assumiria valor mínimo no ponto ótimo de produção, dado por P . Logo, o ponto de equilíbrio proporcionaria o menor custo para a indústria (MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011).

Figura 5 – Triângulo Locacional de Weber

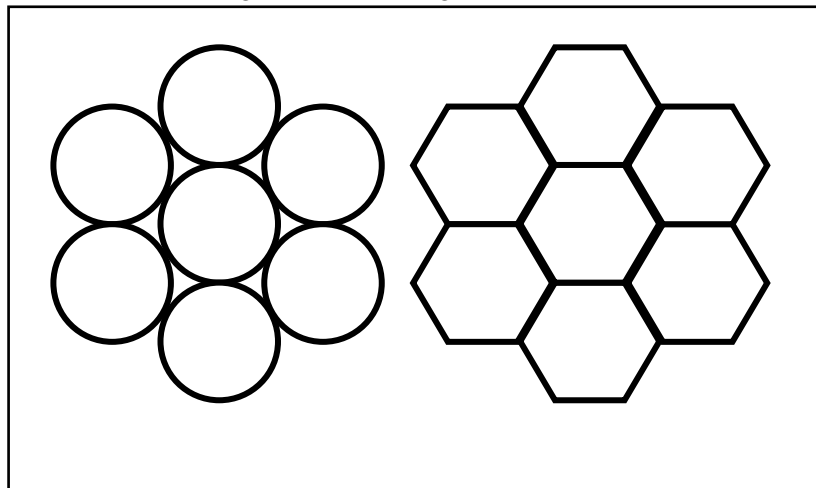


Fonte: MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011, p. 55

No modelo, ou triângulo locacional, de Weber o ponto de equilíbrio que comporta o menor custo pode, *ceteris paribus*, se deslocar devido a um acréscimo no peso do insumo/produto, ou no custo de transporte. Neste caso, o ponto P seguiria a direção locacional do insumo/produto que sofresse esta modificação e seria a melhor localização de produção industrial (MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011).

Na sequência do desenvolvimento teórico, Walter Christaller (1933)¹² desenvolveu a teoria dos lugares centrais, tentando explicar o número, tamanho e a distribuição das cidades. O autor analisou a funcionalidade hierárquica entre os núcleos urbanos de tamanhos diferentes e as causas que conduziam estes a se organizarem em uma espécie de rede. As áreas centrais constituem uma hierarquia com elevado número de cidades-mercado. Cada grupo de cidades-mercado concentra-se em um centro administrativo, sendo este também uma cidade-mercado. Ao pesquisar a distribuição espacial das cidades alemãs, Christaller estabeleceu o formato das áreas de mercado para atender a todos os consumidores, ao mesmo tempo. Desse modo estabeleceu a minimização da distância em relação às empresas. A Figura 6 mostra a formação das áreas de mercado no formato de um hexágono. O lado esquerdo mostra círculos eficientes considerando à redução da distância. No entanto, essa configuração implica em áreas desatendidas. Para atender estes mercados, as empresas se aproximariam entre si, de maneira a formar fronteiras lineares entre estas áreas. O resultado desse processo é o ordenamento do território por arranjos hexagonais das áreas de mercado (FUJITA *et al.*, 2002; MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011).

Figura 6 – Os hexágonos de Christaller



Fonte: MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011, p. 57

O tamanho destas áreas de mercado é afetado pelos custos de transporte e pela elasticidade-preço de um determinado produto. A existência de baixos custos de transporte e também elasticidades gera amplas áreas de mercado, na qual os hexágonos são maiores. Christaller pressupôs um ordenamento na aquisição dos bens. Nesse caso, bens de ordem inferior

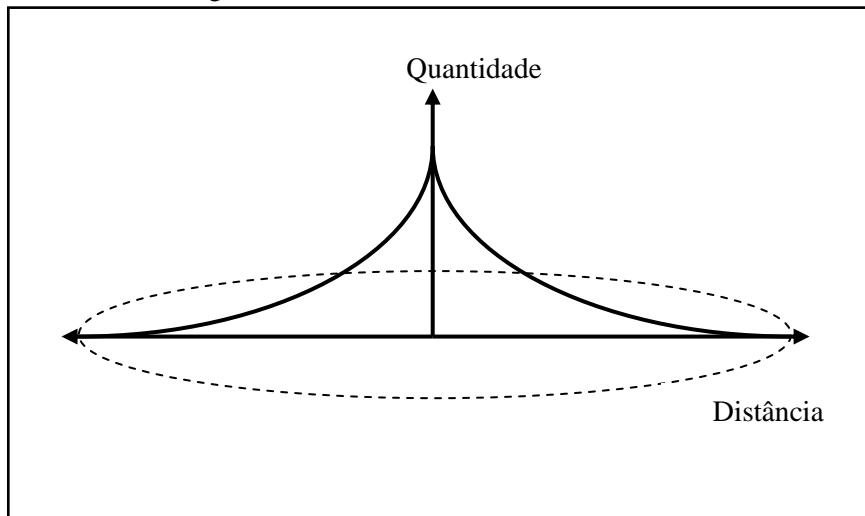
¹² Christaller, geógrafo alemão, elaborou a Teoria do Lugar Central em seu livro “*Die zentralen Örtel in Süddeutschland*” de 1933. A tradução da obra para a língua inglesa foi feita em 1966.

poderiam ser obtidos frequentemente. Os ofertantes se encontrariam perto de seus mercados e as áreas de mercado seriam pequenas. Com relação aos bens de ordem superior e aos bens com economias de escala na produção, as áreas de mercado seriam maiores. O autor considerou o padrão de ocupação do espaço com base no número mínimo de centros, no custo mínimo de transporte e nas áreas mínimas partilhadas por mais de um ofertante (MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011). Apesar de Christaller concluir que o número de bens ofertados aumentaria com o tamanho da cidade e que os mesmos bens ofertados em cidades menores seriam também ofertados nas maiores cidades, o autor não avançou no entendimento do surgimento da hierarquia urbana por meio de um modelo microeconômico abrangente (THISSE, 2011).

Com base na metodologia de Christaller, Auguste Lösch (1940)¹³ definiu uma hierarquia entre as áreas de mercado. Os fatores que determinariam estas áreas de mercado circulares eram o custo de transporte e as economias de escala. A preocupação do autor foi para além da escolha da localização da atividade econômica, e determinou critérios que visassem a melhor escolha da localização. O objetivo foi mostrar a existência de um padrão locacional com ênfase na organização espacial do sistema econômico. O modelo de Lösch especifica um monopolista operando um mercado com consumidores adequadamente distribuídos pelo espaço. A Figura 7 ilustra o modelo do cone de demanda de Lösch. A demanda por bens a cada distância depende do preço na origem acrescentado ao custo de transporte. Desse modo, o custo de transporte menor seria *ceteris paribus*, associado a uma maior área de mercado. A área de mercado maior, conforme a Figura 7, corresponderia aos produtos e bens com custos de transporte baixos e demanda relativamente inelástica (MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011). Do mesmo modo, o maior custo de transporte por unidade de produto corresponderia ao consumidor mais afastado do local de produção e, por conseguinte, menor seria sua demanda.

¹³ Lösch, com o modelo do cone de demanda, desenvolveu sua obra “*Die räumliche Ordnung der Wirtschaft*” em 1940. A tradução para a língua inglesa foi feita em 1954.

Figura 7 – Modelo do cone de demanda de Lösch



Fonte: MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011, p. 61

Na especificação acima, *ceteris paribus*, as áreas de mercado são amplas quando a densidade da demanda, a elasticidade-preço e os custos de transporte são menores. Com base nessa estrutura, Lösch desenvolveu uma hierarquia urbana semelhante à de Christaller. A ênfase do modelo está no aparecimento de lucro extra devido aos ganhos de escala, que depende das áreas de mercado (FERREIRA; LEMOS, 2000; MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011).¹⁴

Além das teorias até aqui mencionadas, também se destacam as contribuições de Walter Isard (1956).¹⁵ Em seu modelo de síntese geral, foi proposta a integração das características ligadas ao processo de minimização dos custos e as áreas de mercado, admitindo variações espaciais da receita. O foco de Isard sobre a atividade econômica recaiu nos custos de transportes. O autor foi importante para a chamada *Regional Science*, mais voltada à organização das atividades humanas em um espaço geográfico (FERREIRA; LEMOS, 2000; MONASTERIO; CAVALCANTE, 2011; THISSE, 2011).¹⁶

3.2 A NOVA GEOGRAFIA ECONÔMICA (NGE)

Os fundamentos da Ciência Regional serviram de inspiração para um tratamento microeconômico do espaço dentro da teoria econômica. O interesse recente pelo espaço, no

¹⁴ Para maiores detalhes das Teorias de Localização, *vide* McCann (2001) e McCann (2013).

¹⁵ Isard publicou *Location and Space Economy* em 1956. A obra foi importante para o desenvolvimento da Ciência Regional. O autor se baseou em trabalhos de Von Thünen, Lösch e Weber para desenvolver uma Teoria geral da Localização.

¹⁶ Para maiores detalhes sobre a Teoria da Localização, ver também Ferreira (1989a e 1989b).

centro da teoria econômica, surgiu a partir dos avanços da NGE. Nos anos 70, surgiram os modelos tratáveis de concorrência imperfeita na presença de retornos crescentes de escala. A partir da literatura da Organização Industrial, o modelo desenvolvido por Dixit-Stiglitz (1977) de concorrência monopolista permitiu um tratamento microeconômico mais adequado e refinado ao mercado. Este modelo foi à primeira estrutura operacional de equilíbrio geral, que capturou termos chave da literatura referente ao trato da concorrência imperfeita, variedade de produtos e economias de escala. Em equilíbrio geral, foi possível discorrer sobre as forças centrípetas e as forças centrífugas ao mesmo tempo. O espaço foi inserido na análise, de maneira que a NGE pode explicar a formação de aglomerações da atividade econômica no espaço geográfico (FUJITA *et al.*, 2002; FUJITA; THISSE, 2002; KRUGMAN; FUJITA, 2004).

A literatura padrão da NGE está baseada no modelo Centro-Periferia (CP) proposto por Krugman (1991). O modelo expõe como um país pode transformar-se endogenamente diferenciado em um centro industrializado e uma periferia agrícola. Este modelo exhibe como as aglomerações espaciais surgem da interação entre retornos crescentes à escala e custos de transporte. Se os custos de transporte forem baixos o suficiente, o setor industrial tende a concentrar-se em uma região que se torna o centro. A outra região, a periferia da economia, fornece somente bens agrícolas. Em oposição, quando os custos de transporte forem altos, existe um padrão regional simétrico. O surgimento do padrão CP teve como base os custos de transporte, as variedades de produtos e a produtividade do setor industrial. Isso permitiu a análise da organização espacial diferenciada da atividade econômica entre as regiões. Krugman combinou o modelo de concorrência monopolista de Dixit-Stiglitz (1977) com os custos de transporte do tipo *iceberg*¹⁷ de Samuelson (1952) (KRUGMAN, 1991; FUJITA *et al.*, 2002; FUJITA; THISSE, 2002). Desse modo, a NGE permitiu a existência de um tratamento teórico mais adequado das interações no espaço, a partir de fundamentos da Economia Urbana.

O modelo parte de uma economia formada por duas regiões, dois tipos de produção (agrícola e industrial) e dois tipos de mão de obra. A produção agrícola de um bem homogêneo é

¹⁷ Os custos de transporte do tipo *iceberg* exprimem a ideia de que uma proporção do bem transportado dissipa-se no processo de transporte. Isso significa que a quantidade do bem transportado no destino final é menor que a quantidade no ponto de origem. O termo é adotado, considerando que uma fração do bem “derrete-se” ao longo do caminho.

caracterizada por retornos constantes de escala e competição perfeita, sob o uso de uma mão de obra imóvel no espaço. A produção industrial fornece um bem diferenciado assumindo retornos crescentes de escala, competição imperfeita, sob o uso de mão de obra espacialmente móvel. São considerados os fretes dos produtos diferenciados, e o transporte da produção agrícola é isento de custos entre as regiões. Os rendimentos de ambas as regiões dependerá da distribuição dos trabalhadores. Quando uma das regiões tem uma força de trabalho maior, existe a tendência dos trabalhadores de migrarem para esta região. Desse modo, os trabalhadores deslocam-se para regiões onde os salários reais são maiores (KRUGMAN, 1991; THISSE, 2011).

No modelo CP o equilíbrio resulta da interação entre forças centrífugas e forças centrípetas. A imobilidade dos agricultores é uma força centrífuga (força de dispersão). O potencial da causação circular (ou cumulativa) ligado à proximidade de um grande mercado funciona como uma força centrípeta (força de atração e/ou aglomeração). Quando um número grande de empresas se localiza em uma região, maiores variedades são produzidas. Os trabalhadores (consumidores) desta região possuem acesso a uma maior variedade, de modo que a renda destes seja mais elevada. Isso induz mais trabalhadores a migrarem para esta região, o que cria um mercado maior comparado à outra região. Esta causação circular é intensificada pelas ligações para frente, que incentivam os trabalhadores a ficarem próximos aos produtores dos bens consumidos, e ligações para trás, que incentivam os produtores a se concentrarem próximos aos grandes mercados. Surge dessa forma o padrão espacial do tipo CP quando as forças centrípetas excedem as forças centrífugas. Isso ocorre na presença de baixos custos de transporte na indústria, variedades suficientemente produzidas, elevada demanda de produtos industrializados, economias de escala e mobilidade de fatores (KRUGMAN, 1991; FUJITA; THISSE, 2002; KRUGMAN; FUJITA, 2004). Os modelos da NGE¹⁸ seguem o padrão do modelo CP, e englobam uma tensão entre forças centrípetas e forças centrífugas, de modo a permitir uma convergência ou divergência entre as regiões.

A grande contribuição da NGE foi explicar o surgimento e o crescimento das cidades a partir das forças de aglomerações. A Economia Urbana tradicional, que é a base do referencial teórico do presente trabalho, pressupõe a existência das cidades, sem explicar a sua respectiva formação ou crescimento. No entanto, a Economia Urbana ainda preserva a tradição de

¹⁸ Outras referências de modelos da NGE podem ser encontradas em Baldwin e Venables (1995) e Krugman e Venables (1995), dentre outros.

fornecer modelos bem definidos de localização da atividade econômica ou dos indivíduos. Desse modo, segue uma apresentação das configurações tradicionais de cidades, que servirão de base para a construção de um modelo de simulação urbana.

3.3 ECONOMIA ESPACIAL URBANA

Esta seção descreve o campo de estudos da Economia Urbana tradicional vigente. A primeira parte apresenta a configuração urbana monocêntrica tradicional, a ser usada como base no presente trabalho. Os modelos monocêntricos tratam da organização espacial das cidades com um único centro de empregos. Em seguida, será apresentada a configuração urbana policêntrica das cidades. Nos modelos policêntricos, embora difíceis de serem tratados empiricamente, existe pluralidade de centros de empregos a permitir uma maior sofisticação dos modelos teóricos.

3.3.1 Configuração Urbana Monocêntrica Tradicional

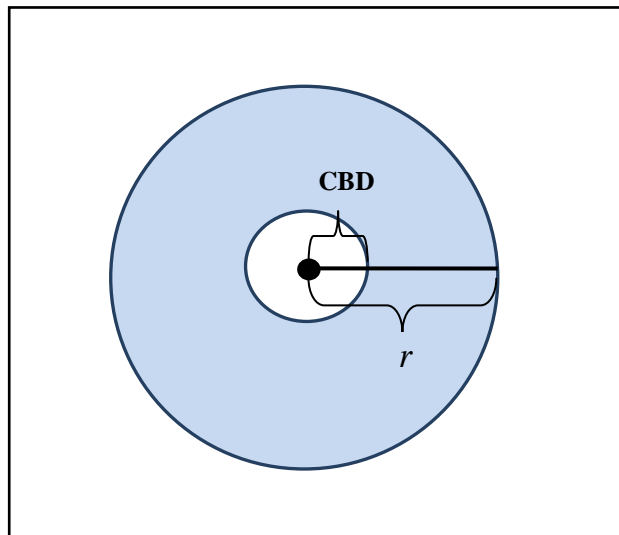
O modelo de Von Thünen de localização do uso do solo evidencia o uso de terras agrícolas e fornece a base para os trabalhos elaborados no campo da Economia Urbana. Adaptado por Alonso (1964) para o contexto das cidades, o modelo mantém o cenário de único centro de empregos (negócios). Os fazendeiros 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. Como em Von Thünen, também é definida uma função *bid rent*, ou seja, função oferta de aluguel. 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).¹⁹ Estes trabalhos inspiraram a chamada Nova Economia Urbana (NEU).²⁰ Conforme Thisse (2011), o campo da Economia Urbana tem como finalidade explicar a distribuição do solo entre as atividades e também por que as cidades têm um ou mais de um centro de negócios.

¹⁹ Outras contribuições entre os estudos da literatura internacional, que enfatizaram os modelos teóricos monocêntricos, são: Wheaton (1974), Brueckner (1987), Fujita (1989) e Zenou (2009). Os trabalhos recentes no Brasil também reforçam o campo de estudos da teoria da Economia Urbana. Entre eles, Biderman (2001), Dantas (2003) e Nadalin (2010).

²⁰ A NEU se refere ao termo em inglês *New Urban Economics*.

O modelo básico de Economia Urbana é conhecido como modelo AMM (ALONSO, 1964; MILLS, 1967; MUTH, 1969).²¹ 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. Essa é uma contribuição importante que ajuda a entender a questão da formação das estruturas urbanas. Nesse modelo, não existem amenidades. A configuração espacial é de um círculo com raio r do centro até o limite da área urbana (FIGURA 8). Isso permite que a cidade seja expressa em termos de vias radiais de transportes (FIGURA 9). As cidades possuem uma região central que proporciona empregos. Nesta literatura, este centro é chamado *Central Business District (CBD)*.²² O CBD é o local com maior densidade de empregos e onde encontram-se as atividades que tradicionalmente são *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.

Figura 8 – Modelo simples de cidade monocêntrica

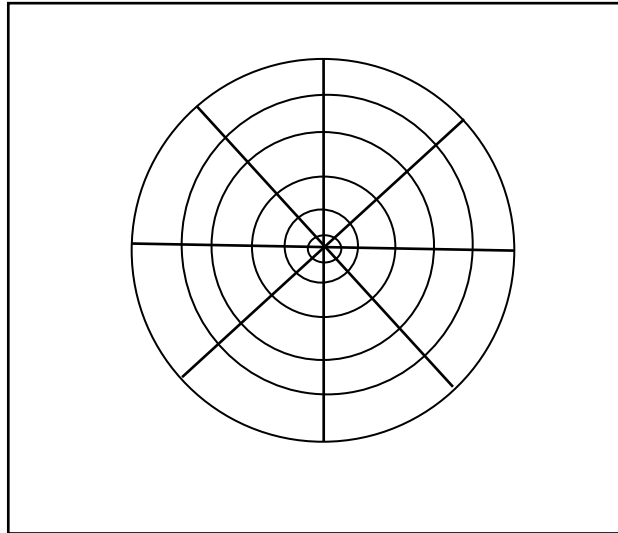


Fonte: Elaboração própria, 2014

²¹ Para maiores detalhes, *vide* Brueckner (1987).

²² O CBD também é denominado na literatura de centro de negócios.

Figura 9 – Vias radiais de transportes



Fonte: BIDERMAN, 2001, p. 5

A formalização mais moderna do modelo AMM segue a estruturação apresentada por Fujita (1989).²³ 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, medido em metros quadrados. 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. Cada residência na cidade deve obter a mesma utilidade, não importando onde os trabalhadores vivem. Com base nesses elementos, a função utilidade é dada por:

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

Com

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

²³ Uma abordagem consolidada sobre a estruturação do modelo AMM também pode ser encontrada em Brueckner (1987).

Em termos de cálculo diferencial apresentado em (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:

$$z + R(r)s + T(r) = Y \quad (03)$$

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:

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

Sujeito a

$$z + R(r)s = Y - T(r) \quad (05)$$

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*, ou função oferta de aluguel (ALONSO, 1964).

3.3.1.1 A função *bid rent*

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). Em outras palavras,

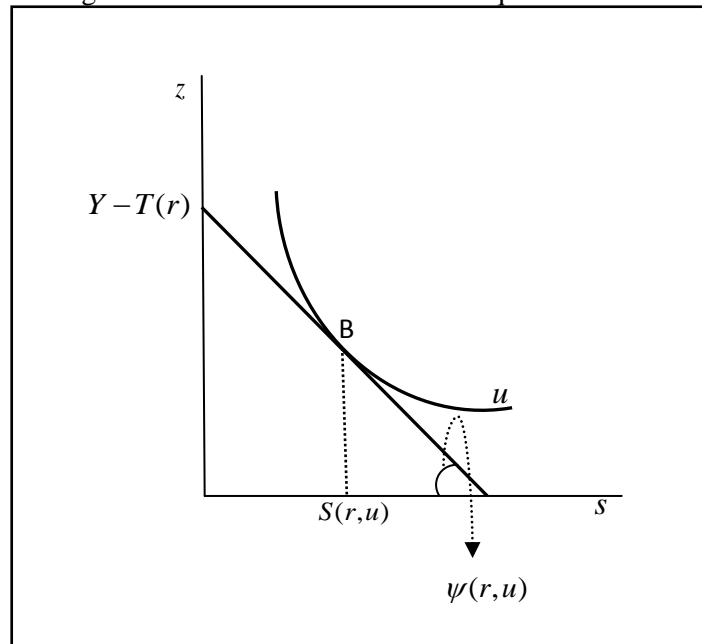
é um modo de expressar o equilíbrio urbano do modelo AMM (ALONSO, 1964; MILLS, 1967; MUTH, 1969). A exposição abaixo também segue a estruturação segundo Fujita (1989). Com base no problema de maximização, a função *bid rent* se define como:

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

Na equação (06), com base na cesta do consumidor (z, s) , $Y - T(r) - z$ 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 . Conseqüentemente, 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 $S(r, u)$. A Figura 10 mostra a cesta de consumo de equilíbrio em r , dada pelo ponto de tangência entre a restrição orçamentária e a curva de indiferença. A abordagem ilustra a função *bid rent* e a função tamanho do lote. A primeira é dada pela inclinação da linha de restrição orçamentária, enquanto a segunda é obtida pelo ponto de tangência B.

Figura 10 – A cesta de consumo de equilíbrio em r 

Fonte: FUJITA, 1989, p. 15

Para prosseguir a análise, 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:

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

Segundo Zenou (2009), as abordagens estruturadas anteriormente são diferentes, porém equivalentes. O Quadro 1 resume o procedimento adotado, mostrando as funções *bid rent* e tamanho do lote. Para uma compreensão mais profunda dessas abordagens, ver Fujita (1989) e Zenou (2009).

Quadro 1 – *Bid rent* e função tamanho do lote

	Alonso	Marshall	Hicks
<i>Bid rent</i>	$\psi(r, u)$	-----	-----
Tamanho do lote	$S(r, u)$	$\hat{s}(R, I)$	$\tilde{s}(R, u)$
Utilidade indireta	-----	$V(R, I)$	-----

Fonte: FUJITA, 1989, p. 30

Por conseguinte, 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 envelope²⁴ em $u = V[\psi(r, u), Y - T(r)]$, obtém-se:

²⁴ Ver Varian (1992).

$$\frac{\partial \psi(r,u)}{\partial r} = -\frac{T'(r)}{S(r,u)} < 0$$

$$\frac{\partial \psi(r,u)}{\partial u} = -\frac{1}{S(r,u)} \frac{\partial Z(s,u)}{\partial u} < 0 \quad (15)$$

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*, ou seja, do aluguel máximo por unidade de terra, 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. Isso gerará implicações para a estrutura espacial das cidades. 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 (tempo e dinheiro) 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. Por fim, a função *bid rent* é contínua e decrescente em r e u , até transformar-se zero.

No que se refere ao tamanho do lote, sendo T estritamente crescente em r e $Z(s,u)$ estritamente crescente em u , diferenciando $S(r,u)$ em relação à r em (11), tem-se que:

$$\frac{\partial S(r,u)}{\partial r} = \frac{\partial \tilde{s}}{\partial R} \frac{\partial \psi(r,u)}{\partial r} = -\frac{\partial \tilde{s}}{\partial R} \frac{T'(r)}{S(r,u)} > 0 \quad (16)$$

Na equação (16), a demanda Hicksiana, que apresenta o tamanho do lote, é decrescente no aluguel da terra. Isto é $\partial \tilde{s} / \partial R < 0$. Nessa abordagem, o tamanho do lote será dado em metros quadrados. Um aluguel da terra menor implica um aumento no consumo de metros quadrados. Isso ocorre porque os consumidores que moram longe do CBD devem ser compensados de algum modo, já que incorrem em custos maiores de deslocamento para o trabalho. Com relação à demanda Marshalliana, diferenciando $S(r,u)$ em relação à u em (14), têm-se:

$$\frac{\partial S(r,u)}{\partial u} = \frac{\partial \hat{s}}{\partial R} \frac{\partial \psi(r,u)}{\partial u} > 0 \quad (17)$$

Na equação (17), ao considerar o pressuposto de normalidade²⁵, a demanda Marshalliana pela terra é decrescente no aluguel da terra. Do mesmo modo, para um consumidor que se situa longe do CBD, o aluguel é mais baixo, o custo de deslocamento é maior, porém este desfruta de um espaço maior para a sua residência. Portanto, a análise Hicksiana é diferente da abordagem exposta pela demanda Marshalliana, pois expressa as preferências em termos de utilidade, e não de renda, como a segunda. Naturalmente, isso reforça a apresentação no Quadro 1. No entanto, ambas as abordagens são equivalentes, uma vez que são decrescentes no aluguel da terra. Em resumo, a função que descreve o tamanho do lote é contínua e crescente em r e u . A seguir será definida a função de produção de habitação fundamentada em Brueckner (1987).

3.3.1.2 A indústria de habitação

Esta seção analisa teoricamente, no âmbito da Economia Urbana, a indústria de produção de habitação, considerando a abordagem de Brueckner (1987). Assume-se que a produção de habitação é dada por terra (l) e capital (k) como insumos, sendo sua função côncava de retornos constantes de escala 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

$$\pi = pH(k,l) - ik - Rl \quad (18)$$

Na equação (18), 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

²⁵ O efeito renda a respeito da demanda Marshalliana pela terra é positivo (ver FUJITA, 1989, pressuposto 2.3, p. 20).

verticalidade das habitações, e resolvendo o problema de maximização do lucro por metro de terra, chega-se às seguintes condições:

$$\frac{\partial R}{\partial r} < 0; \quad \frac{\partial D}{\partial r} < 0 \quad (19)$$

A especificação desse modelo permite concluir que 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. Nesse sentido, na próxima seção chegar-se-á a conclusão que a densidade populacional diminui conforme aumenta a distância r do centro de negócios. Isso é explicado pelo fato de que à distâncias maiores os edifícios são curtos e os espaços para habitação são maiores, implicando em um número menor de moradias e, desse modo, com poucos indivíduos.

O modelo AMM implica, portanto, em menores aluguéis de terra, como também em menor densidade populacional e menor verticalização das residências, à medida que a distância r do CBD aumenta. Em outras palavras, quanto mais longe do centro de empregos, menor será o aluguel por unidade de terra, menor será o número de residentes por metro quadrado e, maior será o número de casas em contraste com o número de apartamentos. Ademais, a função de produção da habitação é restritiva ao não incluir mão de obra, em razão dos modelos monocêntricos concentrarem no centro da cidade (CBD) os postos de trabalho. Para maiores detalhes, ver Brueckner (1987).

3.3.1.3 O equilíbrio urbano do uso da terra

O equilíbrio locacional da família se dará mediante as condições para uma cidade monocêntrica com N trabalhadores (consumidores) homogêneos, cada um com uma renda Y . Também é assumido que os proprietários da terra são ausentes, ou seja, externos a cidade. A estruturação a seguir é apresentada em Fujita (1989). Em equilíbrio, as famílias atingirão o mesmo nível de utilidade, independente do local de residência. Dada à renda da terra por

$R(r)$, a utilidade de equilíbrio é denotada u^* . Utilizando a utilidade indireta, $u = V[\psi(r, u), Y - T(r)]$, e $R = \psi(r, u)$, obtém-se o nível de utilidade comum (u^*) a todos os trabalhadores (consumidores), tal como:

$$u^* = \max_r V[R(r), Y - T(r)] \quad (20)$$

Em seguida, para obtenção do equilíbrio residencial, toma-se a diferenciação de $u = V[\psi(r, u), Y - T(r)]$ em relação à r , e utiliza-se a identidade de Roy²⁶ [$S(r, u) = (\partial V / \partial R) / (\partial V / \partial I)$], de modo que:

$$S(r^*, u^*) \frac{dR(r^*)}{dr} + \frac{dT(r^*)}{dr} = 0$$

$$R'(r^*) = -\frac{T'(r^*)}{S(r^*, u^*)} \quad (21)$$

Na equação (21), u^* é a utilidade de equilíbrio; r^* é a localização ótima. No ponto de utilidade máxima, as mudanças no custo do solo são balanceadas pelas correspondentes mudanças nos custos pendulares de casa para o trabalho.²⁷ Um aumento no custo pendular faz com que o aluguel do solo caia na cidade monocêntrica. O resultado encontrado na equação (15), $\left[\frac{\partial \psi(r, u)}{\partial r} = -\frac{T'(r)}{S(r, u)} < 0 \right]$, pode ser comparado com o resultado da equação (21), $\left[R'(r^*) = -\frac{T'(r^*)}{S(r^*, u^*)} \right]$. Isso implica que (21) é o equilíbrio residencial locacional. De um modo geral, à medida que aumenta a distância ao CBD, incorre-se em custos elevados de transportes. Isso leva a diminuição da disposição a pagar, e simultaneamente ocorre o consumo de lotes maiores para a residência. Reescrevendo a equação (21), tem-se que:

$$T'(r^*) = -R'(r^*)S(r^*, u^*) \quad (22)$$

²⁶ Ver Varian (1992).

²⁷ Para maiores detalhes, ver Fujita (1989) e como complemento Zenou (2009).

O resultado (22) é conhecido como “Condição de Muth”. Nesta relação, o custo marginal de transporte é igual à economia marginal das despesas de aluguel da terra. Uma família que mora distante do centro da cidade tem sua poupança, por dispor de um aluguel mais baixo, compensada pelo gasto maior com custos de transporte. Adicionalmente, o equilíbrio residencial exige uma importante condição, a saber:

$$R(r) \geq \psi(Y - T(r), u^*) \text{ para todo } r \quad (23)$$

Esta condição, sob a renda da terra $R(r)$, assegura que uma família não consegue uma utilidade superior a u^* . Para continuidade desta análise, é importante acrescentar dois pontos relevantes de equilíbrio do modelo AMM. Além disso, cabe destacar a diferença entre a cidade fechada e a cidade aberta. Um desses pontos²⁸ é o fato de que a terra pode ser utilizada tanto para a habitação quanto para a agricultura. Para tanto, a renda da terra urbana deve ser maior ou igual aquela das atividades agrícolas. Se as terras marginais são ocupadas pela agricultura, ao aluguel de $R_A \geq 0$, então:

$$\psi(r_f, u^*) = R_A \quad (24)$$

Isto é equivalente a

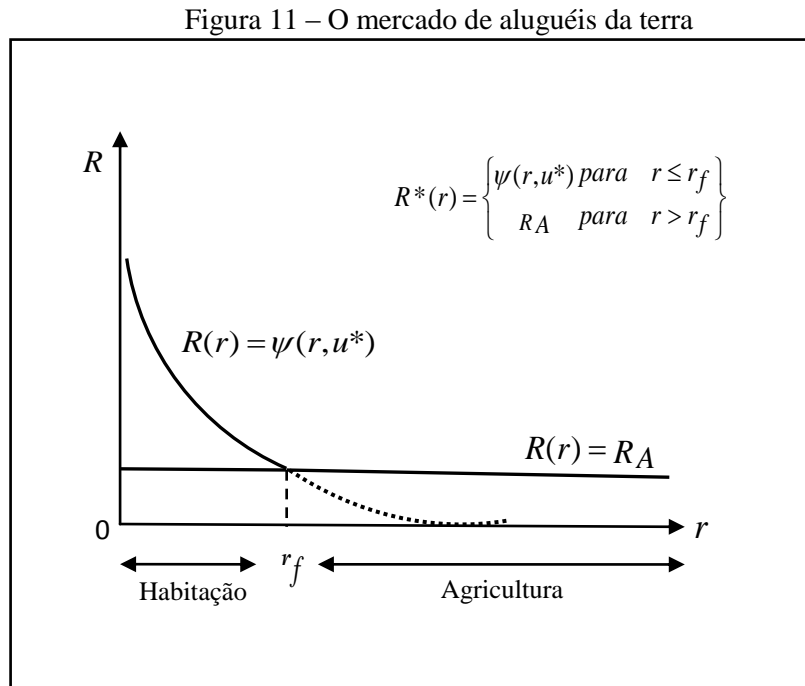
$$R(r_f) = R_A \quad (25)$$

Essa condição implica uma curva do mercado de aluguéis igual a *bid rent* de equilíbrio até o ponto r_f , e posteriormente, a linha constante do aluguel agrícola, como pode ser assegurado na Figura 11. Formalmente, a cidade possui uma distância r_f até a fronteira agrícola. Consequentemente, o mercado de aluguéis será dado por

$$R(r) = \begin{cases} \psi(r, u^*) & \text{para } r \leq r_f \\ R_A & \text{para } r > r_f \end{cases} \quad (26)$$

²⁸ Ver Brueckner (1987), seção 3, análise de estática comparativa, p. 828-830; ver Nadalin (2011), a cidade aberta e a fechada, p. 227-229; ver Zenou (2009).

No limite da cidade, deve-se cobrar um aluguel maior pela terra no uso urbano que o aluguel cobrado no uso rural. Isso implica em uma curva de aluguel da terra de equilíbrio, correspondendo a uma *bid rent* até r_f . Após esse ponto, tem-se o aluguel agrícola constante. A esquerda de r_f a terra é utilizada para habitação, e a direita para a agricultura (NADALIN, 2010).



Fonte: Adaptado de NADALIN, 2010, p. 228

Com base na configuração espacial dos modelos monocêntricos, o segundo ponto relevante aponta que, toda a população é instalada no círculo de raio r , e não existindo terra vazia dentro do espaço urbano (FUJITA, 1989), segue que:

$$n(r) = \frac{2\pi r}{S(r, u^*)} \quad (27)$$

A partir da equação (27), onde $n(r)$ é a densidade de trabalhadores (consumidores) em r no equilíbrio, a população total (N) é encontrada por:

$$N = \int_0^{r_f} \frac{2\pi r}{S(r, u^*)} dr \quad (28)$$

Na equação (28), $S(r, u^*)$ é a função do tamanho do lote, descrita anteriormente, em relação à distância e a utilidade de equilíbrio; $2\pi r$ determina a quantidade de terra disponível de acordo com a configuração de um círculo de raio r . Com relação à densidade populacional de equilíbrio, esta é decrescente em relação ao CBD para o limite da área urbana. Ao denotar a densidade populacional em r por $\delta(r) \equiv n^*(r)/2\pi r$, têm-se que:

$$\delta(r) = \frac{1}{S(r, u^*)} \quad (29)$$

Como resultado (29), nas localizações próximas ao CBD existe oferta de espaços menores para a residência. Isso faz com que a densidade populacional seja maior. Esse resultado ocorre pela existência do *trade-off* entre consumidor e produtor. Com base na especificação do modelo de cidade monocêntrica descrito por Fujita (1989), algumas conclusões podem ser evidenciadas. Os trabalhadores (consumidores) trocam mais (menos) espaço para residência por maior (menor) acessibilidade ao centro de negócios. Os trabalhadores que residem próximo ao CBD têm maior acessibilidade, não incorrendo em custos de transporte e de tempo. Em compensação, estes vivem em residências com espaço reduzido. Por outro lado, os trabalhadores que residem nos extremos da cidade têm altos custos (dinheiro e tempo) pendulares diários para o trabalho, mas desfrutam de um espaço maior para a residência. Em termos monetários, os trabalhadores pagam um maior (menor) aluguel pela terra em substituição a um baixo (alto) custo de transporte. Essa proposição é fundamental no modelo, pois do contrário todos os trabalhadores viveriam próximos ao centro. Ademais, o bem composto também varia com a distância. Por fim, os trabalhadores que residem distantes do CBD têm um maior consumo de terra e menor consumo do bem composto.

Segue da análise acima que, o equilíbrio residencial é descrito por $R(r)$, $n(r)$, $S(r)$, u^* e r_f (FUJITA, 1989). A partir das equações (28) e (29), duas possibilidades são permitidas para análise do modelo: cidade fechada e cidade aberta, descritas a seguir.

3.3.1.4 A cidade fechada e a aberta

Nesta seção, serão examinados os modelos de cidade fechada e aberta.²⁹ Especificamente, busca-se compreender como o uso da terra de equilíbrio é afetado por mudanças no tamanho da população, na renda agrícola, na renda familiar e nos custos de deslocamento, sobre a distribuição espacial da cidade. Segundo Brueckner (1987), para essa análise, as relações mais relevantes ocorrem entre o preço do aluguel por metro quadrado e a distância r do CBD, e entre o consumo do bem habitação e a distância r .

Inicialmente, 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 da população gera uma cidade maior e, portanto, mais longe é o limite da área urbana. Os trabalhadores ficam mais distantes do centro de empregos. Isso implica em custos de deslocamentos maiores, levando a um nível de utilidade inferior. Outros efeitos do aumento de N seriam o aumento no preço por metro quadrado da habitação que torna as habitações menores, e os aluguéis de terras e as densidades estruturais (prédios mais altos) seriam maiores em todos os locais. Por sua vez, a densidade populacional aumenta (BRUECKNER, 1987).

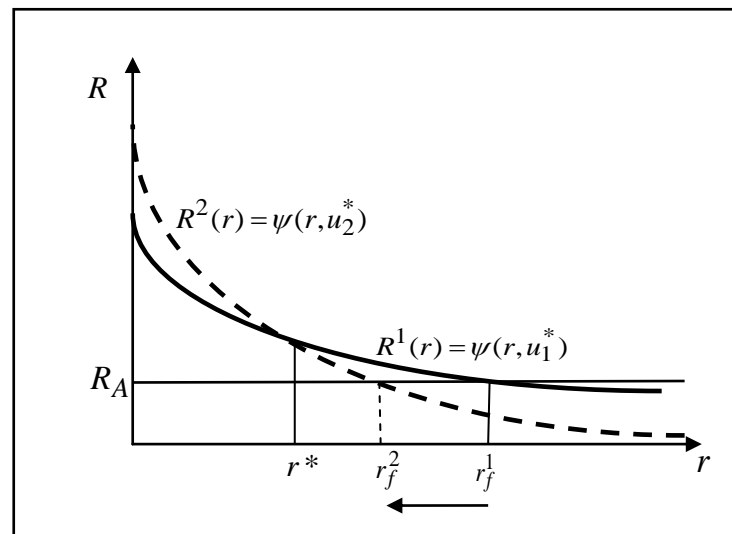
Um aumento na renda agrícola (R_A) conduz a uma redução do tamanho espacial da cidade e, portanto, ocorre uma diminuição do limite da área urbana. O nível de utilidade também se torna inferior. Cabe destacar ainda os acréscimos no preço por metro quadrado de habitação, na renda da terra e na densidade estrutural. 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. Outros efeitos seriam as reduções no preço por metro quadrado de habitação, na renda da terra e na densidade estrutural nas localizações centrais. No entanto, em locais distantes do centro estas variáveis sofreriam um aumento (BRUECKNER, 1987).

Os impactos causados pelo aumento dos custos de deslocamento ($T(r)$) seriam contrários aos gerados pelo acréscimo da renda familiar. Os deslocamentos diários ficariam mais caros e, em resposta a esse choque, a cidade encolheria espacialmente. A utilidade dos consumidores

²⁹ Para uma análise detalhada da cidade fechada, ver Brueckner (1987), seção 3.1, p. 830-836; para cidade aberta, ver seção 3.2, p. 836-838. Ver também Fujita (1989) e Zenou (2009).

também declinaria. Nas localizações centrais (perto do CBD) ocorreria aumento do preço por metro quadrado de habitação, da renda da terra e da densidade estrutural, o que reduzia estas (preço de habitação, renda da terra e densidade estrutural) em lugares afastados das regiões centrais. Em locais próximos ao CBD, o tamanho do lote seria menor e, conseqüentemente, a densidade populacional se tornaria superior (BRUECKNER, 1987). Conforme Nadalin (2010), a Figura 12 ilustra um aumento nos custos de transporte sobre a renda da terra.

Figura 12 – Cidade fechada: Efeito de um aumento nos custos de deslocamento sobre a renda da terra



Fonte: Adaptado de NADALIN, 2010, p. 229

No caso do 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 neste caso. 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 por metro quadrado 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. Nesse caso, os indivíduos seriam atraídos para a cidade. Em consequência, 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. As mudanças geradas pelo aumento do custo marginal dos transportes seriam inversas comparadas àquelas induzidas pelo acréscimo da renda. Os

aluguéis de terra e a densidade estrutural cairiam em todas as localizações. A fronteira da cidade diminuiria e, conseqüentemente, isso conduziria a um menor tamanho da população. Para maiores detalhes, ver Brueckner (1987).

Em resumo, no modelo AMM mudanças nos custos marginais de transporte, devido a um aumento do preço da gasolina, por exemplo, causaria impactos na fronteira das cidades, podendo dessa forma se tornar mais compacta. Outro impacto seria em relação à densidade. O aumento no preço da gasolina também faria com que a densidade estrutural (altura dos prédios) aumentasse. Isso indicaria que a tipologia habitacional mais procurada seria os apartamentos. Estes pontos serão mais discutidos no Capítulo 5, a partir dos resultados do modelo de simulação urbana. Logo, o ponto central desta dissertação é que transporte e habitação estão ligados, de maneira que um choque exógeno em um afeta o outro. A conexão dessa relação com o consumo de energia para deslocamento e uso interno nas residências ainda é pouco estudado na literatura.

Os modelos monocêntricos seguem o princípio de que, em uma economia com único centro de empregos, à medida em que o indivíduo se afasta do centro ocorre um gradiente decrescente de preços e de densidade. Ou seja, o valor do aluguel e a densidade estrutural são funções negativas da distância ao CBD. Uma das características do modelo de Economia Urbana tradicional é a concepção integrada da estrutura urbana, relacionando os efeitos de políticas de uso da terra, transporte e habitação. Por fim, estes modelos apresentam a virtude de permitir a simulação de efeitos de políticas com relação a diferentes grupos populacionais e explicar vários dos padrões observados em cidades do mundo real (ARNOTT, 2012).

3.3.1.5 Limitação da Economia Urbana Monocêntrica

Assim como no modelo de Von Thünen, entre as principais críticas dos modelos de cidades monocêntricas estão à explicação da existência de um centro com empregos disponíveis. Além da questão da hierarquia urbana de cidades grandes, médias e pequenas. O problema, apontado na literatura sobre esses modelos, é a falta de argumentação de onde, como e porque existem as cidades (THISSE, 2011). Fujita e Thisse (2002) consideram que os modelos clássicos da Economia Urbana são limitados devido à existência *ad hoc* do centro nas cidades. Para estes autores, é importante considerar a literatura de economias de aglomeração. Outra

limitação dos modelos de cidades monocêntricas ocorre em relação à configuração, pois podem surgir outros centros de empregos na cidade. Nas cidades maiores surgem os formatos multicêntricos. A expansão territorial e os custos de transporte também podem induzir o surgimento de subcentros. Diante disso, surgiram os modelos de cidades policêntricas.

A evolução da estrutura urbana das cidades norteia a transição do modelo monocêntrico tradicional para a abordagem policêntrica. A configuração espacial monocêntrica da adoção de um círculo é produto da existência de somente um centro que proporciona empregos, tradicionalmente *locus* das atividades comerciais, de serviços e do funcionalismo público. No entanto, com a expansão territorial e os custos de transporte, surgiram os chamados subcentros, isto é, os modelos que introduziram a presença de mais de um CBD às cidades. O surgimento do policentrismo pode ter ocorrido pela expansão da cidade monocêntrica a partir da formação de um centro secundário. As economias de aglomeração justificam essa nova configuração, cujos empregos não estão mais concentrados apenas nos centros das cidades.

A existência de economias externas entre os trabalhadores são guiadas por uma força de atração e/ou aglomeração, que concentra o emprego nas localizações centrais. Como explicitado anteriormente, os trabalhadores (consumidores) necessitam de um espaço para a habitação e se deslocam diariamente da residência para o local de trabalho, incorrendo em custos (de tempo e transporte a depender da distância ao centro de empregos). Haverá um ponto de equilíbrio entre estes custos e a renda da terra. Este cenário criará uma força de dispersão. Os negócios localizados distantes do CBD, cujos aluguéis da terra são menores, atrairão trabalhadores de baixos salários. Isso levará ao surgimento de um novo centro, implicando na configuração urbana policêntrica (FUJITA *et al.*, 2002). A próxima seção explora estes modelos que consideram a existência de mais de um centro. No contexto das grandes cidades, estes modelos mais recentes se aproximam mais da realidade, além de incorporarem elementos teóricos de economias de aglomeração proveniente da nova geografia econômica.

3.3.2 Configuração Urbana Policêntrica

A base dos modelos ditos urbanos não-monocêntricos é apresentado por Fujita e Ogawa (1982). Os autores propõem um modelo em que a estrutura espacial da cidade passa a ser

determinada endogenamente como resultado de interações entre firmas e famílias. Nesse modelo, as firmas e famílias são livres quanto à escolha locacional dentro da cidade. No entanto, esta escolha por residência é dependente da localização das firmas, e estas, por sua vez, fazem suas opções com base na localização de outras firmas. Sob as firmas, os ganhos de aglomeração são opostos aos crescentes custos de produção. Sob as famílias, o custo de transporte e o tempo despendido são compensados pelo decréscimo dos aluguéis da terra. Com base nesse conjunto de elementos e na introdução de novas variáveis, como as economias de aglomeração, foi possível obter equilíbrios com mais de um CBD. Desse modo, esta nova linha de abordagem contribuiu para o surgimento de cidades policêntricas, duocêntricas e de uso misto (FUJITA; OGAWA, 1982; KRUGMAN; FUJITA, 2004; NADALIN, 2011).

O modelo de Fujita e Ogawa (1982) assume N residentes idênticos e um salário W pago ao trabalhador. Este trabalhador se desloca da sua residência até o local de trabalho. Este salário depende da localização das firmas. A restrição orçamentária de um trabalhador residente em x empregado em xw é dada por:

$$W(xw) = R(x)s + p_z z + td(x, xw) \quad (30)$$

Na equação (30), $W(xw)$ é o salário pago pelas firmas em xw ; $R(x)$ é o aluguel para x unidades de terra; z e p_z são o bem composto e seu respectivo preço; t é o custo de transporte; $d(x, xw)$ é a distância entre a residência e o local de trabalho. Desse modo, conforme Fujita e Ogawa (1982), as famílias escolhem a localização residencial x e o local de trabalho xw , maximizando o nível de consumo do bem composto (z) dado o seu preço p_z :

$$\max_{x, xw} z = \frac{1}{p_z} [W(xw) - R(x)s_h - td(x, xw)] \quad (31)$$

No problema de maximização na equação (31), s_h é o tamanho fixo do lote. Em relação às firmas, estas escolhem sua localização tomando como base a escolha locacional de outras firmas. Isso evidencia o importante conceito das economias de aglomeração, que segundo Fujita e Ogawa (1982), é um dos principais motivos para a existência e o crescimento das

idades. As economias de aglomeração para cada firma são apresentadas através da função de potencial locacional:

$$F(x) = \int b(y)e^{-\alpha d(x,y)} dy \quad (32)$$

Na equação (32), $F(x)$ é a função de potencial locacional em x ; $b(y)$ é a densidade de firmas em y ; α é o parâmetro de potencial; $d(x,y)$ é a distância de localização entre x e y . Usando (32), Fujita e Ogawa (1982) assumem que o comportamento de cada firma é descrito por uma equação de produção multiplicativa, da seguinte forma:

$$\max_x \pi = p_o f(S_b, L_b) \beta F(x) - R(x)S_b - W(x)L_b \quad (33)$$

Ou uma equação de produção aditiva:

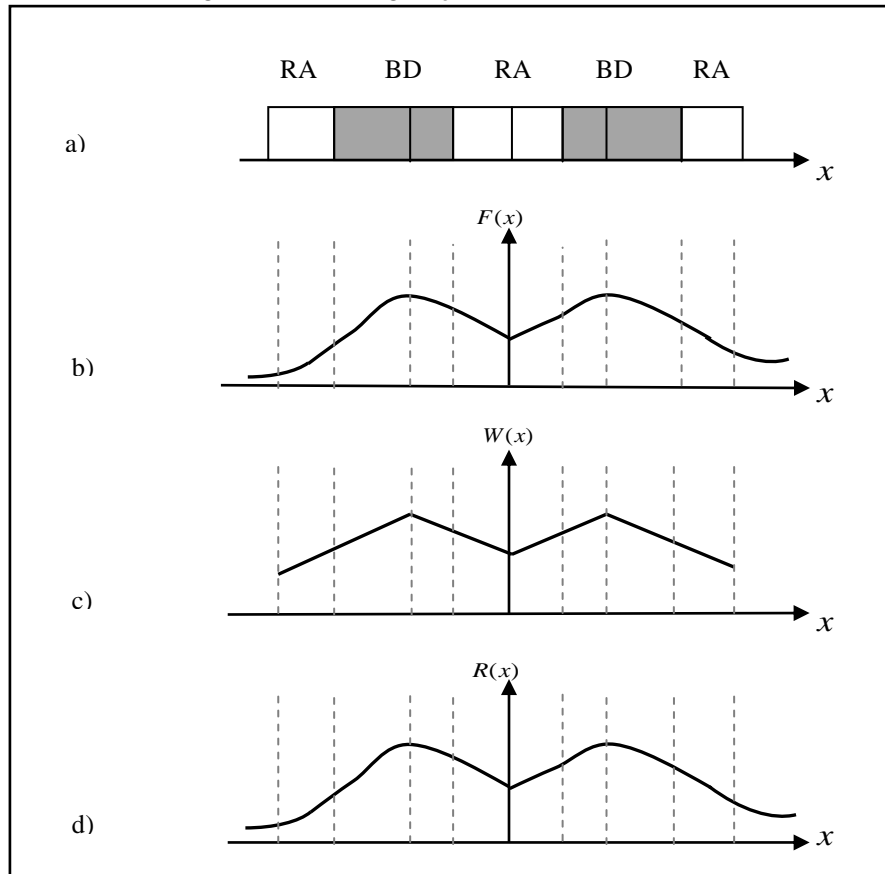
$$\max_x \pi = p_o f(S_b, L_b) + p_p F(x) - R(x)S_b - W(x)L_b \quad (34)$$

No problema de maximização de lucros, $f(S_b, L_b)$ é a função de produção com os insumos terra e trabalho fixos; β é a taxa de conversão de produto do potencial locacional; p_p é a taxa de conversão monetária do potencial locacional. Em (33), as economias de aglomeração elevam a produtividade em locais de alto potencial locacional (FUJITA e OGAWA, 1982). Como resultado, chega-se as funções *bid rent* das famílias e das firmas, como no caso monocêntrico. Para maiores detalhes, ver Fujita e Ogawa, seção 2.4, p. 167-169. Devido à complicada forma funcional da função de potencial locacional é difícil encontrar soluções analíticas de equilíbrio. Possíveis soluções são colocadas para o caso das cidades monocêntricas, de uso misto, duocêntricas e tricêntricas. Em resumo, a grande contribuição de Fujita e Ogawa (1982), foi à inserção do efeito das economias de aglomeração sobre a produção, possibilitando o surgimento de mais de um CBD.

A Figura 13 mostra uma cidade duocêntrica. Em (a), têm-se a configuração urbana com o centro de empregos representado por BD e a área residencial, ou seja, a localização das famílias representada por RA. Em (b), são mostrados os ganhos de aglomeração das firmas

através da função de potencial locacional $F(x)$. Pode-se observar que os ganhos de aglomeração são elevados nas faixas dos centros de empregos. Do mesmo modo, os salários em (c) e a renda da terra em (d) são maiores próximos ao centro de empregos (CBD).

Figura 13 – Configuração Urbana Duocêntrica



Fonte: FUJITA; OGAWA, 1982, p. 180

Por fim, nos modelos com mais de um centro de empregos considera-se além dos custos de transportes, variável importante do modelo AMM, as economias de aglomeração. No presente trabalho, será adotado o modelo de cidade monocêntrica devido a sua tratabilidade e também devido à possibilidade de se encontrar cidades no Brasil que também apresentam essa configuração, para fins de calibragem de um modelo de simulação. Cabe destacar a relação entre a literatura descrita anteriormente e a eficiência energética. O referencial teórico de Economia Urbana forneceu uma base para explicar o uso de energia nas cidades. Nos modelos monocêntricos, os trabalhadores que residem longe do centro de empregos incorrem em maiores custos de deslocamento e, portanto, em maior uso de energia. Isso está relacionado ao padrão urbano de cidades espalhadas e, portanto, dentre outros, a padrões ineficientes de uso do automóvel, poluição atmosférica e congestionamentos nas grandes cidades. Logo, as

idades são menos eficientes energeticamente. A próxima seção apresenta uma visão sucinta dos modelos numéricos de simulação urbana, a ser utilizado no presente trabalho.

3.4 MODELAGEM NUMÉRICA DE SIMULAÇÃO

Um modelo de simulação é utilizado com o objetivo de testar uma situação real. Os exercícios de simulação examinam como choques exógenos em uma determinada variável atingem outra variável endógena dentro do sistema. Por meio de cenários contrafactuais e choques, obtém-se os resultados a fim de identificar relações e a magnitude entre as variáveis estudadas. Baseado em dados empíricos, um modelo numérico de simulação pode ser usado na avaliação de vários eventos de mercado e políticas econômicas e de desenvolvimento urbano.

A formalização de modelos numéricos de simulação urbana foi introduzida por Muth (1975). No modelo urbano padrão discutido anteriormente, normalmente, os custos de transporte são constantes. O congestionamento é incorporado ao modelo, tornando os custos de transporte função do número de passageiros. Esta endogeneidade torna difícil resolver o modelo analiticamente. Por isso, usa-se o processo de simulação. A introdução do congestionamento no transporte pendular, por exemplo, provocou uma redução da velocidade de viagem dos trabalhadores e um acréscimo da densidade populacional nas localizações próximas ao CBD. Desse modo, os modelos numéricos de simulação urbana são relevantes para entender as questões ligadas ao uso da terra, aos deslocamentos diários e a habitação em cidades com congestionamento de tráfego. Estes têm sido, desde então, utilizados para projetar os efeitos do uso do solo e das políticas de transportes em padrões espaciais de habitação dentro das cidades (MUTH, 1975; LARSON *et al.*, 2012).

O ponto de partida para a aplicação computacional de simulação urbana foi o trabalho de Muth (1975), que 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 e outros (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 (prédios mais altos) aumenta próximo ao centro de empregos. O modelo, desenvolvido por Larson e outros (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. Além disso, as pesquisas têm sido também limitadas pela ausência de um modelo padrão que ligue o planejamento urbano e políticas de transporte para o uso de energia.

A contribuição relevante de um modelo como o proposto no presente trabalho 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 do 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).

Pode-se concluir, ao fim deste capítulo, que a grande relevância deste trabalho pode ser a de 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. Os desafios metodológicos para a calibragem do modelo numérico de simulação urbana, os respectivos detalhes teóricos, bem como a base de dados e os parâmetros-chave, serão apresentados no próximo capítulo.

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

Este capítulo tem por objetivo descrever a estrutura do modelo de simulação urbana adaptado para a análise de políticas de uso do solo, política de transporte e política energética em áreas urbanas. Os fundamentos teóricos do modelo derivam de Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969), segundo o desenvolvimento recente dessa estrutura de modelo elaborada por Larson e outros (2012) e Larson e Yezer (2014). Após as características do modelo, será apresentado o processo de calibragem. Em seguida, são expostas as equações do consumo energético doméstico e do consumo energético dos veículos. Por fim, serão descritos o procedimento de escolha das cinco cidades monocêntricas brasileiras e a base de dados e os parâmetros-chave, a serem utilizados. O modelo proposto fornece uma conexão entre as áreas de Economia Urbana e a de Economia de Energia, através da integração entre a modelagem de simulação urbana com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos intra-urbanos.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO URBANA

A estrutura teórica do modelo a ser utilizado nas simulações deriva do modelo *Urban Energy Footprint Model* (UEFM) desenvolvido por Larson e outros (2012), bem como os respectivos avanços de Larson e Yezer (2014). Este modelo está amparado nos supostos da teoria de cidades monocêntricas apresentada no capítulo 3. Desse modo, esta seção é amplamente baseada nos respectivos autores. Destaca-se que os autores Larson e outros (2012) modelam supostos de cidade fechada, enquanto Larson e Yezer (2014) modelam supostos de cidade aberta. As equações do UEFM para ambos os casos são as mesmas. A diferença recai no suposto de migração, conforme o capítulo 3, na seção 3.3.1.4. Nesta dissertação, 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. O modelo de cidade fechada tem seu uso, mas é limitado na sua interpretação, principalmente por não considerar os fluxos migratórios. 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.

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”:

$$\frac{dr}{dk} = -\frac{dT}{dk} \frac{1}{h} \quad (35)$$

Na equação (35), 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 (35) determina um padrão espacial dos preços de habitação. O preço reduz com a distância k ³⁰ 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. Ademais, outro ponto relevante do modelo é que os produtores de habitação têm lucro normal em todos os locais onde se produzem habitação e lucro negativo nos demais locais (LARSON *et al.*, 2012; LARSON; YEZER, 2014).

Segundo Larson e outros (2012) e Larson e Yezer (2014), com relação ao emprego, este é dividido entre o CBD e o local fora do centro de negócios, respectivamente, conforme a equação 36. 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

$$E = E_{CBD} + E_{OCBD} = E_{CBD} + \int_{K_{CBD}}^{K_{E^*}} E_{dens}(0)e^{-gk} dk \quad (36)$$

³⁰ Atende-se para a notação. Neste caso, a distância do limite da cidade ao centro é denotada por k , conforme Larson e Yezer (2014). No Capítulo 3, usa-se a notação de Fujita (1989).

Na equação (36), 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. A densidade será calibrada de modo que o número de trabalhadores seja maior que o emprego em cada anel. Essa suposição garante que cada trabalhador comute/desloque todo o caminho para o CBD.

O modelo a ser calibrado nessa dissertação replica o padrão espacial de habitação para cinco cidades brasileiras,³¹ bem como os supostos teóricos da Economia Urbana monocêntrica apresentados no capítulo 3, na seção 3.3.1. As características do composto das cidades, em média e em valores individuais, podem ser vistas na Tabela D.1 do Apêndice D. Cabe destacar que o processo de calibragem é baseado em uma média das cinco cidades. Para exemplificar, a área da cidade (km^2) usada na calibragem do modelo é a média entre as cinco cidades brasileiras escolhidas para o estudo. A função de utilidade, $U(y, h)$ ³², 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):

$$U = [\beta_1 y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta} \quad (37)$$

Na função em (37), 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.

³¹ As cinco cidades são Belém, Feira de Santana, Cuiabá, Juiz de Fora e Londrina, exploradas na seção 4.5.

³² No modelo UEFM, conforme Larson e outros (2012) a seguinte notação é usada: h para o consumo de habitação; y para o consumo do bem composto; U para a utilidade. No entanto, a notação utilizada no Capítulo 3 segue a estruturação de Fujita (1989). Adota-se neste Capítulo 4 o padrão de equações utilizado em Larson e Yezer (2014).

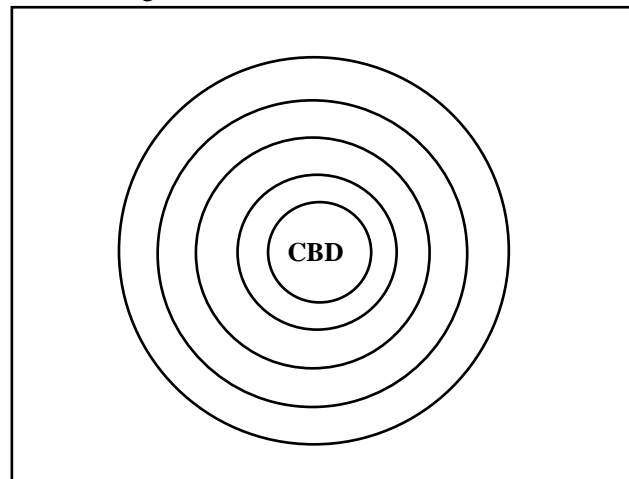
A função de produção da habitação, perfeitamente competitiva e com retornos constantes, com base numa especificação CES é dada por:

$$H = A[\alpha_1 S^\rho + \alpha_2 L^\rho]^{1/\rho} \quad (38)$$

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. A função de produção de habitação é uma abstração desses conceitos. Esta função é condizente com a literatura do capítulo 3, da seção 3.3.1.2. Neste caso, 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.

Um trabalhador, ao se deslocar diariamente da residência ao local de trabalho viaja através de cada anel a caminho do CBD (FIGURA 14). O consumo de energia no deslocamento é a soma de todas as quantidades de energia gastas em cada anel. Logo, cada anel requer uma quantidade diferente de gasolina para passar por este, pois a velocidade é diferente. Dentro de um anel individual, o consumo de gasolina é uma função da velocidade do automóvel. Este ponto será mais explorado no capítulo 4, na seção 4.5. Em resumo, a velocidade é diferente em cada anel, pois depende do congestionamento do tráfego. Nos centros das cidades, a velocidade do automóvel é reduzida, pois o tráfego é maior.

Figura 14 – Anéis em torno do CBD



Fonte: Elaboração própria, 2014

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 e outros (2012) e Larson e Yezer (2014):

$$v(k) = \frac{1}{a + bV(k)^c} \quad (39)$$

Na equação (39), $v(k)$ 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. No entanto, nesta dissertação será utilizada a forma funcional mais simples, conforme especificado acima.

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, $W_L = W - T(k)$. Nesse pressuposto, portanto, não é o tipo de trabalho que oferece remuneração menor e, sim os postos de trabalho locais. Na equação anterior, 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. Esta equação torna os trabalhadores locais exatamente tão bem quanto os trabalhadores do centro de negócios. Segundo Larson e outros (2012), isso confirma a condição de não arbitragem de que exige reduções salariais locais com a distância do centro de empregos a uma taxa igual a poupança com o custo de deslocamento. Como consequência, os trabalhadores recebem a mesma utilidade, independentemente de se deslocarem ou de se empregarem localmente.

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:

$$T(k) = m_0 + m_1 k + p_g \int_0^k \frac{1}{G(v(k))} dk + \Gamma W \int_0^k \frac{1}{v(k)} dk \quad (40)$$

A equação (40) desempenha um importante papel no modelo proposto, pois mudanças nos custos marginais de transporte, devido a um aumento no preço da gasolina p_g , por exemplo, tem efeitos diretos sobre a estrutura das cidades. Desse modo, a função marginal de custo de deslocamento, derivada da equação (40), pode ser escrita como:

$$\frac{dT}{dk} = m_1 + \frac{p_g}{G(v(k))} + \frac{\Gamma W}{v(k)} \quad (41)$$

O resultado (41) mostra a distribuição espacial das famílias na determinação dos custos de deslocamento diário a caminho do CBD, em uma cidade com congestionamento de tráfego,

por meio da função de velocidade, e os custos do combustível que entram diretamente através do preço da gasolina. Isso significa que uma família que mora distante do centro da cidade tem gastos maiores com custos de transporte e com o tempo despendido para chegar ao local de trabalho. Por outro lado, uma família que reside próximo ao CBD têm maior acessibilidade ao centro de cidade, não incorrendo em custos de transporte e de tempo.

Ainda dentre os custos de deslocamento, destaca-se que 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.

Estas seriam as características do modelo UEFM, que serão utilizadas para calibrar um modelo semelhante para o Brasil. Segue nas próximas seções o procedimento de calibragem e a obtenção de dados e parâmetros para o modelo.

4.2 CALIBRAGEM DO MODELO

No processo de calibragem do modelo, objetiva-se encontrar os valores dos parâmetros da função utilidade (37) e da função de produção da habitação (38). Primeiramente, na função de utilidade CES, $U = [\beta_1 y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta}$, normaliza-se β_1 igual à unidade e maximiza-se a utilidade doméstica. A equação a seguir representa o langrangeano do problema:

$$\phi = [y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta} - \lambda(I - y - rh - T) \quad (42)$$

Note que a restrição orçamentária é escrita como $I - y - rh - T = 0$. Diferenciando ϕ em relação à y, h, λ e supondo o uso de situações de equilíbrio, igualando as derivadas a zero, segue que:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{1}{\eta} [y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta - 1} \eta y^{\eta-1} + \lambda = 0 \quad (43)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial h} = \frac{1}{\eta} \left[y^\eta + \beta_2 h^\eta \right]^{\frac{1}{\eta} - 1} \beta_2 h^{\eta-1} \eta + r\lambda = 0 \quad (44)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \lambda} = -I + y + rh + T = 0 \quad (45)$$

Isolando λ nas equações (43) e (44), e posteriormente igualando os λ'_s , pode-se obter:

$$y^{\eta-1} \left[y^\eta + \beta_2 h^\eta \right]^{\frac{1}{\eta} - 1} = -\lambda \quad (46)$$

$$\frac{\beta_2 h^{\eta-1} \left[y^\eta + \beta_2 h^\eta \right]^{\frac{1}{\eta} - 1}}{r} = -\lambda \quad (47)$$

$$y^{\eta-1} \left[y^\eta + \beta_2 h^\eta \right]^{\frac{1}{\eta} - 1} = \frac{\beta_2 h^{\eta-1} \left[y^\eta + \beta_2 h^\eta \right]^{\frac{1}{\eta} - 1}}{r} \quad (48)$$

A equação (48) pode ser reescrita da seguinte forma

$$y^{\eta-1} r = \beta_2 h^{\eta-1} \quad (49)$$

Substituindo $y = I - rh - T$ na equação anterior (49), chega-se a

$$\beta_2 h^{\eta-1} = r(I - rh - T)^{\eta-1} \quad (50)$$

Isolando β_2

$$\beta_2 = \frac{r(I - rh - T)^{\eta-1}}{h^{\eta-1}} \quad (51)$$

Fazendo manipulações algébricas e normalizando I igual à unidade, tem-se

$$\beta_2 = r \left[\frac{h}{1-T-rh} \right]^{1-\eta} \quad (52)$$

Na equação (52), como exposto anteriormente, β_2 é o parâmetro do tamanho do lote na função de utilidade; r é o aluguel por unidade de terra; h é o tamanho do lote; T é a soma do tempo despendido e do custo de deslocamento; η é a elasticidade de substituição na função utilidade.

Do mesmo modo, maximiza-se a função de produção de habitação, $H = A[\alpha_1 S^\rho + \alpha_2 L^\rho]^{1/\rho}$, a fim de se encontrar os parâmetros estruturais da distribuição na função. Como é padrão na análise microeconômica, presume-se que os produtores de habitação maximizam seus rendimentos, de acordo com a restrição: $P_s S + P_l L = I$, onde P_s, S, P_l, L, I são o preço do aluguel de serviços de estrutura, estrutura, preço do aluguel da terra, tamanho do lote e a renda, respectivamente. Como resultado, os parâmetros da função de produção de habitação, α_1, α_2 , podem ser computados por meio das seguintes equações:

$$\alpha_1 = \frac{H^\rho}{\left(\frac{L}{S}\right)^{1-\rho} \frac{P_l}{P_s} L^\rho + S^\rho} \quad (53)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \left(\frac{L}{S}\right)^{1-\rho} \frac{P_l}{P_s} \quad (54)$$

Além destes parâmetros estruturais, também é necessário obter alguns parâmetros comportamentais para calibrar o modelo e fazer a ligação entre as áreas de Economia Urbana e Economia da Energia através de equações comportamentais. Os parâmetros comportamentais serão discutidos nas seções 4.3 e 4.4. Desse modo, o modelo também requer a estimação das equações de consumo energético doméstico e do consumo energético dos veículos. As equações a serem estimadas serão apresentadas nas próximas seções. Estas equações também são fundamentadas em Larson e outros (2012) e Larson e Yezer (2014). Em relação ao método de solução, devido à complexidade do congestionamento que é incorporado ao modelo, existe a falta de uma solução explícita para o sistema de equações

diferenciais não lineares. Desse modo, o problema é escrito como um sistema de equações simultâneas, sendo resolvidas por métodos numéricos. A solução numérica é usada pelo simples fato da estrutura das equações impedirem o uso das técnicas matemáticas tradicionais. Os detalhes do método de solução numérica estão no Anexo A.

4.3 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 (ou metros 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:

$$\ln C_i = \phi_1 + \phi_2 \ln A_i + \phi_3 \ln Y_i + \phi_4 \ln P_i + \phi_5 S'_i + \varepsilon_i \quad (55)$$

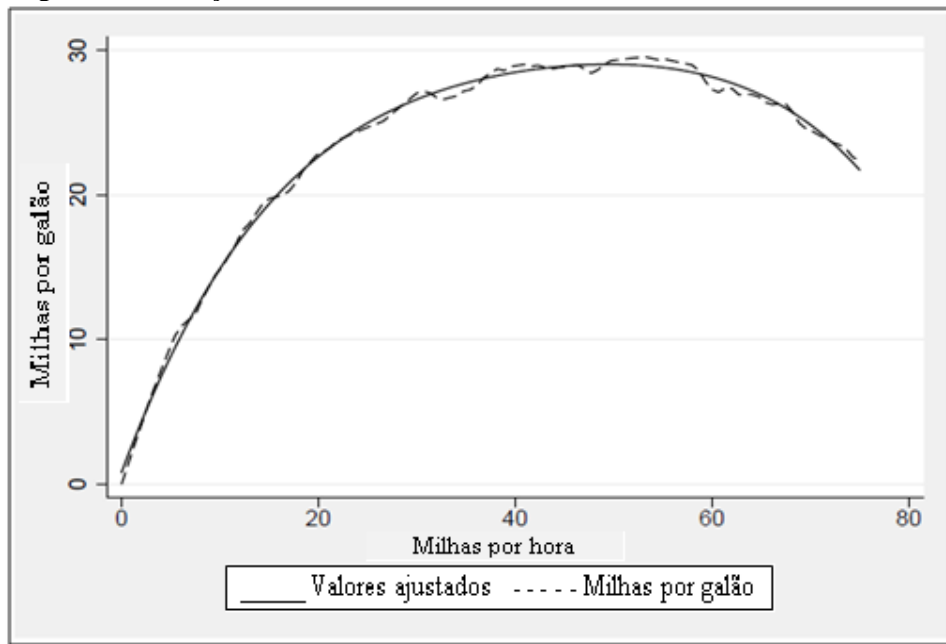
A equação (55) tem C como o consumo energético da família i ; A como a área construída da residência (para casas e apartamentos) *per capita*; Y como a renda domiciliar *per capita*; P como o preço de eletricidade, mensurado pela tarifa média de energia elétrica; S como um vetor de variáveis que descreve o tipo de estrutura *per capita*, isto é, a tipologia habitacional no Brasil (nesta dissertação, 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.

Outros fatores, como o preço dos aparelhos eletrodomésticos, também são importantes para explicar o consumo de energia nas residências e pode ser incluído, a depender da disponibilidade dos dados. Em cidades muito distintas, com culturas e climas muito diferentes, o consumo de energia difere significativamente do padrão. Além disso, a mobilidade social com a subida da classe C de renda, com novos padrões de consumo, também poderia ser considerada. O controle por dois ou mais grupos de renda dado o tamanho das casas e apartamentos em função da renda não é abordado neste trabalho. 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. Utiliza-se a média da renda domiciliar das cinco cidades escolhidas. No entanto, para esta dissertação são consideradas as variáveis descritas pela equação 55. Além desta equação, será necessário obter os parâmetros do consumo de combustível dos veículos, conforme a próxima seção.

4.4 CONSUMO ENERGÉTICO DOS VEÍCULOS

No presente modelo, será tomada a equação de consumo energético dos veículos, discutida por Larson e outros (2012). Esta deriva dos estudos sobre a eficiência do combustível de West e outros (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 de West e outros (1999). A Figura 15 mostra a relação entre a eficiência do combustível, em milhas por galão, e a velocidade desenvolvida por certo veículo, em milhas por hora, em um determinado percurso, no estudo conduzido pelo autor no *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) nos Estados Unidos.

Figura 15 – Relação entre a eficiência do combustível e a velocidade do veículo



Fonte: LARSON e outros, 2012, p. 32

A equação do consumo energético dos veículos é dada por:

$$mpg_i = d + \sum_{j=1}^4 \sigma_j v_i^j + e_i \quad (56)$$

A equação (56) 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. Adota-se neste trabalho a gasolina C como combustível. Além disso, é importante destacar que a equação acima estimada foi ajustada para a velocidade máxima permitida em áreas urbanas e para o consumo máximo eficiente de combustível no Brasil. Os detalhes do ajuste podem ser vistos no item A.8 do Apêndice A. Para facilitar a obtenção e análise dos resultados, com base na literatura internacional, foram preservadas as unidades de medida no padrão americano.

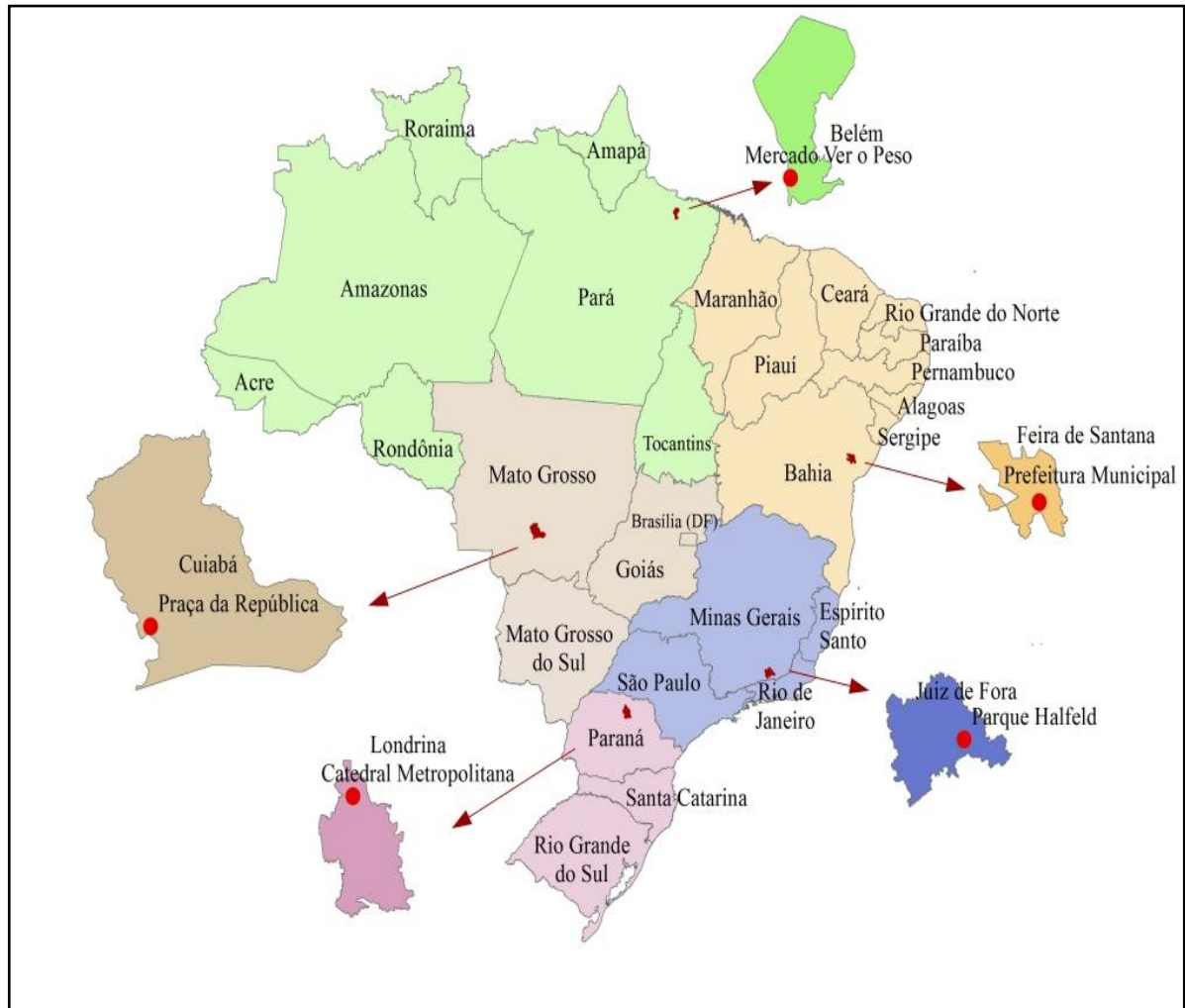
4.5 ESCOLHA DAS CIDADES BRASILEIRAS

Esta seção apresenta as características das cidades brasileiras monocêntricas selecionadas para representar o padrão médio e representativo de uma cidade monocêntrica no país. Seguindo a indicação da literatura, em Larson e outros (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. Desse modo, para evitar a presença de cidades com padrão policêntrico, foram selecionadas cinco cidades médias no Brasil. Além disso, com o objetivo de obter parâmetros estruturais para uma cidade monocêntrica representativa do Brasil, optou-se por selecionar uma cidade de cada grande 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. As características estruturais de cada cidade foram obtidas todas para o ano-base de 2010, que será o ano-base de calibragem do modelo. As cinco cidades selecionadas são distintas uma da outra, com culturas e climas muito diferentes, porém muito próximas em suas características socioeconômicas. Além disso, tem como vantagem o monocentrismo, com o centro localizado em um centro histórico bem definido. Este centro também constitui o centro de empregos de cada cidade, ou seja, o respectivo CBD de cada uma. As cidades brasileiras representam bem este modelo monocêntrico. A maioria das cidades são monocêntricas, com exceção das capitais, como Salvador, que possuem mais de um centro principal de empregos. Nas cidades policêntricas, com mais de um centro de empregos, reforça-se a importância das economias de aglomeração.

A Figura 16 apresenta a localização das cinco cidades monocêntricas selecionadas e seus respectivos CBDs. Seguem no restante desta seção, as características individuais de cada cidade.

Figura 16 – Localização das cidades escolhidas para a calibragem do modelo, com seus respectivos CBDs



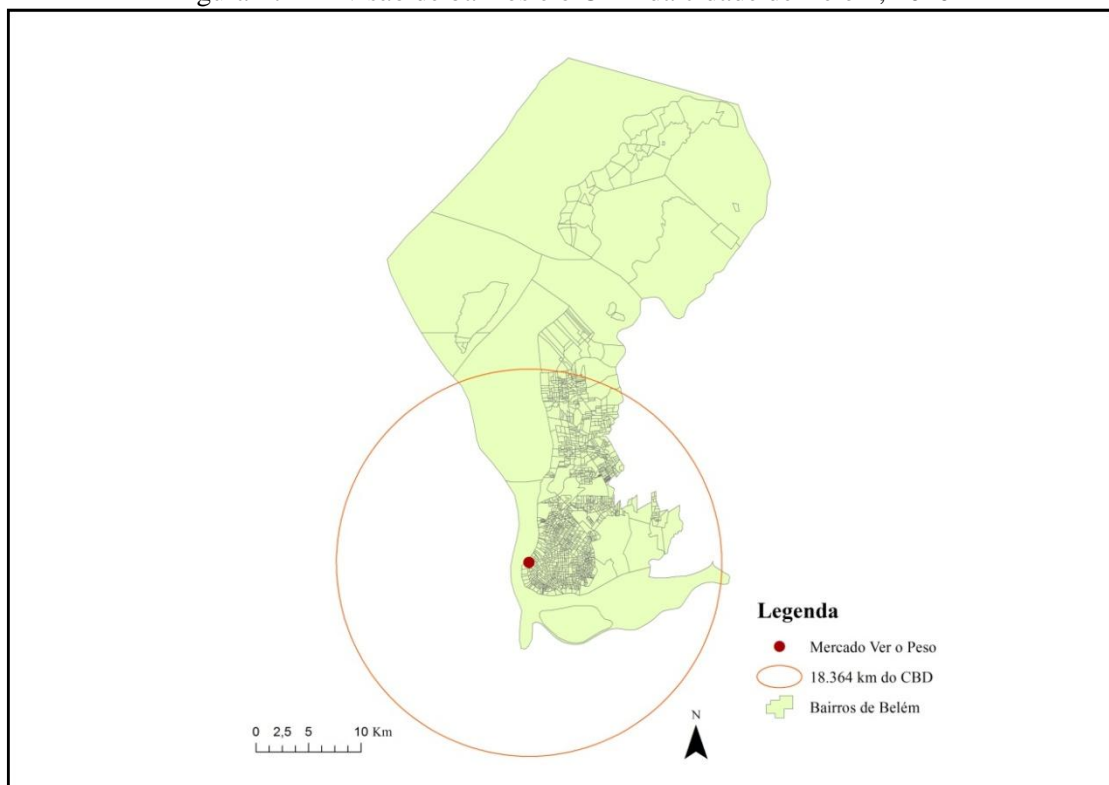
Fonte: Elaboração própria, 2014

4.5.1 Belém

A cidade brasileira de Belém, capital do Estado do Pará, foi escolhida para o estudo para representar a Região Norte do país. Esta foi à única cidade da Região Norte com indicador de PIB *per capita* e uma área semelhante às outras cidades escolhidas. Trata-se de uma cidade com único centro de negócios, permitindo diálogo direto com a Teoria da Economia Urbana Monocêntrica. As evidências apontam que o CBD tem epicentro no centro histórico do Bairro da Cidade Velha, sendo um referencial do patrimônio histórico, cultural e econômico do Estado. Nesta região está situado o Mercado Ver-o-Peso, que é a maior feira ao ar livre da América, além do Forte do Presépio (fortificação militar do Brasil Colônia), a Praça do Relógio, a Catedral da Sé, o Museu/Igreja de Santo Alexandre, a Casa das Onze Janelas. Pode-se assumir o Mercado Ver-o-Peso como marco fundamental. Além disso, concentram-se

nesta área as atividades tradicionalmente *locus* de comércio e serviços e uma forte concentração do funcionalismo público. A Cidade Velha também é um bairro residencial, no entanto, ao se distanciar do CBD, verifica-se uma concentração maior de residências. O tamanho da população foi a variável que se distanciou das demais cidades selecionadas. Isso porque não se verificou nenhuma cidade adicional com padrão semelhante as demais cidades selecionadas das outras regiões. A Figura 17 apresenta no mapa a cidade de Belém e sua divisão de bairros, bem como o CBD.

Figura 17 – Divisão de bairros e o CBD da cidade de Belém, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

A população do município de Belém em 2010 foi estimada em 1.393.399 habitantes, distribuídos em 368.877 domicílios, com uma taxa de ocupação de 3,78 habitantes por domicílio. Do total da população de Belém, menos de 1,0% se localizava na zona rural. A população estimada em 2014 chegou a 1.432.844 habitantes, com uma taxa de crescimento de 2,8% em relação ao ano considerado no estudo. A cidade ocupa uma área total de 1.059,41 km², possui um PIB *per capita* de R\$ 12.921,64 e uma renda *per capita* de R\$ 853,82, no ano analisado. Todos os indicadores de desenvolvimento estão acima da média nacional. O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 2010 foi de 0,746 (nacional 0,727). O índice da longevidade foi de 0,822 (nacional 0,816) e o da educação foi de 0,673 (nacional

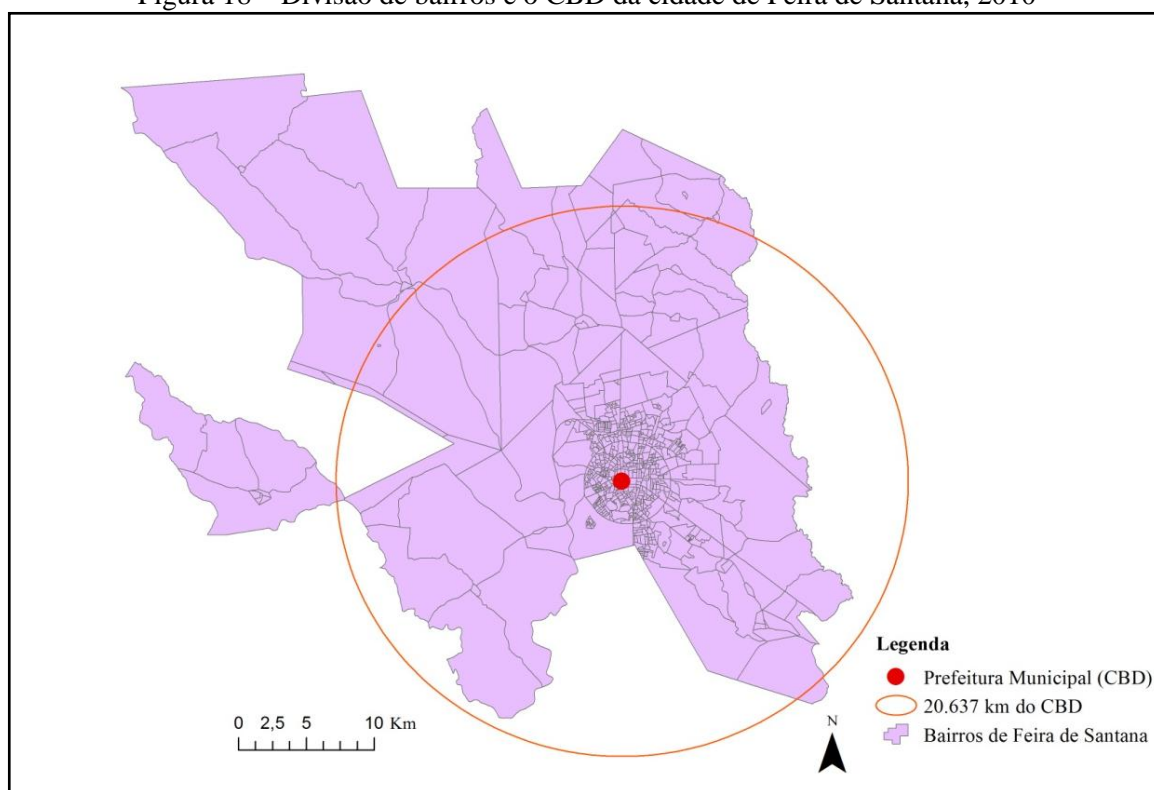
0,637). Quanto o índice da renda, este foi de 0,751 (nacional 0,739). O Coeficiente de Gini, índice mais utilizado para medir a desigualdade de renda, atingiu 0,61 em 2010 (TABELA B.1 do APÊNDICE B).

A análise do tempo de deslocamento entre a residência e o local de trabalho revelou que, na cidade de Belém segundo as Tabelas C.1 e C.3 do Apêndice C, 210,7 mil indivíduos (50,06% do total de trabalhadores empregados fora do domicílio) levavam de seis a trinta minutos para chegar ao local de trabalho em 2010. Do total, 44,67 mil (10,61%) gastavam mais de uma hora. Na comparação entre as cinco cidades consideradas, Belém apresentou o maior tempo de deslocamento casa-trabalho, ou seja, 41,1% dos trabalhadores gastavam mais de 60 minutos no deslocamento. O tempo médio de deslocamento encontrado foi 33 minutos, conforme Tabela C.2 do Apêndice C. Este valor foi superior à média brasileira de tempo de deslocamento de 32 minutos. Isso pode ser explicado devido ao maior tamanho da população, do maior número de veículos e também pela existência de muitas ruas estreitas no centro histórico.

4.5.2 Feira de Santana

A cidade brasileira de Feira de Santana está localizada no Estado da Bahia e representa a Região Nordeste. Esta foi escolhida para o universo da pesquisa por ter características semelhantes às outras cidades, principalmente em relação ao tamanho da população. Além disso, Feira de Santana possui uma configuração geográfica circular e características de uma cidade monocêntrica com um centro de empregos bem definido de acordo com a Teoria de Economia Urbana. A interligação das avenidas Getúlio Vargas e Senhor dos Passos evidenciam um CBD com outras áreas circunvizinhas. As avenidas são heterogêneas em seus trajetos, abrigando prefeitura, farmácias, boutiques, bancos, lojas de utilidades em geral, restaurantes, hospitais, mercado municipal, terminal de ônibus e residências de elevado padrão. Segundo jornais locais e pesquisas imobiliárias, estas avenidas representam a região mais valorizada da cidade. Isto reforça a Teoria Monocêntrica, cujo centro de negócios representa um pico no gradiente de preços de aluguel da terra. A Figura 18, a seguir, mostra a prefeitura municipal como o ponto central da área de negócios. Desse modo, o centro urbano é considerado como a concentração das oportunidades de emprego e das decisões econômicas, sendo o local com maior densidade de empregos.

Figura 18 – Divisão de bairros e o CBD da cidade de Feira de Santana, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

Feira de Santana é a segunda cidade mais populosa do Estado da Bahia, com uma população de 556.642 habitantes em 2010, distribuídos em 162.864 domicílios e com uma taxa de ocupação de 3,42 habitantes por domicílio. Do total da população, 46 mil vivem em áreas rurais. A densidade populacional foi de 416 habitantes por km². Nas estimativas recentes de 2014, a cidade tem mais de 600 mil habitantes (crescimento de 10,0% em relação ao ano de 2010). Feira de Santana possui um PIB *per capita* de R\$ 13.350,8, uma renda *per capita* de R\$ 662,24 e uma área total de 1.337,99 km². O IDHM foi menor que a média nacional, sendo 0,710 (nacional 0,727). Com exceção do índice de longevidade, os outros indicadores de desenvolvimento foram menores que a média nacional. O índice da longevidade foi de 0,820 (nacional 0,816), o da renda foi 0,710 (nacional 0,739) e o da educação foi 0,619 (nacional 0,637). A expectativa de vida chegou a 74,89 anos e o índice de Gini atingiu 0,60 (TABELA B.1 do APÊNDICE B).

Em relação ao tempo de deslocamento entre a residência e o local de trabalho, as Tabelas C.3 e C.1 do Apêndice C mostram que 60,29% do total de trabalhadores empregados fora do domicílio (98,6 mil indivíduos) gastavam de seis a trinta minutos para chegar ao local de trabalho. Do total, 7,58% (12,3 mil indivíduos) demoravam mais de uma hora no percurso

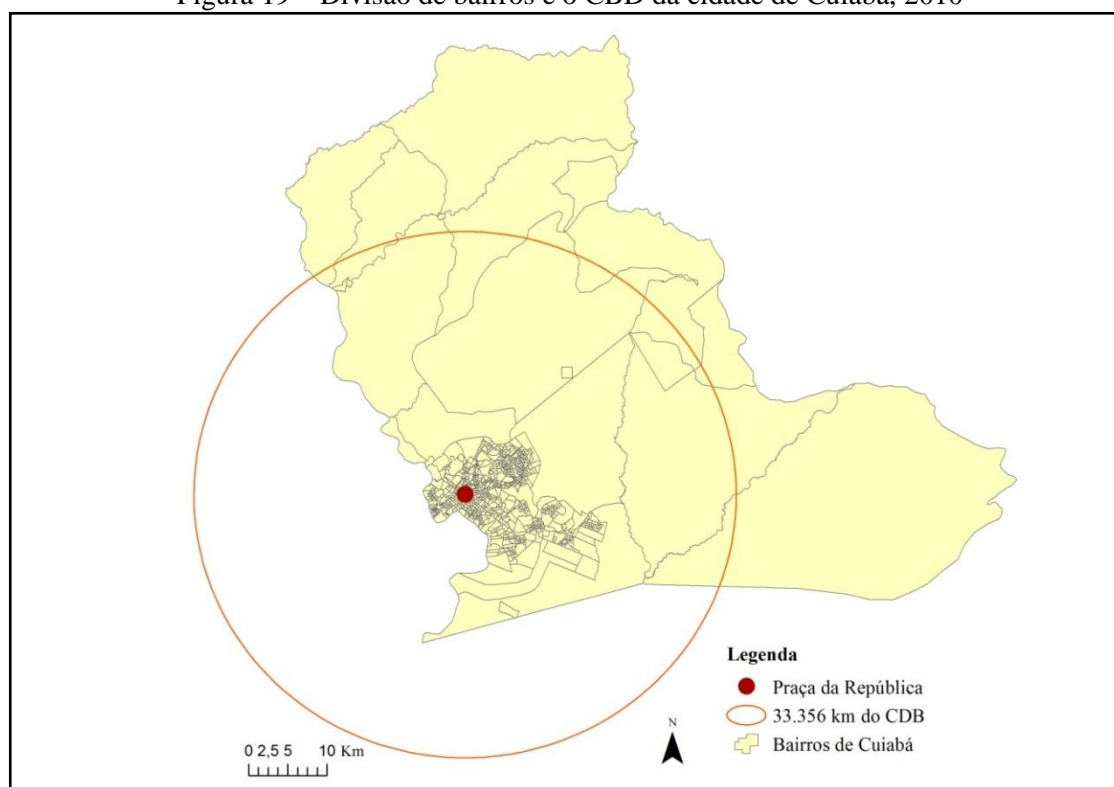
casa-trabalho. Na comparação entre as cinco cidades selecionadas, Feira de Santana teve a menor proporção de trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento diário casa-trabalho, isto é, 29,84% gastavam mais de 60 minutos no deslocamento. O tempo médio de deslocamento encontrado para o ano de 2010 foi 28,4 minutos, sendo inferior a média brasileira de 32 minutos (TABELA C.2 do APÊNDICE C).

4.5.3 Cuiabá

A cidade de Cuiabá está localizada no Estado do Mato Grosso, na Região Centro-Oeste. Esta apresenta características semelhantes às outras cidades, como o PIB *per capita* e o tamanho da população. A cidade também apresenta o formato de cidade monocêntrica. Cuiabá possui um centro histórico bem definido, em uma região que tradicionalmente é o *locus* das atividades de comércio e serviços, e uma configuração geográfica circular. A Rua Treze de Junho, no centro da cidade, evidencia o núcleo do CBD, expandindo-se pelas áreas circunvizinhas. A Praça da República, no centro da cidade, é um marco fundamental. Sendo esta região caracterizada pela localização de bancos, lojas, consultórios, Hospital Geral, farmácias, restaurantes, e dessa forma, existe o maior número de postos de trabalho. A região conta ainda com importantes obras como a Catedral Metropolitana Basílica do Senhor Bom Jesus, o Palácio da Instrução (atualmente biblioteca pública), a prefeitura municipal e o Cine Teatro Cuiabá. Ao se afastar desta região, verifica-se a localização da maior parcela de imóveis compreendida por casas.

A população do município de Cuiabá em 2010 chegou a 551.098 habitantes, constituída por 98,0% da população urbana e apenas 2,0% da população rural, sendo a maior cidade do Estado do Mato Grosso. A taxa de ocupação foi de 3,33 habitantes por domicílio. Em 2014, a população estimada atingiu 575.480 (crescimento de 4,0%). Cuiabá conta com um PIB *per capita* de R\$ 20.044,67 e uma renda *per capita* de R\$ 1.161,49. A cidade estende-se por uma área total de 3.495,42 km² com densidade de 157,7 habitantes por km². Segundo dados do PNUD (2013), todos os indicadores de desenvolvimento foram acima da média nacional. O IDHM foi 0,785 (nacional 0,727). Os índices da longevidade, renda e educação foram 0,834 (nacional 0,816), 0,800 (nacional 0,739) e 0,726 (nacional 0,637), respectivamente. A expectativa de vida chegou há 75,01 anos. O índice de Gini foi de 0,59 (TABELA B.1 do APÊNDICE B). A divisão de bairros e o ponto no espaço representando pelo CBD são expostos na Figura 19.

Figura 19 – Divisão de bairros e o CBD da cidade de Cuiabá, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

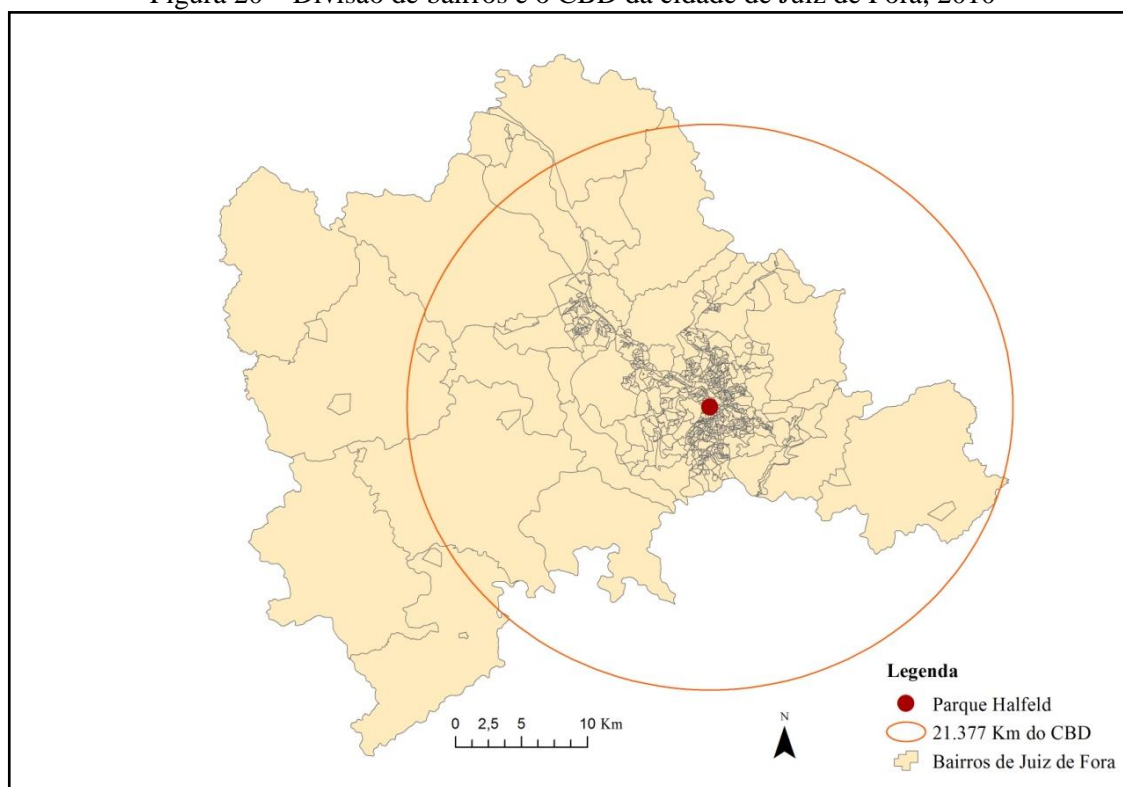
O tempo de deslocamento entre a residência e o local de trabalho, de acordo com as Tabelas C.1 e C.3 do Apêndice C, mostrou que 106,4 mil do total de trabalhadores empregados fora do domicílio (53,08%) gastavam de seis a trinta minutos para chegarem ao trabalho e 61,29 mil trabalhadores (30,58%) gastavam entre trinta a sessenta minutos no percurso casa-trabalho. Do total, apenas 0,70% gastavam mais de duas horas no deslocamento. Na comparação entre as cinco cidades brasileiras, Cuiabá foi à terceira com maior percentual de tempo gasto no deslocamento casa-trabalho. Dos trabalhadores, 38,85% gastavam mais de 60 minutos no deslocamento. A média do tempo de deslocamento de Cuiabá ficou em 31,4 minutos, pouco abaixo da média brasileira de 32 minutos (TABELA C.2 do APÊNDICE C).

4.5.4 Juiz de Fora

Juiz de Fora está localizada no Estado de Minas Gerais, na Região Sudeste do Brasil. Por apresentar características semelhantes, dentre elas, em termos de população e PIB *per capita* com as outras cidades, esta também foi selecionada. A cidade apresenta um único centro comercial bem definido de acordo com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica. O calçadão da Rua Halfeld é o principal corredor de circulação, o endereço mais valorizado e a

rua de destaque da cidade, com cafés, cinemas, galerias, bancos e lojas de artigos em geral. Nesta rua se localiza a Câmara Municipal e o Parque Halfeld (FIGURA 20). Essa área é indicada como o epicentro do CBD, com concentração dos empregos e das atividades econômicas.

Figura 20 – Divisão de bairros e o CBD da cidade de Juiz de Fora, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

Em 2010, a população do município foi de 516.247 habitantes, apresentando uma densidade populacional de 359,6 habitantes por km² e uma taxa de ocupação de 3,08 habitantes por domicílio. Desse total, 98,86% (510.378 habitantes) residia na zona urbana e 1,14% (5.869 habitantes) na zona rural. A estimativa da população em 2014 foi de 550.710 habitantes, representando um crescimento de 6,68% em relação ao ano de 2010. O município exerce uma influência econômica no Estado de Minas Gerais, com um PIB *per capita* estimado em R\$ 16.054,99 e uma renda *per capita* de R\$ 1.050,88. A maioria dos indicadores de Juiz de Fora são elevados e acima da média nacional, conforme o PNUD (2013). O IDHM foi de 0,778, acima da média nacional e estadual de 0,727 e 0,731, respectivamente. O índice da longevidade foi 0,844 (nacional 0,816), o da renda foi 0,784 (nacional 0,739) e o da educação foi 0,711 (nacional 0,637). A expectativa de vida foi de 75,65 anos (nacional 73,94). O índice de Gini chegou a 0,56 (TABELA B.1 do APÊNDICE B).

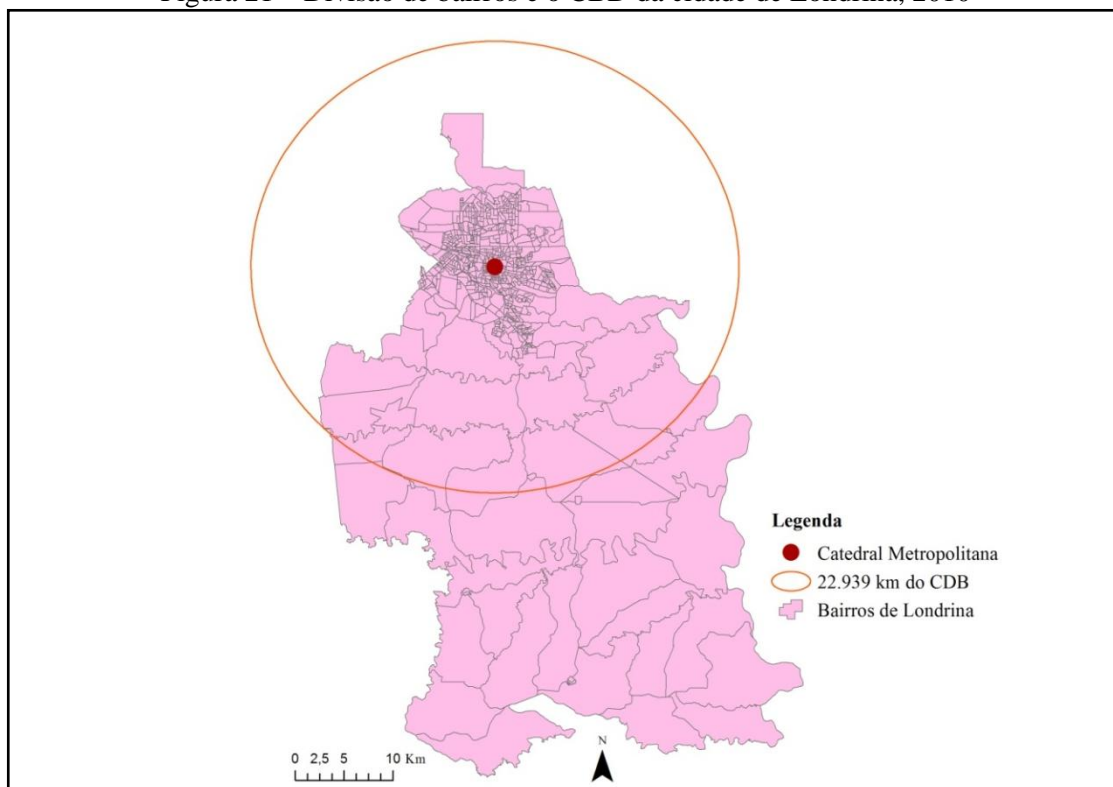
Em relação ao tempo de deslocamento entre a residência e o local de trabalho, a pesquisa mostra que 96.247 do total de trabalhadores empregados fora do domicílio (51,65%) gastavam de seis a trinta minutos no deslocamento, enquanto 60.712 trabalhadores (32,58%) gastavam mais de trinta minutos até uma hora no percurso. Do total, 14.608 trabalhadores (7,83%) gastavam mais de uma hora para chegarem ao local de trabalho (TABELAS C.1 e C.3 do APÊNDICE C). O tempo de deslocamento médio foi de 31.6 minutos, conforme a Tabela C.2 do Apêndice C. O valor foi pouco abaixo da média brasileira de 32 minutos.

4.5.5 Londrina

A cidade de Londrina esta localizada no Estado do Paraná, na Região Sul do Brasil. Esta se enquadra na literatura de Economia Urbana Monocêntrica, por apresentar um centro de empregos bem definido na área ao redor da Catedral Metropolitana. Londrina também exibe características semelhantes em relação ao tamanho da população e ao PIB *per capita* das outras cidades do estudo. O centro da cidade concentra boa parte do patrimônio arquitetônico e as atividades de comércio e serviços. A área ao redor da Catedral Metropolitana de Londrina é o principal centro de negócios e circulação de pessoas, sendo definida então como o epicentro do CBD. Nesta área se localizam boutiques, hotéis, bancos, museus, cinemas e lojas em geral. A Figura 21 apresenta a divisão de bairros e o CBD de Londrina.

Londrina é a segunda cidade mais populosa do Estado do Paraná, com uma população de 506.701 habitantes, constituída por 97,40% (493.520 habitantes) na zona urbana e 2,60% (13.181) na zona rural (TABELA B.1 do APÊNDICE B). A taxa de ocupação foi de 3,07 habitantes por domicílio. As estimativas recentes para 2014 apontam para uma população de 543.003 habitantes (crescimento de 7,0% em relação a 2010). Londrina exerce influência econômica e comercial no Estado do Paraná. Em 2010, o PIB *per capita* foi estimado em R\$ 19.612,48 e a renda *per capita* em R\$ 1.083,35. Os indicadores de desenvolvimento humano são elevados e maiores que a média nacional. O IDHM atingiu 0,778, que é acima do nacional 0,727 e estadual de 0,749. O índice da longevidade foi 0,837 (nacional 0,816), o da renda foi 0,789 (nacional 0,739) e o da educação atingiu 0,712 (nacional 0,637). A expectativa de vida foi estimada em 75,19 anos e o índice de Gini atingiu 0,51 (TABELA B.1 do APÊNDICE B).

Figura 21 – Divisão de bairros e o CBD da cidade de Londrina, 2010



Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

O tempo de deslocamento médio da residência até o local de trabalho foi de 27,9 minutos (TABELA C.2 do APÊNDICE C), sendo o menor tempo de todas as cidades do estudo. As principais ruas, como a Rua Sergipe, são estreitas, impossibilitando até a passagem de dois automóveis ao mesmo tempo. Além disso, existem os cruzamentos e rotatórias, que colaboram para o trânsito não fluir bem. Esse problema afeta o sistema de transporte coletivo, diminuindo a velocidade média no deslocamento ao centro da cidade. Em 2010, 58,63% dos trabalhadores empregados fora do domicílio (106.262 indivíduos) gastavam de seis a trinta minutos no deslocamento da residência ao local de trabalho, enquanto 25,22% (45.699 indivíduos) gastavam mais de meia hora até uma hora no percurso. Apenas 0,31% (562 indivíduos) gastavam mais de duas horas (TABELAS C.3 e C.1 do APÊNDICE C).

Após a apresentação das cidades selecionadas, seguem na próxima seção os critérios de obtenção dos parâmetros-chave.

4.6 BASE DE DADOS E PARÂMETROS-CHAVE

O processo de calibragem é baseado em uma média dos dados das cinco cidades brasileiras escolhidas para o estudo. O número total de residências, por exemplo, reportado na modelagem é o número médio de residências entre as cidades de Belém, Feira de Santana, Cuiabá, Juiz de Fora e Londrina (TABELA D.1 do APÊNDICE D e também TABELA E.1 do APÊNDICE E). Para a calibragem do modelo proposto serão utilizadas variáveis urbanas e também de energia que permitam avaliar o consumo eficiente de energia em relação ao espaço habitacional, os deslocamentos diários da residência para o local de trabalho dos indivíduos e a estrutura espacial das cidades. Para tanto, foi necessário levantar informações municipais para as cidades monocêntricas escolhidas para o estudo. Os valores das variáveis foram obtidos considerando o ano-base de 2010, uma vez que o banco de dados para a calibragem do modelo é composto em sua maioria por dados do IBGE (2010).

As variáveis espaciais foram obtidas e/ou calculadas diretamente das cinco cidades de referência. A área dos terrenos (ou tamanho do lote) e a área construída (ou área interior da residência), em metros quadrados, foram obtidas junto às Prefeituras Municipais das cidades selecionadas. A área da cidade, ou seja, a área da unidade territorial em quilômetros quadrados foi obtida junto ao IBGE. O raio da cidade parte de um ponto no espaço (CBD) e se estende até a extremidade. Este ponto central foi localizado também a partir de informações junto às prefeituras municipais de cada cidade.

Um outro conjunto de informações refere-se às características dos domicílios, renda e deslocamento dos trabalhadores. A renda média domiciliar e a unidade de habitação (número de domicílios) foram obtidas junto ao IBGE. No estudo, foram consideradas como tipologias habitacionais as casas e os apartamentos. O tempo de deslocamento casa-trabalho foi obtido por uma média ponderada entre o tempo habitual e o número de trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento, dividido pelo total de trabalhadores. Esses dados foram obtidos junto ao IBGE e estão na Tabela C.1 do Apêndice C. O tempo médio de deslocamento casa-trabalho pode ser visto na Tabela C.2 do Apêndice C. Além disso, também serão adicionadas informações sobre o percentual de casas e apartamentos a partir dos dados coletados junto ao IBGE. Estes dados reais para as cinco cidades de referência são apresentados na Tabela D.1 do Apêndice D e também na Tabela E.1 do Apêndice E.

No caso das variáveis de consumo energético e respectivos preços, estas foram obtidas junto aos órgãos oficiais e empresas fornecedoras. O consumo de energia elétrica em unidades físicas (Mwh) da classe residencial foi disponibilizado pelas concessionárias de energia elétrica que atendem as cidades do estudo, a saber: CELPA (Belém), COELBA (Feira de Santana), CEMAT (Cuiabá), CEMIG (Juiz de Fora) e COPEL (Londrina). Os dados de consumo de etanol hidratado, gasolina C e GLP para cada cidade foram disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

O Quadro 2 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.

Quadro 2 – 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 ³³	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.

³³ 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 $\pi=3.14$.

Além dos parâmetros estruturais das funções de utilidade e de produção de habitação provenientes da calibragem ($\beta_2, \alpha_1, \alpha_2$), também é necessário obter os parâmetros comportamentais destas funções (η, ρ) derivados de estimações econométricas. Estes parâmetros foram apresentados nas seções anteriores. Este conjunto de dados foi obtido da literatura a partir de Larson e outros (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 3 apresenta os valores dos parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo numérico de simulação urbana para o Brasil. Os detalhes da obtenção dos parâmetros brasileiros se encontram no Apêndice A.

Tabela 3 – 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				

Continua

Conclusão

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 Laron <i>et al.</i> (2012) a partir da relação entre o consumo de energia dos Estados Unidos 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 Apartamentos	-0.0746 -0.310	---	Larson <i>et al.</i> (2012)
Parâmetros do Consumo Energético dos Veículos				
d	Constante	0.23025849	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
σ_1	Parâmetro do consumo de combustível	1.933225	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
σ_2	Parâmetro do consumo de combustível	-0.0520949	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
σ_3	Parâmetro do consumo de combustível	0.0006357	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO
σ_4	Parâmetro do consumo de combustível	-0.00000345	----	Ajuste para o Brasil a partir de Larson <i>et al.</i> (2012), Código Brasileiro de Trânsito e INMETRO

Fonte: Elaboração própria, 2014

Seguindo a teoria dos modelos de cidade monocêntrica apresentada no capítulo 3, nesta dissertação, será construído o modelo de simulação urbana adaptado para análise de choques de política energética, para a avaliação de efeitos do uso da terra e das políticas de transporte sobre os padrões espaciais de habitação das cidades brasileiras. O estudo pretende apresentar o primeiro modelo numérico de simulação urbana, calibrado para o Brasil, que permite a simulação de política energética. A análise é semelhante à desenvolvida por Larson e outros (2012), adaptando-se as limitações de dados dos países em desenvolvimento. O modelo pode ser empregado tanto para representar cidades fechadas quanto cidades abertas. O modelo será implementado computacionalmente utilizando o *software* MATLAB, versão 9.0. Os resultados da simulação possibilitam calcular implicações para o uso eficiente de energia.

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 será calibrado. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados da calibragem do modelo, bem como as respectivas simulações.

5 RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo descrever os resultados das simulações conforme os procedimentos metodológicos desenvolvidos no estudo. Inicialmente será apresentado o modelo calibrado com os cenários reais e os simulados. Em seguida, serão apresentados os três cenários, as relações causais de cada choque e os resultados obtidos. Para facilitar a obtenção de resultados comparáveis à literatura internacional, foram preservadas as unidades de medida no padrão americano. O consumo eficiente de energia deve estar relacionado ao espaço habitacional, aos deslocamentos diários casa-trabalho dos indivíduos e a estrutura espacial das cidades.

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 4. As variáveis reais do processo de calibragem são baseadas em uma média dos dados das cinco cidades brasileiras do estudo (Belém, Feira de Santana, Cuiabá, Juiz de Fora e Londrina). O modelo de simulação urbana pode ser empregado tanto para representar cidades fechadas quanto cidades abertas. O modelo de cidade aberta, descrito no capítulo 3, na seção 3.3.1.4, foi o mais apropriado para conduzir as simulações. A justificativa recaiu sobre a livre circulação de indivíduos dentro e fora da cidade. O modelo de cidade fechada tem seu uso, mas é limitado na sua interpretação, principalmente por não considerar o suposto de migração. Ademais, os resultados foram implementados computacionalmente utilizando o *software* MATLAB, versão 9.0.

Dado o objetivo de avaliar o efeito da distribuição espacial do uso da terra e das políticas de transporte urbano sobre a eficiência energética na economia brasileira, a cidade representativa simulada satisfaz bem as expectativas. 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 trabalho. 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. Desse modo, os poucos pontos de divergência entre os valores reais e os valores simulados são devido a imposição de

um único grupo de renda, ou seja, utiliza-se a média da renda domiciliar das cinco cidades escolhidas.

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. Além disso, a modelagem de simulação urbana do presente trabalho não aborda o transporte público de massa no processo de calibragem. Isso pressupõe um determinado grau de abstração em relação as estruturas das cidades brasileiras, mas não interfere nos resultados.

Inicialmente, verificou-se que a imposição de um único grupo de renda faz 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%. Na literatura de Economia Urbana Monocêntrica, Altmann e DeSalvo (1981) mostraram que a adição de diversos grupos de renda em modelos de simulação urbana produz um raio maior para a cidade simulada. 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 4).

A imposição de um único grupo de renda (não se tem o controle por dois ou mais grupos de renda) também faz com que o valor simulado para a renda média domiciliar seja maior que o valor real. Conforme Larson e Yezer (2014), a variação entre as cidades reais e a simulação do modelo proposto é comum devido ao planejamento do uso da terra. Isso faz com que as cidades reais sejam afastadas da solução de mercado não regulamentada gerada pelo modelo de simulação urbana.

Tabela 4 – 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

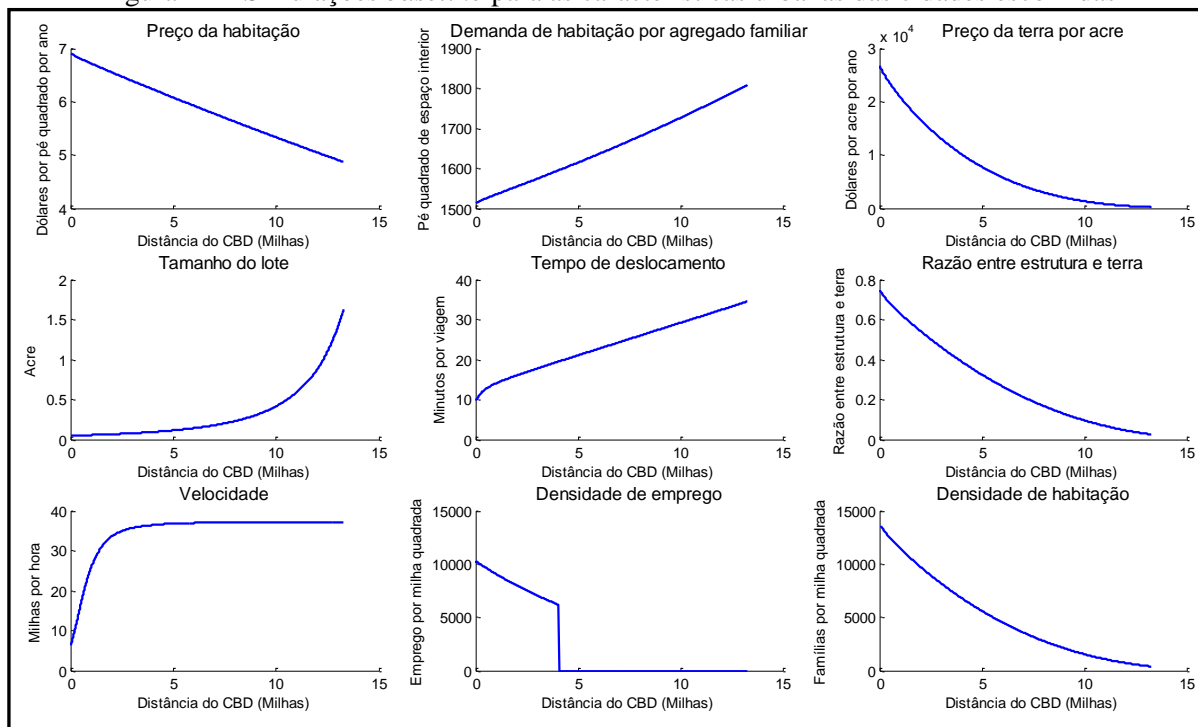
Fonte: Elaboração própria, 2014

As características gerais da cidade simulada são apresentadas na Figura 22. Esta figura mostra a relação espacial entre as características urbanas da cidade representativa, tais como o preço da habitação, o tamanho do lote, o tempo de deslocamento, dentre outras. Os resultados são consistentes com o perfil espacial das cidades, principalmente, com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica descrita no capítulo 3. A especificação do modelo tradicional monocêntrico 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), conforme Figura 22. Cabe destacar que a razão entre capital-terra ou densidade estrutural representa a verticalidade das habitações, conforme o capítulo 3, na seção 3.3.1.2. Na modelagem apresentada, o capital é representado pela estrutura, ou seja, a estrutura da habitação. 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 a terra se torna mais cara à medida que se aproxima do CBD. Nas localizações mais distantes, utiliza-se mais terra e menos capital. Segundo Brueckner (1987), observa-se a redução da altura dos edifícios na medida em que aumenta a distância em relação ao centro de negócios.

A densidade urbana de habitação também diminui conforme aumenta a distância do centro de negócios. Isso é explicado pelo fato de que à distâncias maiores os edifícios são curtos e os espaços para habitação são maiores, implicando em um número menor de moradias e também com poucos moradores (trabalhadores). No ponto mais distante do CBD, os indivíduos consomem uma maior quantidade de terras (lotes maiores). Entretanto, estes indivíduos incorrem em ambos os custos com transporte e tempo despendido maiores. A velocidade é mínima no centro de negócios devido à característica de congestionamento do modelo. Além disso, é possível concluir pela Figura 22 que o CBD é o local com maior densidade de

empregos. Desse modo, a cidade representativa simulada apresentou características consistentes com a literatura de Economia Urbana Monocêntrica.

Figura 22 – Simulações *baseline* para as características urbanas das cidades escolhidas



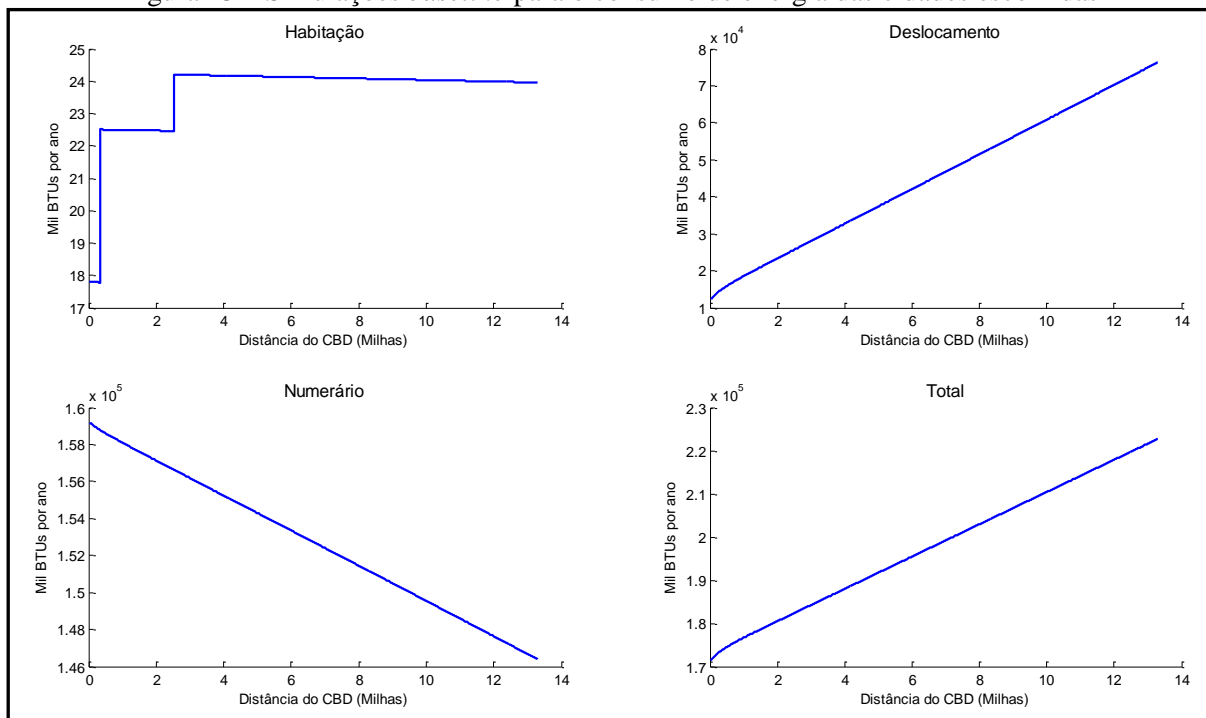
Fonte: Elaboração própria, 2014

O padrão de distribuição espacial do uso de energia nas cidades é apresentado na Figura 23. 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, pois aumenta o espaço interior da unidade habitacional. Além disso, o consumo de energia gasto nos deslocamentos pendulares também é maior conforme aumenta a distância do centro de negócios. Isso é explicado pelo tempo de operação do veículo. Portanto, no ponto mais distante do centro de negócios maior é o consumo de energia gasto na habitação e no deslocamento.

O consumo de energia do numerário, ou seja, dos setores público e comercial, diminui à medida que se distancia do CBD. É possível concluir pela Figura 23 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. Ademais, no total, o consumo de energia é maior conforme aumenta a distância do centro de negócios.

Figura 23 – Simulações *baseline* para o consumo de energia das cidades escolhidas



Fonte: Elaboração própria, 2014

A análise nessa seção descreveu as características da cidade representativa simulada, a partir do modelo proposto no capítulo 4 e dos dados e parâmetros selecionados. Os valores reais e os valores simulados das cidades estão em conformidade e as diferenças são previstas para um modelo que adota um único grupo de renda. Além disso, a seção também apresentou a relação entre as características urbanas espaciais e a distância, bem como o uso de energia nas cidades simuladas. O uso de energia na habitação e no deslocamento aumenta com a distância do CBD. Este fato é reportado nos estudos empíricos de Brownstone e Golob (2009). Os autores concluíram que a densidade habitacional é inversamente proporcional ao consumo de energia do automóvel. A próxima seção apresenta as relações causais do modelo, a serem analisadas nas simulações de política a serem testadas.

5.2 RELAÇÕES CAUSAIS REFERENTES AO MECANISMO DE FUNCIONAMENTO DO MODELO PROPOSTO

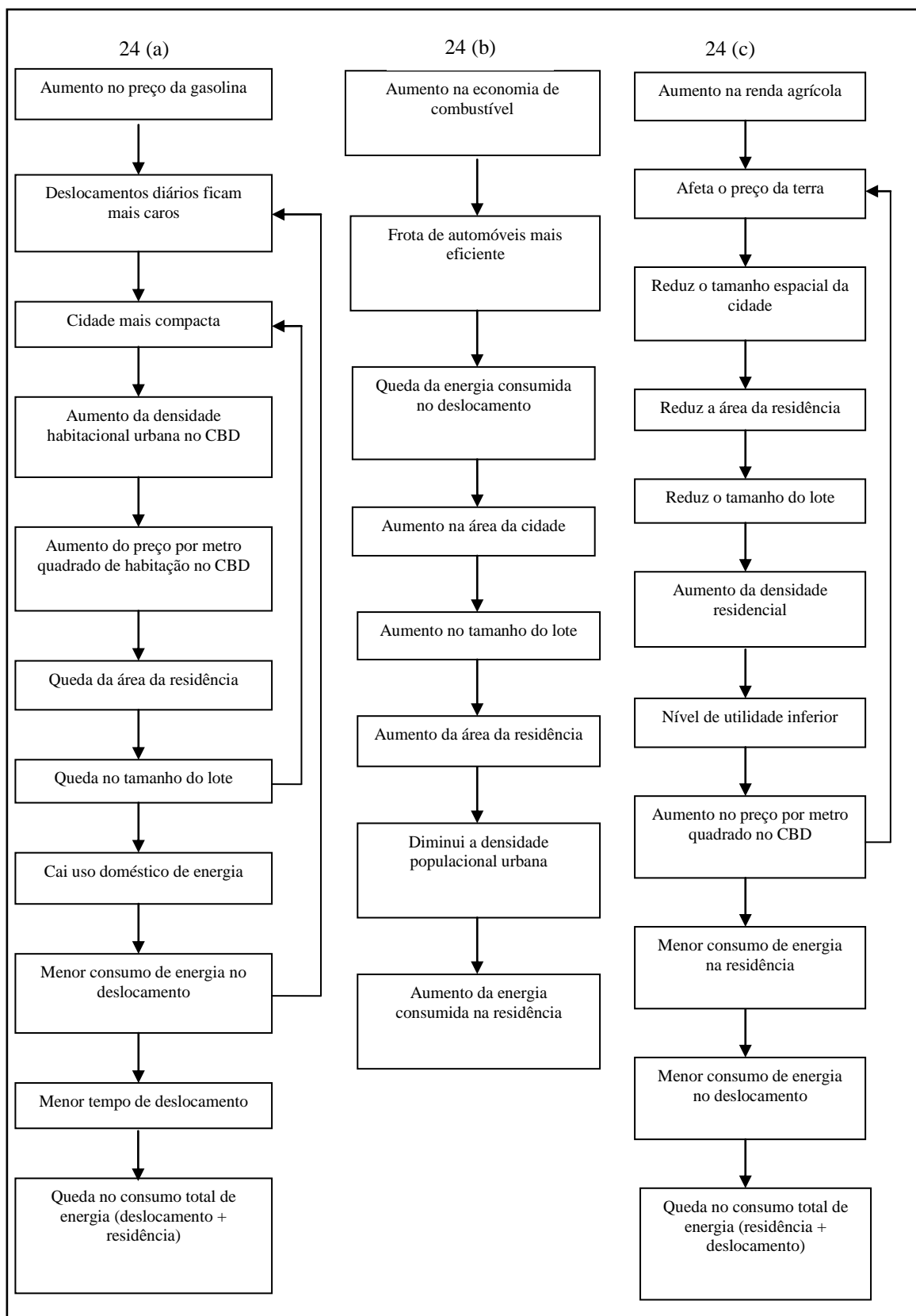
Os experimentos básicos a serem realizados referem-se aos choques exógenos que serão inseridos nas equações do modelo proposto. A Figura 24 apresenta as principais relações

causais referentes às três simulações a serem testadas: (a) aumento no preço da gasolina; (b) aumento na eficiência do consumo de combustível; (c) aumento na renda agrícola.

Um aumento no preço da gasolina, em 24 (a), tem impacto na política de transporte e, portanto, nos custos de deslocamento diário das famílias. Os deslocamentos diários ficam mais caros e, em resposta a esse choque, a cidade torna-se mais compacta. Isso gera um aumento da densidade habitacional próxima ao CBD. Como resultado, o preço por metro quadrado de habitação no CBD fica mais caro. Esses elementos provocam uma queda na área construída da residência e também a queda no tamanho do lote. Próximo ao CBD, o tamanho do lote será menor e, com isso, a densidade populacional aumenta. Na medida em que a estrutura da densidade aumenta, a energia consumida na habitação cai. A energia consumida no deslocamento e o tempo de deslocamento gasto também diminuem. Finalmente, ocorrerá uma redução no consumo total de energia (deslocamento e residência). Esse impacto causado pelo aumento nos custos de deslocamento é condizente com a teoria apresentada por Brueckner (1987), conforme o Capítulo 3, na seção 3.3.1.4.

Um aumento na eficiência do combustível do veículo, em 24 (b), ou seja, economia de combustível decorrente de políticas de eficiência energética, por exemplo, permite que a frota de veículos seja mais eficiente. Isso gera implicações diretas nos custos de deslocamento. Haverá uma redução no consumo de energia de deslocamento. Como resultado, surge um conjunto de impactos sobre a estrutura urbana das cidades. Assim, ocorrerá um aumento na área da cidade, na área da residência e no tamanho do lote. Isso provocará uma diminuição da densidade populacional urbana. Como resultado, haverá um maior consumo de energia nas residências e potencialmente um aumento de segunda ordem no consumo de energia no deslocamento diário.

Figura 24 – Principais relações causais de choques no preço da gasolina, na eficiência do combustível e na renda agrícola



Fonte: Elaboração própria, 2014

O aumento na renda agrícola, apresentado em 24 (c), afeta o preço da terra. Isso produz uma redução do tamanho espacial da cidade. Como resultado, a área da residência e o tamanho do lote caem, aumentando a densidade residencial. O nível de utilidade será inferior já que ocorrerá o aumento no preço por metro quadrado no CBD. O aumento da razão entre estrutura e terra no CBD, ou seja, da altura dos prédios provoca queda no consumo de energia nas residências e também no deslocamento. Assim, o consumo total de energia (residência e deslocamento) diminui. Este choque na renda agrícola é abordado por Brueckner (1987) na análise da seção 3.3.1.4, do capítulo 3.

5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As três simulações servirão 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. Na primeira simulação será introduzido um choque de 10,0% no preço da gasolina. Além dos resultados para as variáveis urbanas, serão analisadas as implicações do uso de energia nas cidades. A segunda simulação refere-se a um aumento de 10,0% na eficiência do combustível de um determinado veículo, decorrente de uma política energética ou de transporte urbano, por exemplo. A terceira simulação mostra os efeitos de um aumento de 10,0% na renda agrícola. A Tabela 5 mostra detalhadamente a simulação *baseline* e os cenários contrafactuais do modelo de simulação urbana. Seguindo a literatura apresentada no Capítulo 3, o presente trabalho destaca os resultados das variáveis urbanas e as variáveis de consumo de energia *per capita*.

Tabela 5 – *Baseline* e cenários contrafactuais

Descrição dos cenários/ Variáveis	[1]				[2]			[3]		
	<i>Baseline</i>	+10% preço da gasolina		+10% economia de combustível			+10% renda agrícola			
Forma urbana		Δ	% Δ	Δ	% Δ	Δ	% Δ	Δ	% Δ	
Número total de residências	201686	201686	0	0%	201686	0	0%	201686	0	0%
Tamanho do lote	0,244	0,241	-0,003	-1,2%	0,248	0,004	1,6%	0,239	-0,005	-2%
Área da residência	1.630,79	1.625,21	-5,58	-0,3%	1.636,08	5,29	0,3%	1.630,21	-0,58	-0,04%
Área da cidade	641,53	612,24	-29,29	-4,6%	671,50	29,97	4,7%	629,90	-11,63	-1,8%
Raio da cidade	14,29	13,96	-0,33	-2,3%	14,62	0,33	2,3%	14,16	-0,13	-0,9%
Razão residencial estrutura/casa (CBD)	0,745	0,784	0,039	5,2%	0,708	-0,037	-5%	0,7455	0,0005	0,1%
Densidade residencial (hab./milha quadrada)	1.566,45	1.641,77	75,32	4,8%	1.496,21	-70,24	-4,5%	1.595,49	29,04	1,9%
Tempo de deslocamento	24,27	23,95	-0,32	-1,3%	24,58	0,31	1,3%	24,24	-0,03	-0,1%
Percentual de casas	81%	77%	-4,0%	-4,9%	84%	3%	3,7%	80%	-1%	-1,2%
Percentual de apartamentos	19%	23%	4,0%	21,0%	16%	-3%	-15,8%	20%	1%	5,3%
Renda/Despesa de contabilidade										
Renda média domiciliar	\$ 24.048,00	\$ 24.120,14	\$ 72,14	0,3%	\$ 23.975,86	\$ -72,14	-0,3%	\$ 24.049,44	\$ 1,44	0,006%
Despesas do numerário	\$ 17.957,72	\$ 17.975,68	\$ 17,96	0,1%	\$ 17.939,76	\$ -17,96	-0,1%	\$ 17.958,80	\$ 1,08	0,006%
Despesas de serviços de alojamento	\$ 4.670,15	\$ 4.684,16	\$ 14,01	0,3%	\$ 4.656,14	\$ -14,01	-0,3%	\$ 4.671,08	\$ 0,93	0,02%
Despesas com habitação	\$ 4.624,58	\$ 4.638,45	\$ 13,87	0,3%	\$ 4.610,71	\$ -13,87	-0,3%	\$ 4.625,50	\$ 0,92	0,02%
Gasto energético residencial	\$ 45,57	\$ 45,21	\$ -0,36	-0,8%	\$ 45,75	\$ 0,18	0,4%	\$ 45,57	\$ 0,0	0,0%
Despesas pendulares com gasolina	\$ 1.331,23	\$ 1.432,40	\$ 101,17	7,6%	\$ 1.235,38	\$ -95,85	-7,2%	\$ 1.328,57	\$ -2,66	-0,2%
Reduções de renda	\$ 88,90	\$ 34,14	\$ -54,76	-61,6%	\$ 140,02	\$ 51,12	57,5%	\$ 90,86	\$ 1,96	2,2%
Consumo de energia per capita (mmBTUs)										
Deslocamento	27,17	26,57	-0,60	-2,2%	25,21	-1,96	-7,2%	27,12	-0,05	-0,20%
Habitação	4,28	4,25	-0,03	-0,8%	4,30	0,02	0,4%	3,61	-0,67	-15,6%
Deslocamento e habitação	31,44	30,78	-0,66	-2,1%	29,21	-2,23	-7,1%	31,38	-0,06	-0,20%
Numerário	71,74	71,86	0,12	0,17%	71,60	-0,14	-0,2%	71,75	0,01	0,02%

Continua

Conclusão

Descrição dos cenários/ Variáveis	Baseline	[1]		[2]			[3]			
		+10% preço da gasolina		+10% economia de combustível		+10% renda agrícola				
Consumo de energia per capita (mmBTUs)			Δ	% Δ		Δ	% Δ		Δ	% Δ
Total	103,18	102,87	-0,31	-0,3%	101,53	-1,65	-1,6%	103,15	-0,03	-0,03%
Contabilidade de bem-estar										
Total de salários (\$m) (-)	\$ 24.048,00	\$ 24.120,14	\$ 72,14	0,3%	\$ 23.975,85	\$ -72,14	-0,3%	\$ 24.049,44	\$ 1,44	0,006%
Aluguel residencial da Terra (\$m) (+)	\$ 456,53	\$ 466,57	\$ 10,04	2,2%	\$ 447,40	\$ -9,13	-2,0%	\$ 457,40	\$ 0,87	0,19%
Aluguel da terra (\$m) (+)	\$ 65,25	\$ 94,61	\$ 29,36	45,0%	\$ 35,37	\$ -29,88	-45,8%	\$ 84,63	\$ 19,38	29,7%

Fonte: Elaboração própria, 2014

Seguindo os três choques apresentados anteriormente, o presente trabalho busca alguns resultados principais de interesse. O primeiro é que o aumento no preço da gasolina não tem efeito direto sobre o uso de energia nas cidades. Mas, tem o efeito indireto na redução do tempo gasto no deslocamento diário da residência para o local de trabalho e também aumento da densidade populacional urbana em resposta aos maiores custos de deslocamento. O segundo resultado de interesse é que o aumento da eficiência do combustível de um determinado veículo tem efeitos diretos e indiretos 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. O terceiro resultado é que o aumento da renda agrícola implica em uma redução espacial da cidade e, portanto, ocorre redução no consumo total de energia (residência e deslocamento) nas cidades. Esses resultados evidenciam o ponto central desta dissertação, seguindo a literatura de Economia Urbana. O transporte e a habitação estão interligados, de modo que um choque exógeno em um afeta o outro. Logo, uma política energética ou de transporte que altere o custo de transporte terá efeito sobre a estrutura da cidade. A seguir, serão discutidos os resultados dos três choques das simulações.

5.3.1 Choque no Preço da Gasolina

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. Como a cidade torna-se compacta, o raio da cidade diminui em 2,3%. A tipologia habitacional mais procurada foi pelos apartamentos, com aumento substancial de 21,0% na quantidade, em detrimento da queda de 4,9% na quantidade de casas. A densidade residencial, ou seja, o número de habitantes por milha quadrada aumenta em 4,8%. Logo, 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.

5.3.2 Choque na Eficiência do Consumo de Combustível

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, dado em milhas por galão, de 10,0% em cada velocidade da função polinomial mostrada na seção 4.4 do capítulo 4.

O aumento da eficiência do combustível reduz a energia *per capita* consumida no deslocamento em 7,2%. Uma frota de veículos mais eficiente gera implicações sobre a estrutura urbana das cidades. 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 e, 3,7%. Isso implica que ambos os preços de habitação e a densidade estrutural caem em lugares próximos ao CBD. 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%.

A expansão da cidade também leva ao aumento do tempo de deslocamento em 1,3%. O uso da energia no deslocamento diário diminui em 7,2%. Logo, a maior eficiência de combustível tem o efeito indireto de aumentar o tamanho da cidade e do espaço interior da habitação, ou seja, da área da residência. Isso ocorre uma vez que aumenta o número de casas em

detrimento do número de apartamentos. A queda total no consumo *per capita* de energia é de 1,6%, sendo considerada pequena em comparação a um aumento de 10,0% na eficiência do combustível. Gaigne, Riou e Thisse (2012) mostraram que nas cidades maiores as famílias consomem mais energia do que nas cidades menores.

A relação entre política energética e o uso de energia nas cidades é obtido por meio da comparação entre os cenários 5.3.1 e 5.3.2. 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.

5.3.3 Choque na Renda Agrícola

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%. Neste caso, como aponta 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%. Como resultado, a área da residência declina 0,04% e o tamanho do lote caem 2,0%. Logo, a densidade residencial aumenta 1,9%. Ocorrerá ainda o aumento no preço por acre no CBD e a redução no nível de utilidade, o que está de acordo com a literatura apresentada no Capítulo 3. Como esperado, 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.

O aumento da densidade estrutural (prédios mais altos), por sua vez, provoca uma queda de 15,6% no consumo doméstico de energia. O tempo de deslocamento diminui 0,1% com uma cidade mais compacta e o consumo de energia *per capita* gasto no deslocamento declina 0,20%. Nesse sentido, a elevação na renda agrícola provocou redução no consumo total de

energia nas cidades. Este choque na renda agrícola é abordado por Brueckner (1987) na análise da seção 3.3.1.4.

Portanto, pode-se concluir, de acordo com a literatura de cidade monocêntrica, que as cidades ocupam um papel importante nos padrões de eficiência energética no contexto das políticas de transporte e mobilidade urbana. A simulação de diversos cenários de política permite que se entendam as diferenças no uso de energia entre as cidades. Desse modo os resultados da pesquisa poderão ser utilizados de forma efetiva na avaliação das políticas de desenvolvimento urbano e de energia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta dissertação 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). O modelo proposto fornece uma conexão entre as áreas de Economia Urbana e a de Economia de Energia, através da integração entre a modelagem de simulação urbana com equações de consumo de energia nas residências e nos deslocamentos intra-urbanos.

A estruturação do problema de pesquisa baseou-se na análise do 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. Foram identificados alguns elementos centrais dessa análise. Esses elementos foram: o crescimento das cidades através da taxa de urbanização, a aumento da frota circulante de veículos e o seu padrão ineficiente de uso, a expansão do consumo de combustível e de energia elétrica, a possibilidade de esgotamento dos recursos energéticos e os impactos negativos para o meio ambiente, como a poluição atmosférica. A conclusão dessa análise foi que as características do processo de desenvolvimento urbano no Brasil podem ter influência sobre a eficiência do consumo de energia nas cidades. Isso porque os estudos empíricos mostram que as cidades mais compactas e com maior densidade populacional urbana tendem a consumir menos energia *per capita*, devido à menor dependência dos automóveis. Por outro lado, as cidades mais espalhadas, e com menor densidade populacional urbana, possuem um maior consumo *per capita* de energia no setor de transportes. Isso ocorre porque uma população espalhada vive em lugares periféricos longe do centro de empregos (centro comercial e empresarial).

O referencial teórico foi baseado no modelo padrão de Economia Urbana, de cidades monocêntricas, descrito por Alonso (1964), Mills (1967) e Muth (1969). O modelo básico de Economia Urbana trabalha com a ideia de um *trade-off* entre acessibilidade aos centros de emprego e a escolha de residência pelas famílias. Desse modo, foi apresentada revisão sobre a

introdução do espaço na teoria econômica, bem como os modelos de cidades policêntricas. Esses modelos se aproximam mais da realidade das grandes cidades, além de incorporarem elementos teóricos das economias de aglomeração proveniente da NGE. A base para a formalização do modelo numérico de simulação urbana, como o proposto no presente trabalho, foi introduzida por Muth (1975). Esses modelos têm sido utilizados para projetar efeitos do uso do solo e das políticas de transportes em padrões espaciais de habitação em áreas urbanas. A análise desses elementos e a evidência de que a literatura sobre os modelos numéricos de simulação urbana aplicados à economia brasileira é limitada, motivou o desafio de construir um modelo semelhante ao desenvolvido por Larson e outros (2012). 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. Esse problema foi parcialmente contornado com a obtenção de parâmetros da literatura internacional e pela imposição de alguns critérios. Essa estratégia não comprometeu a obtenção de resultados condizentes com a literatura de Economia Urbana.

Os resultados da cidade representativa simulada foram compatíveis com as evidências da literatura. 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. Além disso, o consumo de energia gasto nos deslocamentos pendulares aumenta na medida em que aumenta a distância em relação ao centro de negócios.

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. Com este efeito, 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 e outros (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. Cabe ressaltar que 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.

Além das considerações sobre os resultados, a pesquisa sugere algumas possibilidades de estudos futuros. Recomendam-se 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. Uma outra extensão possível seria trabalhar com a modelagem de cidades policêntricas, para avaliar as mesmas políticas nas áreas urbanas maiores e mais densas.

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.

ARNOTT, R. What planners need to know about the “new urban economics”. In: BROOKS, N. ; DONAGHY, K. ; KNAAP, J. Y. **The Oxford handbook of urban economics and planning**. Oxford: Oxford University Press, 2012. p. 51-78.

BALDWIN, R. ; VENABLES, A. Regional economic integration. In: GROSSMANN, G. ; ROGOFF, K. (Orgs.). **Handbook of international economics**. Amsterdã: Elsevier, 1995. v. 3.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

_____. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

_____. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

_____. Rio de Janeiro: EPE, 2009.

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.

BIDERMAN, C. **Forças de aglomeração e expulsão na grande São Paulo**. 2001. Tese (Doutorado em Economia de Empresas) – Escola de Administração de Empresas, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2001.

BRASIL. Decreto 76.593 de 14 de novembro de 1975. Programa nacional do álcool. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1975.

_____. Lei 9.503 de 23 de setembro de 1997. Código brasileiro de trânsito. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 1997.

_____. Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001. Lei de eficiência energética. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2001.

_____. Lei 10.438 de 26 de abril de 2002. Programa de incentivo as fontes alternativas de energia elétrica. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2002.

_____. Lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005. Programa nacional de produção e uso do biodiesel. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2005.

_____. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2013.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Programas**. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 5 mar. 2014.

_____. Portaria 163 de 8 de junho de 2009. Programa brasileiro de etiquetagem para edifícios do PROCEL. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2009.

_____. Portaria 391 de 4 de novembro de 2008. Programa brasileiro de etiquetagem veicular para veículos leves. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2008.

_____. Portaria 594 de 19 de outubro de 2011. Plano nacional de eficiência energética. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 2011.

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.

_____. Urban sprawl: diagnosis and remedies. **International Regional Science Review**, v. 23, n. 2, p. 160-171, 2000.

CHRISTALLER, W. **Central places in southern Germany**. Tradução Baskim C. W. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1966. Tradução de : Die zentralen Orte in Süddeutschland: eine ökonomischgeographische untersuchung über die gesetzmässigkeit der verbreitung und entwicklung der siedlungen mit stadischen funktiionen.

CÔRTEZ, M. V. R. **Localização residencial e demanda por recreação: um modelo para cidades litorâneas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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.

DANTAS, R. A. **Modelos espaciais aplicados ao mercado habitacional: um estudo de caso para a cidade de Recife**. 2003. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO - DENATRAN. **Estatística, frota 2013**. Disponível em: <www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acesso em: 12 mar. 2014.

DIXIT, A. ; STIGLITZ, J. Monopolistic competition and optimum product diversity. **American Economic Review**, v. 67, p. 297-308, 1977.

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.

_____. **Plano nacional de energia 2030**. Brasília, 2007.

FERREIRA, C. M. C. Espaço, regiões e economia regional. In: HADDAD, P. R. (Org.). **Economia regional: teorias e métodos de análise**. Fortaleza: BNB, 1989a.

_____. As teorias da localização e a organização espacial da economia. In: HADDAD, P. R. (Org.). **Economia regional: teorias e métodos de análise**. Fortaleza: BNB, 1989b.

FERREIRA, M. F. S. ; LEMOS, M. B. Localização industrial e fatos estilizados da nova reconfiguração espacial do nordeste. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 31, n. especial, p. 484-507, 2000.

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

FUJITA, M. ; OGAWA, H. Multiple equilibria and structural transition of non-monocentric urban configurations. **Regional Science and Urban Economics**, v. 12, n. 2, p. 161-196, 1982.

FUJITA, M. *et al.* **The spatial economy: cities, regions and international trade**. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology - MIT, 1999.

_____. **Economia espacial. Urbanização, prosperidade econômica e desenvolvimento humano no mundo**. São Paulo: Futura, 2002.

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.

_____. The greenness of cities: carbon dioxide emissions and urban development. **Journal of Urban Economics**, v. 67, n. 3, p. 404-418, 2010.

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.

INMETRO. **Programa brasileiro de etiquetagem**. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php>. Acesso em: 8 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.

ISARD, W. **Location and space economy: a general theory relation to industrial location, market areas, land use trade and urban structure**. Cambridge: MIT Press, 1956.

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.

KRUGMAN, P. Increasing returns and economic geography. **Journal of Political Economy**, v. 99, n. 3, p. 483-99, 1991.

KRUGMAN, P. ; FUJITA, M. The new economic geography: Past, present and the future. **Journal of Regional Science**, v.83, p. 139-164, 2004.

KRUGMAN, P. ; VENABLES, A. J. Globalization and the inequality of nations. **Quarterly Journal of Economics**, v. 110, p. 857-880, 1995.

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.

LÖSCH, A. **The economics of location**. New Haven: Yale University Press, 1954. Tradução de: Die räumliche Ordnung der Wirtschaft.

MARTINS, N. S. F. **Dinâmica urbana e perspectivas de crescimento – Itabira/Minas Gerais**. 2003. Dissertação (Mestrado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

MCCANN, P. **Urban and regional economics**. Oxford: Oxford University Press, 2001. 286 p.

_____. **Modern urban and regional economics**. Oxford: Oxford University Press, 2013, 408 p.

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.

MONASTERIO, L. ; CAVALCANTE, L. R. Fundamentos do pensamento econômico regional. In: CRUZ, Bruno de Oliveira *et al.* (Orgs.). **Economia regional e urbana**: teorias e métodos com ênfase no Brasil. Brasília: IPEA, 2011. 406p.

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.

NADALIN, V. G. Economia urbana e mercado de habitação. In: CRUZ, Bruno de Oliveira *et al.* (Orgs.). **Economia regional e urbana**: teorias e métodos com ênfase no Brasil. Brasília: IPEA, 2011. 406p.

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.

PIMENTEL, F. **O fim da era do petróleo e a mudança do paradigma energético mundial: perspectivas e desafios para a atuação diplomática brasileira**. Brasília: Fundação Alexandre de Gusmão, 2011.

PLANO NACIONAL DE LOGÍSTICA E TRANSPORTES - PNLT. **Relatório final**. Brasília: Ministério dos Transportes, 2012.

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.

SAMUELSON, P. A. Spatial price equilibrium and linear programming. **American Economic Review**, v. 42, p. 283-303, 1952.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE REPARAÇÃO DE VEÍCULOS E ACESSÓRIOS DE SÃO PAULO – SINDIREPA-SP. **A quilometragem média estimada da frota brasileira de veículos**. Disponível em: <http://www.sindirepa-sp.org.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=90:a-quilometragem-media-estimada-da-frota-brasileira-de-veiculos&catid=40:noticias-consumidor&Itemid=323>. Acesso em: 6 ago. 2014.

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.

THISSE, J. Geografia econômica. In: CRUZ, Bruno de Oliveira *et al.* (Orgs.). **Economia regional e urbana: teorias e métodos com ênfase no Brasil**. Brasília: IPEA, 2011. 406p.

VARIAN, Hal R. **Microeconomic Analysis**, 3. ed. New York: W. W. Norton e Company, 1992. 506 p.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte urbano, espaço e equidade**: análise das políticas públicas. São Paulo: Annablume, 2001.

VASCONCELLOS, E. A. ; MENDONÇA, A. Política nacional de transporte público no Brasil: organização e implantação de corredores de ônibus. **Revista dos Transportes Públicos**, São Paulo, v. 33, p. 73-95, 2010.

VILLAÇA, F. São Paulo: segregação urbana e desigualdade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 25, n. 71, p. 37-58, 2011.

VON THÜNEN, J. H. **The isolated state**. Tradutor do inglês WANTENBERG, C. M. Oxford: Pergammon Press, 1966. Tradução de: Der isolierte staat in beziehung auf landwirtschaft und nationalökonomie. Hamburg: Perthes, 1826.

WEBER, A. **Theory of location of industries**. 2. Ed. Chicago: University of Chicago Press, 1957. Tradução de: Über den standort der industrien. 1909.

WEST, B. H. ; MCGILL, R. N. ; SLUDER, S. **Development and validation of light-duty vehicle modal emissions and fuel consumption values for traffic models**. Local do editor: Technical report, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 1999.

WHEATON, W. C. A comparative static analysis of urban spatial structure. **Journal of Economic Theory**, v. 9, n. 2, p. 223-237, 1974.

WOODCOCK, J. *et al.* Energy and transport. **Energy and Health**, v. 3, p. 1078-1088, 2007.

WORLD BANK. **Datas**. Disponível em: <<http://data.worldbank.org/topic/urban-development>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

ZENOU, Y. **Urban labor economics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Parâmetros a serem utilizados na calibragem do modelo

(A.1) Parâmetros da Função Utilidade

O parâmetro do tamanho do lote, β_2 , foi calibrado usando a equação $\beta_2 = r \left[\frac{h}{1-T-rh} \right]^{1-\eta}$ descrita na seção 4.2. Foram usadas as seguintes variáveis: tamanho do lote, custo de tempo de deslocamento (fração do salário) e o aluguel por unidade de terra. A partir de β_2, β_1 e da restrição orçamentária das famílias, $I = y + rh + T$, calibra-se a utilidade, dada por $U = [\beta_1 y^\eta + \beta_2 h^\eta]^{1/\eta}$. A Tabela A.1 apresenta os dados utilizados no processo de calibragem para o ano de 2010.

Tabela A.1 – Dados para a calibragem dos parâmetros da função utilidade, 2010*

Símbolo	Descrição	Parâmetro
β_1	Parâmetro do bem composto	1
$1/(1-\eta)$	Elasticidade	0.75
h	Tamanho do lote**	6098.4
I	Renda domiciliar	19506
y	Consumo do bem composto	12896.16

Fonte: Elaboração própria, 2014

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

**O tamanho do lote foi transformado na unidade americana pé quadrado (1acre = 43.560ft²).

(A.2) Parâmetros da Função de Produção de Habitação

Os parâmetros da função de produção de habitação (α_1, α_2) são computados por meio das

seguintes equações, $\alpha_1 = \frac{H^\rho}{\left(\frac{L}{S}\right)^{1-\rho} \frac{P_l}{P_s} L^\rho + S^\rho}$ e $\alpha_2 = \alpha_1 \left(\frac{L}{S}\right)^{1-\rho} \frac{P_l}{P_s}$, e descritos no Capítulo 4.

A partir destes parâmetros e da equação de função de produção de habitação, $H = A[\alpha_1 S^\rho + \alpha_2 L^\rho]^{1/\rho}$, calibra-se o parâmetro da tecnologia. Entretanto, para esta dissertação os parâmetros foram obtidos por meio da literatura.

(A.3) Parâmetros de Emprego

No modelo básico de Economia Urbana, discutido no capítulo 3, as cidades possuem uma região central que proporciona empregos, chamada de CBD. Entretanto, conforme destaca Larson e outros (2012) e Larson e Yezer (2014) o emprego total é dividido entre o CBD e o local fora do centro de negócios, o que fornece padrões mais realistas em áreas urbanas. Sendo assim, o parâmetro que capta o percentual de trabalhadores que se deslocam diariamente para o CBD (*commuters*) foi obtido a partir do número de trabalhadores, ocupados na semana de referência, com trabalho fora da residência que retornam diariamente do trabalho para a residência, por faixa de tempo de deslocamento casa-trabalho (TABELA C.1 do APÊNDICE C). Conforme o IBGE (2010), o número de trabalhadores é dividido pela seguinte faixa de tempo de deslocamento: (1) Até cinco minutos, (2) De seis minutos até meia hora, (3) Mais de meia hora até uma hora, (4) Mais de uma hora até duas horas, (5) Mais de duas horas e (6) Total.

Nesta dissertação, adotou-se que os trabalhadores que gastam até cinco minutos e 50,0% dos que gastam de seis minutos até meia hora, são os trabalhadores chamados de *walkers*. Estes podem ir caminhando para seu local de trabalho. Os 50,0% restantes dos trabalhadores que gastam de seis minutos até meia hora, somado aos trabalhadores que gastam mais de meia hora, para se deslocarem diariamente da residência para o local de trabalho, são os chamados *commuters*. Adotou-se, portanto, que os *commuters* são aqueles trabalhadores que deslocam para o CBD e, os *walkers* são aqueles que trabalham fora do CBD, como critério para poder captar o percentual de trabalhadores que se deslocam diariamente para o CBD. Este critério foi tomado pela ausência de pesquisas que apontam quantos indivíduos trabalham de fato no centro de empregos e quantos trabalham fora da localidade central, nas cidades de referência. Como é um parâmetro (percentual de trabalhadores que se deslocam diariamente para o CBD) de difícil obtenção, o melhor critério adotado foi o acima referido. Entretanto, é sabido que trabalhadores que vivem próximos à localidade central (concentra a maior parte dos empregos) também podem ir caminhando para seus locais de trabalho. A Tabela A.3 apresenta o percentual de trabalhadores locais fora do centro de negócios e dos que se deslocam diariamente para o CBD, e também a população ocupada na semana de referência, usados no processo de calibragem dos parâmetros de emprego.

Tabela A.3 – Percentual de *walkers* e *commuters*, e população ocupada na semana de referência, 2010

	<i>Walkers</i>	<i>Commuters</i>	Total (<i>walkers</i> + <i>commuters</i>)	População ocupada na semana de referência*
Belém	142.568	27.387	230.539,40	595.399
Feira de Santana	65.501,5	98.177,5		261.614
Cuiabá	69.382,5	131.089,5		246.706
Juiz de Fora	62.918,5	123.443,5		261.930
Londrina	71.380	109.848		282.228
Média (5 cidades)	82.350,10	148.189,10		329.575,4
Percentual	36,0%	64,0%		

Fonte: Elaboração própria, 2014, com base no IBGE, 2010

Nota: *A população ocupada na semana de referência pode ser obtida pela Tabela 2031- Sidra - IBGE.

Conforme Larson e outros (2012); Larson e Yezer (2014), o raio médio do CBD, k_{CBD} , é calibrado para 1, e a densidade de empregos no centro de negócios é calibrada a partir da

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

(A.4) Parâmetros da Velocidade de Deslocamento

O Código Brasileiro de Trânsito³⁴ (CBT), no artigo 60, estabelece os tipos de vias e as normas vigentes sobre os limites de velocidade de veículos. Usualmente, as vias são divididas em urbanas e rurais. As vias urbanas são classificadas em quatro subgrupos com os seguintes limites de velocidade:

- Via de trânsito rápido – 80 km/h
- Via arterial – 60 km/h
- Via coletora – 40 km/h
- Via local – 30 km/h

Com base no CBT, a velocidade máxima adotada é de 60 km/h (37 milhas por hora em unidades americanas), pois considera avenidas com semáforos e grande fluxo de trânsito. A velocidade mínima adotada será de 10 km/h (6.2 milhas por hora em unidades americanas), considerando a relação entre a velocidade máxima e mínima sugerida pela literatura.

³⁴ Lei 9.503/1997.

O tempo de deslocamento para os trabalhadores locais, também chamados de *walkers*, foi obtido a partir de uma média ponderada do número de trabalhadores, ocupados na semana de referência, com trabalho fora da residência, por faixa de tempo de percurso diário da residência para o local de trabalho. Este parâmetro capta o tempo de percurso diário para aqueles trabalhadores que vão caminhando e/ou de bicicleta para o local de emprego. Conforme o IBGE (2010), o tempo habitual de deslocamento é dividido, como mostrado anteriormente, em: (1) Até cinco minutos, (2) De seis minutos até meia hora, (3) Mais de meia hora até uma hora, (4) Mais de uma hora até duas horas, (5) Mais de duas horas, de acordo com Tabela C.1 do Apêndice C. Entretanto, as duas primeiras respostas foram adotadas para o cálculo do tempo de deslocamento dos *walkers*.

(A.5) Parâmetros do Custo de Deslocamento

➤ Custo fixo anual de possuir um automóvel (m_0)

No setor de transportes, os custos podem ser distribuídos entre variáveis e fixos. Os custos variáveis dependem da utilização dos veículos, ou seja, do quilômetro rodado por estes. Dentre eles, destacam-se: combustível, óleo, manutenção, reparos e reposição de peças, lonas de freio e troca de pneus. Por outro lado, os custos fixos são independentes da quilometragem rodada no período. Dentre estes, destacam-se: depreciação do veículo, seguro, tributos fiscais (licenciamento, DPVAT e IPVA) e custo de oportunidade.

Nesta dissertação, foi calculado o custo fixo para o ano de 2010 para veículo popular Volkswagen Gol (Modelo Gol City Trend 1.0 Mi Total Flex 8V 2P, 2010 Gasolina). Foi usado para o estudo o preço médio desse veículo conforme a Tabela da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE). A taxa de depreciação usada é de 20,0% sobre o preço médio, conforme a Receita Federal. O seguro é de 5,0% sobre o preço médio de acordo com o Instituto de Estudos Financeiros (IEF). Em relação aos tributos fiscais, o licenciamento anual de veículos automotores foi de R\$ 43,00, publicado no Diário Oficial do Distrito Federal, nº 247, 23 de dezembro de 2009; o DPVAT, seguro de danos pessoais causados por veículos automotores de via terrestre, foi R\$ 93,47 conforme dados da Seguradora Líder; o IPVA, imposto estadual sobre a propriedade de veículos automotores, sendo um percentual sobre o preço do veículo, foi em média de 3,0% de acordo com as secretarias da Fazenda por Estado.

Destaca-se que as alíquotas do IPVA são entre 1,0% e 6,0% sobre o preço médio, e para este trabalho, adotou-se a média de todos os Estados. O custo de oportunidade, valor investido no veículo que poderia ser acumulado em uma aplicação financeira, foi de 6,9% sobre o preço médio. Este valor corresponde ao acumulado da poupança para o ano de referência, segundo os rendimentos da caderneta de poupança do Banco Central. A Tabela A.5.1 mostra os itens do custo fixo anual de possuir um automóvel, com a descrição de cada item, os valores e respectivas fontes, para o ano-base 2010. A Tabela A.5.2 apresenta os custos fixos para o veículo, no ano de 2010.

Tabela A.5.1 – Dados para o cálculo do Custo fixo anual de possuir um automóvel, 2010*

Itens do Custo Fixo	Descrição	Valores	Fonte
Taxa de depreciação	Taxa resultante do desgaste de uso	20,0%	Receita Federal
Seguro	Proteção contra roubos e acidentes	5,0%	IEF
Impostos	Licenciamento Imposto anual obrigatório (mostra que o veículo está de acordo com as normas de segurança)	R\$ 43,00	Diário Oficial do Distrito Federal
		R\$ 93,87	Seguradora Líder
		3,0%	Secretaria da Fazenda
	DPVAT		
	IPVA		
Custo de oportunidade	Valor investido que poderia ser acumulado em uma aplicação financeira (acumulado da poupança)	6,9%	Banco Central

Fonte: Elaboração própria, 2014

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

Tabela A.5.2 – Custos fixos, 2010

Custos fixos/Modelo	Volkswagen Gol	
Preço médio (Tabela FIPE)*	23.109,00	
Depreciação (20,0%)	4.621,80	
Seguro (5,0%)	1.155,45	
Impostos	Licenciamento DPVAT IPVA	43,00
		93,87
		693,27
Custo de oportunidade (6,9%)	1.594,52	
Total dos custos fixos	R\$ 8.201,91 (=US\$ 4824.65)	

Fonte: Elaboração própria, 2014

Nota: *O preço da frota selecionada é uma média ponderada entre os meses do ano de 2010.

➤ Custo anual da depreciação de um automóvel por milha rodada (m_1)

O custo anual da depreciação por quilômetro rodado para o veículo popular selecionado, Volkswagen Gol, em 2010, foi calculado com base no preço médio (média ponderada entre os meses de 2010) desse veículo conforme a Tabela FIPE, na taxa de depreciação de 20,0% e

prazo de vida útil de cinco anos segundo a Receita Federal e na quilometragem média estimada da frota brasileira de veículos de 1.800 km/mês, isto é 21.600 km/ano, de acordo com o Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios de São Paulo (SINDIREPA-SP, 2014). A Tabela A.5.3 mostra os custos anuais da depreciação por quilômetro rodado para o Gol, em 2010.

Tabela A.5.3 – Custos anuais da depreciação por quilômetro rodado, 2010

	Volkswagen Gol
Preço médio (Tabela FIPE)*	23.109,00
Quilometragem média anual (km/ano)	21.600
Custo anual de depreciação por Km rodado	0.144
Total	R\$/km 0.144 (=US\$/milha 0.137)

Fonte: Elaboração própria, 2014

Nota: *O preço da frota selecionada é uma média ponderada entre os meses do ano de 2010.

➤ Custo de tempo de deslocamento (fração do salário) (τ)

Conforme IPEA (2012), cerca de 15,0% do orçamento médio familiar brasileiro é destinado ao transporte urbano. Entretanto, para esta dissertação, o parâmetro da literatura internacional foi melhor ajustado no processo de calibragem do modelo. Logo, foi usado como custo de tempo e deslocamento o valor de 50,0%.

(A.6) Parâmetros do Uso da Terra

➤ Preço de reserva da terra agrícola (dólares/acre) (p_L^a)

Como não existem no Brasil estudos sobre o preço de reserva da terra agrícola, foi necessário usar uma aproximação da literatura. Segundo Gasques e Bastos (2006), o preço médio de lavouras no Brasil, em 2006, correspondeu a 41,8% do preço médio da terra nos Estados Unidos. O preço de reserva da terra agrícola dos Estados Unidos foi de 500 dólares por acre, conforme Bertaud e Brueckner (2005). Assim, foi utilizado para este estudo o percentual de 41,8% sobre o preço de reserva da terra agrícola americana. Isso gera um preço de reserva da terra agrícola para o Brasil de 209 dólares por acre.

➤ Percentual de terra usado para habitação (θ)

Para encontrar a proporção do solo em todo o Brasil destinada à habitação, seria possível estimar a área urbanizada e inferir qual a parcela seria ocupada por edificações, sistema viário, áreas verdes, dentre outros. No entanto, para dizer o quanto da área edificada seria destinada a habitação, precisaria de algum conhecimento de campo. Tomando como base a Lei 6.766/1979 sobre o parcelamento do solo e supondo que a maior parte da área urbanizada no Brasil siga esta lei, tem-se um mínimo de 35,0% de áreas públicas (sistema viário, áreas verdes e institucionais). Os 65,0% restantes seriam de uso privado, sendo provavelmente a maior parte disso correspondente ao uso habitacional. Como não foi possível a obtenção deste parâmetro deste modo, optou-se por estimar a área urbana das cinco cidades do estudo e de posse das áreas de terrenos das cidades, fornecidas pelas prefeituras municipais, calculou-se a fração de terra usada para habitação. A falta de dados da variável área urbana foi resolvida por uma projeção no *software* ArcGIS, versão 12.0, tomando o *shapefile* das cidades por setor censitário dada a característica de cada setor (urbano ou rural) conforme a base de informações por setor do IBGE (2010). Assim, a área urbana projetada das cinco cidades foi de 285.955.501,4 m² e a área dos terrenos habitacionais, fornecida pelas prefeituras, foi de 146.153.038,5 m². Portanto, 51,11% da proporção do solo é destinada a habitação.

(A.7) Parâmetros do Consumo Energético Doméstico

Os parâmetros do consumo energético doméstico foram obtidos diretamente da literatura. Entretanto, estes podem ser estimados pela equação (55) dada na seção 4.3 do capítulo 4.

(A.8) Parâmetros do Consumo Energético dos Veículos

A partir da equação (A.8.1) estimada por Larson e Yezer (2014) para os Estados Unidos, foi feito um ajuste para a velocidade máxima permitida em áreas urbanas e para o consumo máximo de combustível no Brasil.

$$\text{Milhas por galão} = 0.822 + 1.833v - 0.0486v^2 + 0.000651v^3 - 0.00000372v^4 \quad (\text{A.8.1})$$

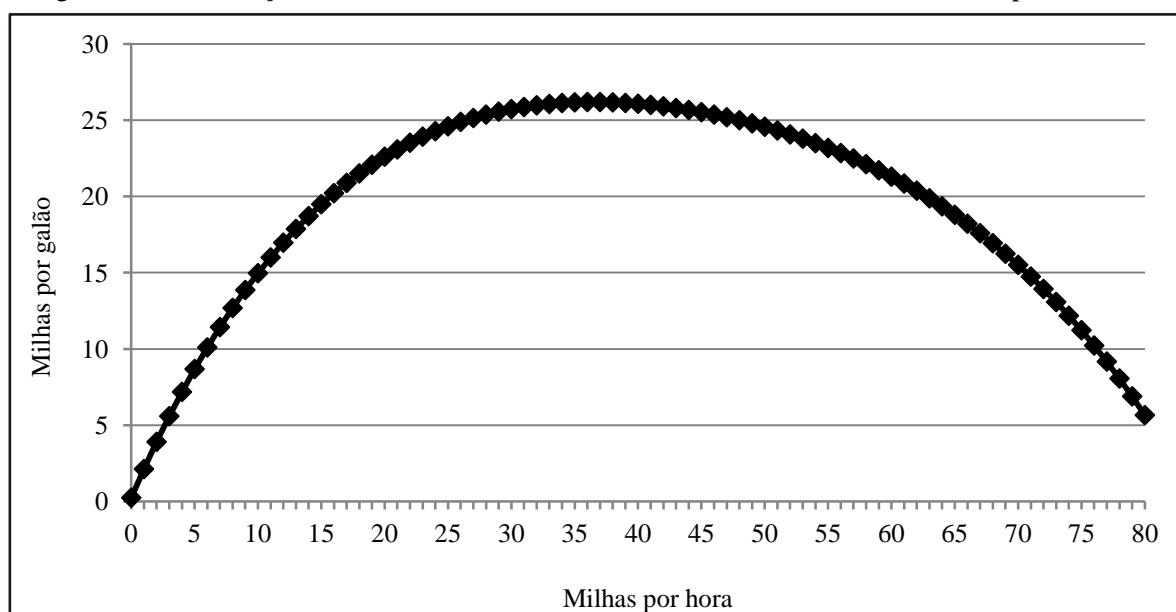
Como mencionado, a velocidade pendular máxima é de 60 Km/h, ou seja 37 milhas por hora, conforme o Código Brasileiro de Trânsito. O consumo máximo de combustível foi obtido

apartir de uma média referente a frota de veículos, das tabelas de consumo e eficiência energética de veículos automotores leves, do INMETRO, para o ano de 2010. A média encontrada de eficiência de combustível, para o ciclo urbano e consumo de gasolina, foi de 11.13 km/l, o que corresponde a 26.18 milhas por galão em unidades americanas. A Figura A.8.1 mostra a relação entre a eficiência do combustível, em milhas por galão, e a velocidade desenvolvida por certo veículo, em milhas por hora, em um determinado percurso, para o Brasil. Portanto, a equação ajustada do consumo energético dos veículos para o Brasil é dada por:

$$\text{Milhas por galão} = 0.23025849 + 1.933225v - 0.0520949v^2 + 0.0006357v^3 - 0.00000345v^4$$

(A.8.2)

Figura A.8.1 – Relação entre a eficiência do combustível e a velocidade do veículo para o Brasil



Fonte: Elaboração própria, 2014

APÊNDICE B – Escolha das cinco cidades brasileiras

A escolha do grupo de cidades brasileiras foi baseada em critérios como: a diversificação geográfica, o tamanho semelhante da população e o indicador PIB *per capita*. Outros indicadores econômico-sociais também são apresentados para mostrar as características semelhantes das cidades escolhidas. O Quadro B.1 apresenta a descrição das variáveis e a Tabela B.1 mostra as características geográficas e os indicadores das cidades brasileiras para o ano de 2010. Deve-se enfatizar que as cidades selecionadas abaixo seguem a ordem classificatória da população total maior para a menor, ou seja, de 11 milhões a 300 mil habitantes.

Quadro B.1 – Descrição das variáveis

Representação	Variável	Descrição	Fonte
<i>Pop</i>	População total	População residente total	IBGE
<i>Pop urb</i>	População urbana	População residente na área urbana	IBGE
<i>Pop rur</i>	População rural	População residente na área rural	IBGE
<i>PIB</i>	PIB <i>per capita</i>	Produto Interno Bruto <i>per capita</i> (R\$)	IBGE
<i>Ar tot</i>	Área total	Área da unidade territorial (Km^2)	IBGE
<i>Den</i>	Densidade demográfica	Densidade demográfica (hab/km^2)	IBGE
<i>IDHM ed</i>	Índice da dimensão educação	Índice da dimensão educação que é um dos três componentes do IDHM	PNUD
<i>IDHM lo</i>	Índice da dimensão longevidade	Índice da dimensão longevidade que é um dos três componentes do IDHM	PNUD
<i>Esp</i>	Esperança de vida ao nascer	Número médio que as pessoas deverão viver a partir do nascimento	PNUD
<i>IDHM re</i>	Índice da dimensão renda	Índice da dimensão renda que é um dos três componentes do IDHM	PNUD
<i>Ren</i>	Renda <i>per capita</i>	Razão entre o somatório da renda dos indivíduos residentes e o número total desses	PNUD
<i>IDHM</i>	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal	Média geométrica dos índices das dimensões renda, educação e longevidade, com pesos iguais	PNUD
<i>Ig</i>	Índice de Gini	Desigualdade na distribuição de renda da população	PNUD

Fonte: Elaboração própria, 2014

Tabela B.1 – Características geográficas e indicadores das cidades brasileiras, 2010*

Cidades	Pop	Pop urb	Pop rur	PIB	Ar tot	Den	IDHM ed	IDHM lo	Esp	IDHM re	Ren	IDHM	Ig
Região Norte													
Manaus (AM)	1.802.014	1.792.881	9.133	26.961,15	11.401,09	158,1	0.658	0.826	74.54	0.738	790,27	0.737	0.61
Belém (PA)	1.393.399	1.381.475	11.924	12.921,64	1.059,41	1.315,3	0.673	0.822	74.33	0.751	853,82	0.746	0.61
Ananindeua (PA)	471.980	470.819	1.161	7.779,11	190,50	2.477,6	0.658	0.821	74.24	0.684	564,76	0.718	0.52
Porto Velho (RO)	428.527	390.733	37.794	17.636,36	34.096,39	12,6	0.638	0.819	74.14	0.764	929,19	0.736	0.56
Macapá (AP)	398.204	381.214	16.990	13.106,21	6.408,55	62,1	0.663	0.820	74.19	0.723	717,88	0.733	0.59
Rio Branco (AC)	336.038	308.545	27.493	12.838,52	8.835,54	38,0	0.661	0.798	72.85	0.729	744,67	0.727	0.59
Região Nordeste													
Salvador (BA)	2.675.656	2.674.923	733	13.728,08	693,28	3.859,4	0.679	0.835	75.10	0.772	973,00	0.759	0.63
Fortaleza (CE)	2.452.185	2.452.185	0	15.161,47	314,93	7.786,4	0.695	0.824	74.41	0.749	846,36	0.754	0.61
Recife (PE)	1.537.704	1.537.704	0	19.540,2	218,44	7.039,6	0.698	0.825	74.50	0.798	1.144,26	0.772	0.68
São Luís (MA)	1.014.837	958.522	56.315	17.703,61	834,79	1.215,7	0.752	0.813	73.76	0.741	805,36	0.768	0.61
Maceió (AL)	932.748	932.129	619	12.989,48	503,07	1.854,1	0.635	0.799	72.94	0.739	792,54	0.721	0.63
Teresina (PI)	814.230	767.557	46.673	12.940,66	1.391,98	584,9	0.707	0.820	74.22	0.731	757,57	0.751	0.61
Natal (RN)	803.739	803.739	0	14.925,65	167,26	4.805,2	0.694	0.835	75.08	0.768	950,34	0.763	0.61
João Pessoa (PB)	723.515	720.785	2.730	13.552,73	211,48	3.421,3	0.693	0.832	74.89	0.770	964,82	0.763	0.62
Jaboatão dos Guararapes (PE)	644.620	630.595	14.025	12.966,6	258,69	2.491,8	0.642	0.830	74.82	0.692	593,90	0.717	0.58
Aracaju (SE)	571.149	571.149	0	15.328,3	181,86	3.140,7	0.708	0.823	74.36	0.784	1.052,03	0.770	0.62
Feira de Santana (BA)	556.642	510.635	46.007	13.350,8	1.337,99	416,0	0.619	0.820	74.89	0.710	662,24	0.712	0.60
Campina Grande (PB)	385.213	367.209	18.004	11.256,41	594,18	648,3	0.654	0.812	73.73	0.702	630,03	0.720	0.58
Olinda (PE)	377.779	370.332	7.447	8.275,69	41,68	9.063,6	0.657	0.836	75.16	0.704	640,13	0.735	0.55
Caucaia (CE)	325.441	290.220	35.221	7.998,82	1.228,51	264,9	0.632	0.808	73.48	0.620	379,63	0.682	0.48
Caruaru (PE)	314.912	279.589	35.323	9.536,83	920,61	342,1	0.569	0.799	72.96	0.681	553,99	0.677	0.53
Vitória da Conquista (BA)	306.866	274.739	32.127	11.323,35	3.356,89	91,4	0.581	0.788	72.30	0.681	555,66	0.678	0.55
Paulista (PE)	300.466	300.466	0	7.084,49	97,31	3.087,7	0.703	0.830	74.77	0.673	528,04	0.732	0.49
Região Centro-Oeste													
Brasília (DF)	2.570.160	2.482.210	87.950	58.489,46	5.780,00	444,7	0.742	0.873	77.35	0.863	1.715,11	0.824	0.63
Goiânia (GO)	1.302.001	1.297.076	4.925	18.777,09	732,80	1.776,7	0.739	0.838	75.28	0.824	1.348,55	0.799	0.58
Campo Grande (MS)	786.797	776.242	10.555	17.625,73	8.092,95	97,2	0.724	0.844	75.62	0.790	1.089,37	0.784	0.56
Cuiabá (MT)	551.098	540.814	10.284	20.044,67	3.495,42	157,7	0.726	0.834	75.01	0.800	1.161,49	0.785	0.59
Aparecida de Goiânia (GO)	455.657	455.193	464	11.297,44	288,34	1.580,3	0.620	0.834	75.01	0.716	689,30	0.718	0.47
Anápolis (GO)	334.613	328.755	5.858	30.025,66	933,16	358,6	0.660	0.822	74.33	0.737	785,17	0.737	0.50

Continua

Continua

<i>Cidades</i>	<i>Pop</i>	<i>Pop urb</i>	<i>Pop rur</i>	<i>PIB</i>	<i>Ar tot</i>	<i>Den</i>	<i>IDHM ed</i>	<i>IDHM lo</i>	<i>Esp</i>	<i>IDHM re</i>	<i>Ren</i>	<i>IDHM</i>	<i>Ig</i>
Região Sudeste													
São Paulo (SP)	11.253.503	11.152.344	101.159	39.450,87	1.521,10	7.398,3	0.725	0.855	76.30	0.843	1.516,21	0.805	0.62
Rio de Janeiro (RJ)	6.320.446	6.320.446	0	30.088,24	1.200,28	5.265,8	0.719	0.845	75.69	0.840	1.492,63	0.799	0.62
Belo Horizonte (MG)	2.375.151	2.375.151	0	21.748,25	331,40	7.167,0	0.737	0.856	76.37	0.841	1.497,29	0.810	0.60
Guarulhos (SP)	1.221.979	1.221.979	0	30.383,43	318,68	3.834,5	0.717	0.831	74.83	0.746	829,91	0.763	0.51
Campinas (SP)	1.080.113	1.061.540	18.573	33.939,56	794,43	1.359,6	0.731	0.860	76.59	0.829	1.390,83	0.805	0.56
São Gonçalo (RJ)	999.728	998.999	729	10.341,78	247,71	4.035,9	0.681	0.833	74.96	0.711	669,30	0.739	0.43
Duque de Caxias (RJ)	855.048	852.138	2.910	30.988,8	467,62	1.828,5	0.624	0.833	75.00	0.692	592,81	0.711	0.46
Nova Iguaçu (RJ)	796.257	787.563	8.694	11.942,3	521,25	1.527,6	0.641	0.818	74.08	0.691	591,00	0.713	0.48
São Bernardo do Campo (SP)	765.463	752.658	12.805	46.495,62	409,48	1.869,4	0.752	0.861	76.65	0.807	1.212,65	0.805	0.54
São André (SP)	676.407	676.407	0	25.609,3	175,78	3.848,0	0.769	0.861	76.66	0.819	1.304,40	0.815	0.53
Osasco (SP)	666.740	666.740	0	54.599,81	64,95	10.264,8	0.718	0.840	75.42	0.776	1.003,40	0.776	0.53
São José dos Campos (SP)	629.921	617.106	12.815	38.431	1.099,41	573,0	0.764	0.855	76.27	0.804	1.190,96	0.807	0.55
Ribeirão Preto (SP)	604.682	602.966	1.716	28.100,52	650,96	928,9	0.739	0.844	75.65	0.820	1.314,04	0.800	0.54
Uberlândia (MG)	604.013	587.266	16.747	30.463,7	4.115,21	146,8	0.716	0.885	78.09	0.776	1.001,45	0.789	0.50
Contagem (MG)	603.442	601.400	2.042	30.743,31	195,27	3.090,3	0.697	0.832	74.94	0.745	824,30	0.756	0.48
Sorocaba (SP)	586.625	580.655	5.970	27.506,28	449,80	1.304,2	0.762	0.843	75.59	0.792	1.107,19	0.798	0.52
Juiz de Fora (MG)	516.247	510.378	5.869	16.054,99	1.435,66	359,6	0.711	0.844	75.65	0.784	1.050,88	0.778	0.56
Niterói (RJ)	487.562	487.562	0	23.011,46	133,92	3.640,8	0.773	0.854	76.23	0.887	2.000,29	0.837	0.59
Belford Roxo (RJ)	469.332	469.332	0	9.520,41	77,82	6.031,4	0.598	0.808	73.50	0.662	491,51	0.684	0.42
Campos dos Goytacazes (RJ)	463.731	418.725	45.006	54.607,81	4.026,70	115,2	0.619	0.830	74.82	0.715	682,59	0.716	0.55
São João de Meriti (RJ)	458.673	458.673	0	10.506,47	35,22	13.024,6	0.646	0.831	74.87	0.693	597,57	0.719	0.43
Santos (SP)	419.400	419.086	314	65.790,53	280,67	1.494,3	0.807	0.852	76.13	0.861	1.693,65	0.840	0.55
Mauá (SP)	417.064	417.064	0	17.619,04	61,87	6.741,4	0.733	0.852	76.13	0.721	709,25	0.766	0.44
Vila Velha (ES)	414.586	412.575	2.011	16.839,65	210,07	1.973,6	0.734	0.864	76.84	0.807	1.211,79	0.800	0.56
Serra (ES)	409.267	406.450	2.817	31.034,14	551,69	741,9	0.664	0.844	75.66	0.720	705,89	0.739	0.47
São José do Rio Preto (SP)	408.258	383.490	24.768	21.991,26	431,96	945,1	0.748	0.846	75.74	0.801	1.169,16	0.797	0.50
Mogi das Cruzes (SP)	387.779	357.313	30.466	22.751,54	712,67	544,1	0.740	0.851	76.07	0.762	916,81	0.783	0.54
Diadema (SP)	386.089	386.089	0	29.153,85	30,80	12.537,0	0.716	0.844	75.65	0.717	694,55	0.757	0.43
Betim (MG)	378.089	375.331	2.758	74.950,56	342,85	1.102,8	0.687	0.864	76.82	0.709	660,56	0.749	0.47
Jundiá (SP)	370.126	354.204	15.922	54.353,94	431,17	858,4	0.768	0.866	76.94	0.834	1.431,55	0.822	0.53
Carapicuíba (SP)	369.584	369.584	0	9.270,98	34,55	10.698,3	0.693	0.842	75.52	0.721	712,78	0.749	0.46
Piracicaba (SP)	364.571	356.743	7.828	29.959,19	1.378,50	264,5	0.717	0.848	75.88	0.797	1.143,2	0.785	0.52

Continua

Conclusão

Cidades	Pop	Pop urb	Pop rur	PIB	Ar tot	Den	IDHM ed	IDHM lo	Esp	IDHM re	Ren	IDHM	Ig
Região Sudeste													
Montes Claros (MG)	361.915	344.427	17.488	12.436,53	3.568,94	101,4	0.744	0.868	77.07	0.707	650,62	0.770	0.53
Cariacica (ES)	348.738	337.643	11.095	14.054,69	279,86	1.246,1	0.628	0.844	75.64	0.699	620,89	0.718	0.45
Bauru (SP)	343.937	338.184	5.753	21.578,21	667,68	515,1	0.752	0.854	76.26	0.800	1.163,86	0.801	0.55
São Vicente (SP)	332.445	331.817	628	9.859,22	147,89	2.247,9	0.716	0.857	76.39	0.738	789,32	0.768	0.47
Vitória (ES)	327.801	327.801	0	76.721,66	98,19	3.338,3	0.805	0.855	76.28	0.876	1.866,58	0.845	0.60
Itaquaquecetuba (SP)	321.770	321.770	0	10.118,18	82,61	3.895,2	0.648	0.844	75.66	0.665	502,85	0.714	0.42
Franca (SP)	318.640	313.046	5.594	15.806,39	605,28	526,1	0.753	0.842	75.50	0.749	846,57	0.780	0.46
Região Sul													
Curitiba (PR)	1.751.907	1.751.907	0	30.400,49	435,04	4.027,0	0.768	0.855	76.30	0.850	1.581,04	0.823	0.55
Porto Alegre (RS)	1.409.351	1.409.351	0	30.524,8	496,68	2.837,5	0.702	0.857	76.42	0.867	1.758,27	0.805	0.60
Joinville (SC)	515.288	497.850	17.438	35.854,42	1.126,11	457,6	0.749	0.889	78.34	0.795	1.126,74	0.809	0.49
Londrina (PR)	506.701	493.520	13.181	19.612,48	1.653,08	306,5	0.712	0.837	75.19	0.789	1.083,35	0.778	0.51
Caxias do Sul (RS)	435.564	419.406	16.158	36.034,46	1.644,30	264,9	0.686	0.860	76.58	0.812	1.253,93	0.782	0.48
Florianópolis (SC)	421.240	405.286	15.954	23.282,20	675,41	623,7	0.800	0.873	77.35	0.870	1.798,12	0.847	0.54
Maringá (PR)	357.077	350.653	6.424	23.139,83	487,05	733,1	0.768	0.852	76.10	0.806	1.202,63	0.808	0.49
Pelotas (RS)	328.275	306.193	22.082	13.925,47	1.610,08	203,9	0.632	0.844	75.64	0.758	894,35	0.739	0.54
Canoas (RS)	323.827	323.827	0	51.070,03	131,10	2.470,2	0.636	0.864	76.83	0.768	952,13	0.750	0.51
Ponta Grossa (PR)	311.611	304.733	6.878	19.011,88	2.067,55	150,7	0.703	0.837	75.22	0.755	877,1	0.763	0.54
Blumenau (SC)	309.011	294.773	14.238	28.944,81	518,50	596,0	0.722	0.894	78.64	0.812	1.253,17	0.806	0.46

Fonte: Elaboração própria, 2014, com base em IBGE, 2010; PNUD, 2013

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

APÊNDICE C – Número de trabalhadores por faixa de tempo do movimento pendular diário, 2010

Tabela C.1 – Número de trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento casa-trabalho, 2010

Município	Tempo habitual de deslocamento do domicílio urbano para o trabalho principal					
	Total	Até cinco minutos	De seis minutos até meia hora	Mais de meia hora até uma hora	Mais de uma hora até duas horas	Mais de duas horas
Brasil	55.121.717	6.674.070	28.591.522	13.244.185	5.596.950	1.014.989
Região Norte						
Manaus	542.172	36.134	200.230	211.627	82.323	11.858
Belém	420.955	37.194	210.748	128.346	40.300	4.367
Ananindeua	151.994	10.504	56.195	52.857	30.364	2.074
Porto Velho	136.577	12.606	82.924	30.688	7.973	2.385
Macapá	122.755	16.778	79.873	20.788	4.166	1.150
Rio Branco	95.936	9.031	62.690	19.717	3.885	614
Região Nordeste						
Salvador	904.803	52.991	302.944	349.616	176.017	23.234
Fortaleza	791.113	68.874	356.158	265.644	92.052	8.385
Recife	487.354	33.822	229.045	169.802	49.552	5.134
São Luís	302.311	20.055	131.352	109.368	36.478	5.058
Maceió	288.518	21.626	137.823	90.105	33.999	4.965
Teresina	259.804	21.826	159.582	64.839	11.860	1.698
Natal	266.626	23.080	135.164	85.012	21.757	1.612
João Pessoa	238.196	18.528	135.620	66.778	15.771	1.500
Jaboatão dos Guararapes	196.180	12.929	68.425	74.078	37.321	3.428
Aracaju	185.842	13.674	102.311	54.676	13.261	1.920
Feira de Santana	163.679	16.162	98.679	36.441	10.865	1.532
Campina Grande	116.031	12.660	79.805	19.907	2.905	753
Olinda	117.477	6.404	45.171	47.590	16.602	1.711
Caucaia	88.392	8.402	37.728	28.779	12.381	1.101
Caruaru	87.079	11.233	59.772	13.696	2.108	271
Vitória da Conquista	89.123	9.461	58.150	17.937	2.995	581
Paulista	96.622	5.587	32.452	33.436	22.417	2.731

Continua

Continua

Município	Tempo habitual de deslocamento do domicílio urbano para o trabalho principal					
	Total	Até cinco minutos	De seis minutos até meia hora	Mais de meia hora até uma hora	Mais de uma hora até duas horas	Mais de duas horas
Região Centro-Oeste						
Brasília	964.806	58.660	398.337	349.229	148.418	10.162
Goiânia	497.622	50.431	270.603	130.383	40.281	5.924
Campo Grande	283.354	26.319	160.943	71.230	22.690	2.173
Cuiabá	200.473	16.177	106.411	61.297	15.174	1.413
Aparecida de Goiânia	178.363	12.792	74.085	59.411	28.772	3.304
Anápolis	119.396	12.622	76.635	23.925	5.382	832
Região Sudeste						
São Paulo	3.775.883	194.881	1.077.780	1.337.254	946.798	219.172
Rio de Janeiro	2.064.874	120.987	671.908	748.741	440.738	82.500
Belo Horizonte	887.044	55.330	353.208	331.673	135.821	11.012
Guarulhos	408.401	24.343	139.235	141.472	82.437	20.915
Campinas	366.223	23.379	170.099	125.066	41.771	5.907
São Gonçalo	342.501	14.496	92.700	128.394	88.933	17.979
Duque de Caxias	261.119	17.571	85.191	75.141	66.325	16.891
Nova Iguaçu	236.454	15.079	65.685	64.078	61.221	30.392
São Bernardo do Campo	282.373	16.248	110.693	99.624	47.793	8.015
Santo André	264.359	13.209	103.228	92.783	48.446	6.694
Osasco	238.073	10.403	77.246	94.951	49.051	6.422
São José dos Campos	201.969	14.993	107.664	61.487	16.011	1.814
Ribeirão Preto	200.148	17.661	127.493	43.049	10.609	1.336
Uberlândia	232.901	23.831	137.229	56.919	13.595	1.327
Contagem	233.654	16.167	92.306	80.000	40.948	4.232
Sorocaba	193.177	14.925	94.415	61.645	19.788	2.404
Juiz de Fora	186.362	14.795	96.247	60.712	13.398	1.210
Niterói	186.500	8.033	66.127	67.797	39.154	5.389
Belford Roxo	143.553	7.464	33.116	40.662	46.619	15.693
Campos dos Goytacazes	118.386	11.061	68.318	30.192	7.491	1.324
São João de Meriti	158.393	8.237	49.501	48.501	44.408	7.746
Santos	160.170	10.278	86.722	47.581	13.175	2.414
Mauá	160.164	7.012	46.328	56.888	42.283	7.653

Continua

Conclusão

Município	Tempo habitual de deslocamento do domicílio urbano para o trabalho principal					
	Total	Até cinco minutos	De seis minutos até meia hora	Mais de meia hora até uma hora	Mais de uma hora até duas horas	Mais de duas horas
Região Sudeste						
Vila Velha	158.693	13.558	73.907	52.246	17.525	1.456
Serra	154.730	11.597	59.230	55.102	26.207	2.593
São José do Rio Preto	149.848	13.781	100.627	29.638	5.135	667
Mogi das Cruzes	125.235	7.202	60.701	37.494	15.004	4.834
Diadema	149.874	7.911	62.004	52.506	24.459	2.993
Betim	149.082	10.699	65.460	46.960	23.597	2.367
Jundiaí	144.163	10.184	78.197	40.337	13.644	1.801
Carapicuíba	132.929	5.161	33.267	56.935	33.834	3.732
Piracicaba	119.314	10.613	70.197	31.398	6.445	661
Montes Claros	123.722	11.736	86.340	22.010	2.990	646
Cariacica	128.075	9.354	43.742	44.157	28.046	2.776
Bauru	120.395	10.049	77.731	27.508	4.360	748
São Vicente	120.815	5.460	46.172	49.903	18.005	1.276
Vitória	126.950	10.922	74.754	34.361	6.344	569
Itaquaquecetuba	106.945	5.580	32.741	30.572	26.393	11.658
Franca	119.440	13.655	81.721	20.608	3.072	384
Região Sul						
Curitiba	657.748	49.359	317.180	219.899	65.574	5.736
Porto Alegre	518.807	36.077	252.032	178.541	48.916	3.240
Joinville	200.574	18.251	115.948	54.554	11.158	662
Londrina	181.228	18.249	106.262	45.699	10.456	562
Caxias do Sul	176.272	17.727	108.749	44.381	4.937	477
Florianópolis	173.359	16.668	100.766	42.318	12.521	1.086
Maringá	150.368	16.295	104.357	25.291	3.885	540
Pelotas	98.135	8.605	68.165	17.633	3.115	617
Canoas	127.592	8.911	59.058	45.574	13.351	698
Ponta Grossa	102.190	10.400	57.985	26.299	6.876	630
Blumenau	126.697	13.363	75.693	31.687	5.631	323

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

Tabela C.2 – Tempo médio de deslocamento casa-trabalho, 2010

Cidades	Tempo de deslocamento (minutos)
Brasil	32.0
Região Norte	
Manaus	41.0
Belém	33.0
Ananindeua	42.4
Porto Velho	28.4
Macapá	24.1
Rio Branco	25.8
Região Nordeste	
Salvador	44.5
Fortaleza	35.4
Recife	35.0
São Luís	37.4
Maceió	35.7
Teresina	27.5
Natal	32.0
João Pessoa	30.0
Jaboatão dos Guararapes	43.0
Aracaju	31.2
Feira de Santana	28.4
Campina Grande	23.5
Olinda	40.0
Caucaia	36.9
Caruaru	22.4
Vitória da Conquista	25.0
Paulista	46.3
Região Centro-Oeste	
Brasília	39.2
Goiânia	30.7
Campo Grande	30.1
Cuiabá	31.4
Aparecida de Goiânia	39.7
Anápolis	25.9
Região Sudeste	
São Paulo	51.1
Rio de Janeiro	46.7
Belo Horizonte	39.7
Guarulhos	40.7
Campinas	36.3
São Gonçalo	51.9
Duque de Caxias	49.9
Nova Iguaçu	56.5
São Bernardo do Campo	42.0
Santo André	42.8
Osasco	46.0
São José dos Campos	31.9
Ribeirão Preto	27.1
Uberlândia	28.0
Contagem	40.9
Sorocaba	34.3
Juiz de Fora	31.6
Niterói	45.5
Belford Roxo	59.8
Campos dos Goytacazes	29.3
São João de Meriti	51.0

Continua

Conclusão	
Cidades	Tempo de deslocamento (minutos)
Região Sudeste	
Santos	32.7
Mauá	51.2
Vila Velha	34.7
Serra	40.6
São José do Rio Preto	25.0
Mogi das Cruzes	38.0
Diadema	40.7
Betim	38.7
Jundiaí	32.7
Carapicuíba	50.5
Piracicaba	28.3
Montes Claros	23.7
Cariacica	44.5
Bauru	26.3
São Vicente	40.6
Vitória	28.2
Itaquaquecetuba	54.2
Franca	23.2
Região Sul	
Curitiba	34.2
Porto Alegre	33.9
Joinville	28.4
Londrina	27.9
Caxias do Sul	25.7
Florianópolis	29.1
Maringá	23.2
Pelotas	24.5
Canoas	34.9
Ponta Grossa	29.0
Blumenau	26.7

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

Tabela C.3 – Proporção (%) de trabalhadores por faixa de tempo de deslocamento casa-trabalho das cidades de referência, 2010

Tempo de deslocamento	Brasil	Belém	Feira de Santana	Cuiabá	Juiz de Fora	Londrina
Até 5 minutos	12,11	8,84	9,87	8,07	7,94	10,07
De 6 minutos até meia hora	51,87	50,06	60,29	53,08	51,65	58,63
Mais de meia hora até uma hora	24,03	30,49	22,26	30,58	32,58	25,22
Mais de uma hora até duas horas	10,15	9,57	6,64	7,57	7,19	5,77
Mais de duas horas	1,84	1,04	0,94	0,70	0,64	0,31

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010

APÊNDICE D – Dados reais para as cidades de referência

Tabela D.1 – Dados reais das cidades escolhidas para a calibragem do modelo de simulação urbana, 2010

Código do Município	Municípios	População Urbana	Área da cidade (km ²)	Raio da cidade (km)	Tamanho do lote (m ²)	Área da residência (m ²)	Número Total de residências	Renda média domiciliar (reais)	Casas* (%)	Apartamentos (%)	Tempo médio de deslocamento (minutos)	Energia consumida na residência <i>per capita</i> (tep/hab)
1501402	Belém	1.381.475	1.059,41	18.364	1.590,21	120,15	365.633	2.531,68	80	11	33.0	0.0899
2910800	Feira de Santana	510.635	1.337,99	20.637	196,74	69,64	150.456	1.744,57	91	4	28.4	0.0841
5103403	Cuiabá	540.814	3.495,42	33.356	622,57	200,44	162.528	3.024,61	81	13	31.4	0.1214
3136702	Juiz de Fora	510.378	1.435,66	21.377	257,73	73,30	168.666	2.635,95	68	30	31.6	0.1052
4113700	Londrina	493.520	1.653,08	22.939	233,04	102,50	161.148	2.817,47	77	21	27.9	0.1549
Média		687.364	1.796,31	23.3	580,06	113,21	201.686	2.550,86	79	16	30.5	0.1111

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010; no banco de dados municipais fornecido pelas prefeituras das cidades de referência; e no banco de dados fornecido pela ANP.

Nota: *Neste estudo, como tipologias habitacionais optaram-se somente pelas casas e apartamentos. Os 100% restantes para fechar estas tipologias dizem respeito à casa de vila ou condomínio; habitação em casa de cômodos; oca ou maloca, segundo a classificação do IBGE.

APÊNDICE E – Dados para a calibragem do modelo de simulação urbana

Tabela E.1 – Dados para a calibragem do modelo,2010

	Unidade	Valores médios reais	Unidade	Valores médios reais (padrão americano)
Tamanho do lote	m ²	580,06	acre	0.14
Área da residência	m ²	113,21	pé quadrado	1218.58
Área da cidade	km ²	1.796,31	milha quadrada	701
Raio da cidade (assumindo círculo)	km	23.3	milhas	14.446
Renda média domiciliar	R\$	2.550,86	US\$	19.506,00
Número Total de residências	unidades	201.686	unidades	201.686
Tempo de deslocamento	minutos	30.5	minutos	30.5
Percentual de casas	%	79	%	79
Percentual de apartamentos	%	16	%	16
Energia consumida na residência, <i>per capita</i>	tep/hab	0.1111	mmBTUs/hab	4.1906
Energia consumida no deslocamento, <i>per capita</i>	tep/hab	0.1921	mmBTUs/hab	6.8515

Fonte: Elaboração própria, 2014 com base no IBGE, 2010; no banco de dados municipais fornecido pelas prefeituras das cidades de referência; e no banco de dados fornecido pela ANP. Os valores médios reais (padrão americano) foram transformados para facilitar a análise baseada nos códigos originais do modelo UEFM.

ANEXOS

ANEXO A – Método de solução

A principal característica do modelo UEFM, conforme Larson e outros (2012) é a falta de uma solução explícita para o sistema de equações diferenciais não lineares. Isso ocorre devido à complexidade do congestionamento que é incorporado ao modelo. Esta endogeneidade torna difícil resolver o problema analiticamente. Larson e outros (2012) e Larson e Yezer (2014) expõem o método de solução. O problema é escrito como um sistema de equações diferenciais simultâneas, sendo estas resolvidas por métodos numéricos. A solução numérica é usada pelo simples fato da estrutura das equações impedirem o uso das técnicas matemáticas tradicionais. Definido os custos de deslocamento e a população, as demais variáveis do modelo são encontradas de forma recursiva. Em outras palavras, os primeiros passos do modelo é definir a renda média domiciliar para as cinco cidades de referência e, em seguida, os parâmetros do custo de deslocamento (m_0, m_1, p_g) . O próximo passo é calibrar A , o parâmetro da produtividade de habitação, para ajustar a quantidade de habitação consumida. Em resumo, neste método, têm-se duas equações diferenciais não lineares de primeira ordem com valores iniciais, podendo ser descritas como

$$\begin{bmatrix} \frac{dT(k)}{dk} \\ \frac{dN(k)}{dk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + p_g \frac{1}{G(v(k))} + \Gamma W \frac{1}{v(k)} \\ 2\pi\theta k D(T(k)) \end{bmatrix}$$

Com os seguintes valores iniciais

$$\begin{bmatrix} T(k_{CBD}) \\ N(k_{CBD}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_0 + k_{CBD} \left[m_1 + p_g \frac{1}{G(v_{low})} + \Gamma W \frac{1}{v_{low}} \right] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

A primeira equação do sistema (A.1) $[dT(k)/dk]$, fornece os custos de deslocamento no raio k a partir de centro de empregos da cidade. As variáveis foram discutidas na seção 4.3, sendo m_1 a depreciação do veículo por milha rodada; p_g o preço da gasolina; $G(v(k))$ o custo do

combustível relacionado à velocidade do veículo; ΓW o custo de tempo despendido como uma fração constante da taxa de salário real (percentual da renda das famílias gasto com transporte urbano); $v(k)$ a velocidade de deslocamento. A segunda equação $[dN(k)/dk]$, é a densidade populacional, em que $D(T(k))$ é a função de densidade populacional; θ é o percentual da terra usado para a habitação. A solução matemática deste sistema fornece os custos de deslocamento diário da residência ao local de trabalho e o tamanho da população para cada anel na cidade, conforme mostrado na Figura 9 (Vias radiais) do capítulo 4.

Larson e outros (2012) expõem duas condições para o equilíbrio da cidade, conforme discutido na literatura do Capítulo 3. O preço da terra por acre no limite da cidade dever ser igual ao preço de reserva agrícola da terra por acre. Ademais, com os custos de deslocamento, salários e consumo de habitação conhecidos, pode-se calcular a utilidade dos consumidores/trabalhadores.