

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**APLICAÇÕES DE SISTEMAS MULTIAGENTES NA
PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA ELÉTRICA EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

JOEL DAVID MELO TRUJILLO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Agosto de 2010, Ilha Solteira - SP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Aplicações de Sistemas Multiagentes na Previsão Espacial de
Demanda Elétrica em Sistemas de Distribuição”

JOEL DAVID MELO TRUJILLO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Coorientador: Prof. Dr. Edgar Manuel Carreño Franco

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Área de concentração: Automação.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M528a

Melo Trujillo, Joel David.

Aplicações de sistemas multiagentes na previsão espacial de demanda elétrica em sistemas de distribuição / Joel David Melo Trujillo. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2010.

151 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2010.

Orientador: Antonio Padilha Feltrin

1. Previsão espacial. 2. Solo – Uso. 3. Extração do conhecimento. 4. Energia elétrica – Distribuição. 5. Sistemas multiagentes.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: APLICAÇÕES DE SISTEMAS MULTIAGENTES NA PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

AUTOR: JOEL DAVID MELO TRUJILLO

ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:



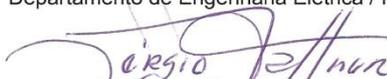
Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. SÉRGIO LUÍS HAFFNER

Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre/RS

Data da realização: 16 de agosto de 2010.

A Deus, pelo dom da vida; aos meus pais, Olga e David, por ensinar-me a sempre acreditar que tudo é possível; a meus irmãos, Patrícia, Hugo, Jimmy, por seu apoio em todos os momentos; a minha sobrinha, Genesis, por sua alegria, e a todos meus amigos por ser como minha família e acreditar sempre em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por permitir conhecer este esplêndido país, Brasil, e conhecer pessoas muito amáveis e afetuosas.

Agradeço a minha família por sempre me dar forças, cada dia fora de casa, lembro-me de cada um de vocês.

Agradecimentos especiais ao professor Antonio Padilha Feltrin por ter me aceitado para ser meu orientador, nesta nova etapa de minha vida. Ao doutor Edgar Manuel Carreño, pela dedicação e orientação no trabalho desenvolvido. Ao professor Rubén Romero e sua família por sua ajuda em todos os momentos.

Agradeço aos colegas do LAPSEE pelo companheirismo. A todos os professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Agradeço aos meus amigos que tanto me apoiaram durante este tempo que estive no Brasil. Eles são minha família agora. Sem ajuda deles não poderia ter concluído este trabalho.

Agradeço a UNESP, ao departamento de Engenharia Elétrica da FEIS pela estrutura oferecida para o desenvolvimento do trabalho. Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se dois métodos para serem aplicados na previsão espacial de demanda elétrica, os quais simulam as influências de cargas especiais nas vizinhanças e utilizam os sistemas multiagentes para caracterizar a área de serviço, mostrando assim, a dinâmica dos grupos sociais em uma cidade à procura dos recursos necessários para suas atividades. O primeiro sistema multiagente foi desenvolvido para obter a previsão espacial de demanda elétrica de toda área de serviço e o segundo sistema multiagente modela a influência de cargas especiais nas vizinhanças. Estes sistemas apresentam um caráter estocástico, para simular a estocasticidade dos usuários nos sistemas de distribuição. Os métodos apresentados consideram a disponibilidade atual de dados nas empresas do setor, usando só o banco de dados comercial da empresa de serviço elétrico e o conjunto de dados georreferenciados dos elementos da rede. Uma das contribuições deste trabalho é de utilizar um número real para representar a demanda elétrica esperada de cada subárea fornecendo, deste modo, um melhor dado de entrada para realizar o planejamento de expansão da rede elétrica. A metodologia proposta foi testada em um sistema real de uma cidade de médio porte. Como resultados são gerados mapas de cenários futuros de previsão espacial de demanda para a área de estudo, que mostram a localização espaço-temporal das novas cargas. Cada mapa mostra as subáreas onde a nova demanda é esperada, com um número real para o valor da quantidade desta demanda. Os resultados obtidos variam entre 5 a 10 % em diferentes simulações, quando comparadas com as fornecidas pelo departamento de planejamento da empresa elétrica que aplica uma metodologia manual, que utiliza o conhecimento e as decisões do planejador para determinar o crescimento da demanda.

Palavras-chave: Previsão espacial. Uso do solo. Extração de conhecimento. Planejamento de redes de distribuição. Agentes. Sistemas multiagentes.

ABSTRACT

This paper presents two methods to be applied in the spatial electric load forecasting, which simulate the influences of special loads in the vicinity and use the multi-agent systems to characterize the service area, thus showing the dynamics of social groups in a city seeking the necessary resources for their activities. The first multi-agent system was developed for the spatial electric load forecasting of the entire service area and the second multi-agent system models the influence of special load in the vicinity. These systems have a stochastic character, to simulate the stochasticity of users in distribution systems. The method presented in this work considers that the utilities have access only to basic information, using only the commercial consumer database and georeferenced data set of the network elements. One of the contributions of this work is to use a real number to represent the expected demand in each subarea providing thus a better input data to perform the expansion planning of the distribution systems grid. The proposed methodology was tested in a real system of a midsize city. As results are generated maps of forecast future scenarios of spatial demand for the study area, showing the location of the new space-time loads. Each map shows the subareas where the new demand is expected, with a real number to the value of the quantity of demand. The results vary between 5 to 10% in different simulations, when compared with those provided by the planning department electrical distribution utility that applies an electric manual, which uses the knowledge and decisions of the planner to determine the growth of demand.

Keywords: Spatial electric. Land use. Knowledge extraction. Distribution planning. Agent. Multi-agent systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Agente genérico de acordo com a Inteligência Artificial.	23
Figura 2.1 – A previsão de demanda tradicional é a determinação de quanta demanda será requerida e quando.	35
Figura 2.2 – Crescimento geral esperado considerando toda a área de serviço.	38
Figura 2.3 – Crescimento específico esperado ao analisar o comportamento em pequena escala, no mesmo período de tempo.	39
Figura 2.4 – Mapa de uma região com tamanho de áreas distintas para representar as áreas de influência por alimentador.	41
Figura 2.5 – Mapa de uma região dividido em uma grade de tamanho grande. É difícil selecionar áreas específicas, porém não necessita de muitos dados.	41
Figura 2.6 – Mapa de uma região dividida em uma grade pequena. É fácil de analisar regiões separadas, mas precisa de uma quantidade maior de dados.	42
Figura 2.7 – O modelo de polo urbano representa a influência de um ponto específico de forma decrescente com a distância.	44
Figura 2.8 – Mapa da região considerando diferentes polos urbanos.	45
Figura 2.9 – Função de pertinência para representação da variável distância.	48
Figura 2.10 – Função de pertinência para representação da variável preferência.	49
Figura 2.11 – Modelos de vizinhança.	50
Figura 2.12 – Previsão de crescimento das cargas residenciais em 20 anos.	52
Figura 2.13 – Previsão de crescimento das cargas comerciais em 20 anos.	53
Figura 3.1 – Classes de vizinhanças.	59
Figura 3.2 – Representação de uma sociedade através de uma rede de agentes.	62
Figura 3.3 – Mapa da área de serviço, vista aérea.	66
Figura 3.4 – Demanda da subárea (3,4) em MW.	66
Figura 3.5 – Localização inicial do agente móvel.	72
Figura 3.6 – Localização final do agente móvel.	73
Figura 3.7 – Fluxograma do algoritmo para o método proposto de previsão de toda área de estudo.	75

Figura 4.1 – Mapa geral da zona de serviço.....	77
Figura 4.2 – Elementos de uma subárea na base de dados.....	79
Figura 4.3 – Caminho percorrido pelo agente móvel representado por uma seta.	80
Figura 4.4 – Alocação do agente móvel no centro de atividades e aplicação do operador genético de torneio para primeira iteração.....	82
Figura 4.5 – Interação entre o agente móvel e agente estático para primeira iteração.....	83
Figura 4.6 – Aplicação do operador genético de torneio para segunda iteração.....	84
Figura 4.7 – Interação entre o agente móvel e agente estático para segunda iteração.	85
Figura 4.8 – Interação entre o agente móvel e agente estático para terceira iteração.	85
Figura 4.9 – Caminho percorrido pelo agente móvel até a terceira iteração.....	86
Figura 4.10 – Carga residencial ao início da simulação.....	87
Figura 4.11 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 5 anos.	88
Figura 4.12 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 10 anos.	88
Figura 4.13 – Resultado para a carga residencial aplicando a metodologia de sistemas multiagentes para a previsão de toda a área de serviço em um horizonte de 20 anos.	89
Figura 4.14 – Carga comercial ao início da simulação	90
Figura 4.15 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos.....	90
Figura 4.16 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos.....	91
Figura 4.17 – Resultado para a carga comercial aplicando a metodologia de sistema multiagente para a previsão de toda a área de serviço em um horizonte de 20 anos.	91
Figura 5.1 – Ondas de água geradas em uma vasilha.....	97
Figura 5.2 – Janela para as três primeiras ondas de propagação da demanda.....	104
Figura 5.3 – Janela da onda 1.....	105
Figura 5.4 – Vetores associados com a janela da onda 1.	105
Figura 5.5 – Janela da onda 2.....	106
Figura 5.6 – Vetores associados a janela da onda 2.	106
Figura 5.7 – Fluxograma do algoritmo para o método proposto para estudo de cenários. .	108
Figura 6.1 – Localização da nova carga industrial, representado por um triângulo vermelho.	110

Figura 6.2 – Localização da nova instalação do poder público, representado por um triângulo vermelho.	111
Figura 6.3 – Elementos de uma subárea na base de dados para o estudo de cenário de uma nova carga industrial.	115
Figura 6.4 – Primeira janela e vetores gerados para a onda 1 para o cenário o primeiro cenário.	117
Figura 6.5 – Análise da primeira onda de propagação para o primeiro cenário.	118
Figura 6.6 – Nova janela gerada para a Onda 2 para o primeiro cenário.	119
Figura 6.7 – Segunda janela e vetores gerados para a Onda 2 para o primeiro cenário.	120
Figura 6.8 – Análise da segunda onda de propagação para o primeiro cenário.	121
Figura 6.9 – Nova janela gerada para a Onda 3 para o primeiro cenário.	122
Figura 6.10 – Terceira janela e vetores gerados para a Onda3 para o primeiro cenário.	123
Figura 6.11 – Análise da terceira onda de propagação para o primeiro cenário.	124
Figura 6.12 – Carga ao início da simulação para o primeiro cenário.	125
Figura 6.13 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 5 anos para o primeiro cenário.	126
Figura 6.14 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 10 anos para o primeiro cenário.	126
Figura 6.15 – Resultado do primeiro cenário para a carga residencial aplicando o método para estudo de cenários para um horizonte de 20 anos.	127
Figura 6.16 – Carga comercial ao início da simulação para o primeiro cenário.	128
Figura 6.17 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos para o primeiro cenário.	128
Figura 6.18 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos para o primeiro cenário.	129
Figura 6.19 – Resultado do primeiro cenário para a carga comercial aplicando o método para estudo de cenários para um horizonte de 20 anos.	129
Figura 6.20 – Primeira janela e vetores gerados para a Onda 1 para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.	133
Figura 6.21 – Análise da primeira onda de propagação para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.	134
Figura 6.22 – Segunda janela e vetores gerados para a Onda 2 para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.	135

Figura 6.23 – Análise da segunda onda de propagação para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.....	136
Figura 6.24 – Carga comercial ao início da simulação para o segundo cenário.	137
Figura 6.25 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos para o segundo cenário.....	138
Figura 6.26 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos para o segundo cenário.....	138
Figura 6.27 – Resultado para a carga comercial aplicando a metodologia de sistema multiagente para o segundo cenário para um horizonte de 20 anos.	139

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	16
1.1 PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA.....	17
1.2 AGENTES E SISTEMAS MULTIAGENTES (SMA).....	22
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
Capítulo 2 - Visão Geral das Metodologias de Previsão Espacial de Demanda	33
2.1 PREVISÃO DE CARGA TRADICIONAL.....	33
2.2 PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA.....	36
2.2.1 Crescimento espacial da carga	37
2.2.2 Resolução da previsão	40
2.2.3 Exigências de dados.....	42
2.2.4 Polo urbano	43
2.2.5 Determinação de mapas de preferência	46
2.2.6 Uso da lógica nebulosa	48
2.2.7 Uso de autômatos celulares.....	50
Capítulo 3 - Método de Previsão Espacial de Demanda para toda a Área de Serviço	
 <i>Utilizando um Sistema Multiagente.....</i>	55
3.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO DA DINÂMICA URBANA	56
3.2 AUTÔMATOS CELULARES.....	57
3.3 SISTEMAS MULTIAGENTES NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS URBANOS.....	60
3.4 CONSTRUÇÃO DO MÉTODO DE SISTEMAS MULTIAGENTE PARA A PREVISÃO DE DEMANDA ESPACIAL DE TODA A ÁREA DE SERVIÇO.....	64
3.4.1 Processamento dos dados.....	65

3.4.1.1	<i>Base de Dados Espacial</i>	65
3.4.1.2	<i>Base de Dados de Demanda</i>	66
3.4.2	Representação da Zona de Estudo	67
3.4.3	Probabilidade de Desenvolvimento	67
3.4.3.1	<i>Probabilidade de Desenvolvimento para Subáreas sem Carga</i>	68
3.4.3.2	<i>Probabilidade de Redesenvolvimento para as Subáreas com Carga</i>	69
3.4.4	Previsão Geral de Demanda para a Área de Serviço	70
3.4.5	Localização Temporal Usando Sistema Multiagente	70

Capítulo 4 - Aplicação do Método de Previsão Espacial de Demanda para toda a Área de Serviço.....76

4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	77
4.2	COLETA DE DADOS.....	78
4.3	PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	79
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE SERVIÇO.....	79
4.5	DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS NOVAS CARGAS.....	81
4.6	CONCLUSÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO PARA A PREVISÃO ESPACIAL DE TODA A ÁREA DE SERVIÇO.....	92

Capítulo 5 - Método de Previsão Espacial de Demanda para o Estudo de Cenários Utilizando um Sistema Multiagente.....94

5.1	METODOLOGIA DE CENÁRIOS.....	95
5.2	CONSTRUÇÃO DO MÉTODO DE SISTEMA MULTIAGENTE PARA O ESTUDO DE CENÁRIOS NA PREVISÃO DE DEMANDA ESPACIAL.....	97
5.2.1	Processamento dos Dados	98
5.2.1.1	<i>Base de Dados Espacial</i>	98
5.2.1.2	<i>Base de Dados de Demanda</i>	99
5.2.2	Representação da Zona de Estudo	100

5.2.2.1	<i>Agente Reativo</i>	100
5.2.2.2	<i>Agente Proativo</i>	100
5.2.3	Probabilidades de Desenvolvimento	101
5.2.4	Previsão da Demanda da Carga de Estudo	102
5.2.5	Localização Temporal Utilizando o Algoritmo de Cenários.	102

***Capítulo 6 - Aplicação do Método de Previsão Espacial de Demanda para o Estudo de Cenários Utilizando um Sistema Multiagente*.....109**

6.1	COLETA DE DADOS	110
6.2	ANÁLISES DE CENÁRIOS	112
6.2.1	Cenário de uma Nova Carga Industrial	112
6.2.1.1	<i>Preparação dos Dados</i>	113
6.2.1.2	<i>Caracterização da Área de Serviço</i>	115
6.2.1.3	<i>Distribuição Espaço-Temporal das Novas Cargas</i>	116
6.2.2	Cenário de Mudança de uma Carga Existente	130
6.2.2.1	<i>Preparação dos Dados</i>	130
6.2.2.2	<i>Caracterização da Área de Serviço</i>	131
6.2.2.3	<i>Distribuição Espaço-Temporal das Novas Cargas</i>	131
6.3	CONCLUSÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO PARA ESTUDOS DE CENÁRIO NA PREVISÃO ESPACIAL.....	139

Capítulo 7 - Conclusões Finais**141**

7.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	143
7.2	TRABALHOS FUTUROS.....	143
7.3	PUBLICAÇÕES.....	144

REFERÊNCIAS**145**

Capítulo 1 - Introdução

A previsão de demanda de energia elétrica é de fundamental importância para todo setor elétrico, desde o momento de sua contratação até a distribuição da mesma. O conhecimento detalhado do consumo de energia elétrica permite a aplicação de programas de eficiência para a rede elétrica e de redução das perdas desta. As empresas de distribuição de energia têm como objetivo oferecer um serviço confiável e econômico na área de concessão para respeitar os padrões impostos pela lei vigente. Para estas empresas, a previsão de seus negócios futuros deve descrever a quantidade de potência que seus consumidores vão precisar e onde esta potência será demandada. Desta forma, a previsão fornecerá as informações necessárias para planejamento das redes de distribuição, permitindo a avaliação do volume de obras necessárias para seu reforço, ampliações e correções diversas, para levar a energia requerida onde seja necessário.

No planejamento de distribuição se presta uma especial atenção ao desenvolvimento de projetos de infraestrutura, como shoppings, estradas, ferrovias, entre outros, que modificam o uso do solo. Por exemplo, a construção de um shopping facilita o crescimento da

demanda residencial próxima da sua área de influência, mas a construção de uma rodovia facilita o crescimento da demanda industrial na área. A melhor forma de estudar tais projetos, e conhecer como modificam os planos de expansão das empresas concessionárias de serviço elétrico, é utilizar os planejamentos multicenários (WILLIS, 2002).

Na área de planejamento e no setor elétrico, em geral, é muito utilizada por profissionais e pesquisadores a palavra *carga* para referir-se à *demanda de energia* e o *consumo de energia elétrica*. Para Agência Nacional de Engenharia Elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL), a *carga* é a caracterização da demanda do sistema, em um determinado ponto de interesse, definida por uma ou mais das seguintes grandezas: potência ativa, demanda de energia ativa e demanda de energia reativa (ANEEL, 2008). Neste trabalho utilizou-se o termo “*carga*” que deverá ser entendido como demanda de energia elétrica.

1.1 PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA

A previsão espacial de demanda constitui a previsão de demanda futura de energia elétrica, fornecendo informações para identificar a sua localização dentro da área de serviço e a quantidade correspondente em cada subárea (WILLIS, 2002). Esta previsão é conhecida como previsão de pequena área ou, em alguns grupos, como planejamento por quadrícula, devido a área de estudo ser dividida em pequenas áreas para ilustrar o aumento de demanda elétrica distribuída geograficamente na área de serviço.

Na década de 80 este tipo de previsão foi de grande importância entre os profissionais da área de distribuição de energia. Anos depois, os estudos nesta área foram colocados em um segundo plano como consequência das mudanças que se apresentaram no setor elétrico. A mudança mais importante foi o surgimento dos mercados abertos de energia, resultando que o sistema elétrico é analisado e projetado por diferentes agentes com dependência entre si. Este fato fez com que a maioria dos profissionais focasse seus esforços no desenvolvimento e pesquisa de metodologias para minimizar custos de geração e maximizar custos de remuneração em mercados abertos.

Nas últimas décadas, devido ao crescimento normal do consumo, as redes de transmissão e distribuição estão atingindo um nível alto de esforço no qual se fazem necessários novos investimentos para manter a integridade do sistema e evitar os conhecidos *blackouts*, como os acontecidos no ano de 2003 nos Estados Unidos, (NERC, 2004); Itália, (BERIZZI, 2004); Sul da Suécia e leste da Dinamarca, (LARSSON; EK, 2004) e, também, no ano de 2009 no Brasil (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2009).

Por esta razão, o setor de distribuição tornou-se uma área de interesse nos últimos anos, principalmente devido a procura de maior eficiência por parte das empresas, reduzindo seus custos de investimento e, também, ao interesse na geração de energia distribuída, devido ao desenvolvimento das energias alternativas no mundo. Com isto, há a necessidade de retomar os estudos sobre o comportamento da rede e, especialmente, fazer o planejamento de médio e longo prazo das redes existentes, nas quais é de vital importância trocar as infraestruturas que se encontram no final de sua vida útil. As novas instalações devem acompanhar o grande e rápido desenvolvimento de algumas cidades devido as novas condições socioeconômicas mundiais.

As técnicas atuais para a previsão não consideram o crescimento dinâmico das cidades. Estas técnicas consideram a cidade com um ente estático. O crescimento urbano para cada cidade é diferente, mas nas etapas primárias seguem padrões similares. A geografia, a história e a economia de cada cidade alteram a forma e o tamanho de crescimento da cidade. Embora, podem-se mencionar alguns padrões que contribuem ao crescimento urbano geral, como: o crescimento do número de habitantes, o qual é tido como o maior fator de crescimento nas cidades em países em vias de desenvolvimento. Por outro lado, nos países desenvolvidos o crescimento atual é devido a migração como mostra um relatório elaborado pela Organização das Nações Unidas (DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS - DESA, 2008). Também o crescimento econômico mundial altera o crescimento urbano.

Para considerar o crescimento das cidades as empresas elétricas fazem estudos de planejamento de expansão considerando cenários. A maioria das ferramentas utilizadas por estas empresas elétricas realizam os estudos de cenários tendo em conta toda a área de serviço. No entanto, existem cargas especiais, nas quais sua preponderância é determinada por um raio de influência, e este raio de influência não abrange toda área de serviço. Deste modo, para o estudo desta classe de cargas não é necessário considerar toda a área de estudo. Os

métodos propostos neste trabalho permitem a simulação da influência desta classe de cargas nas vizinhanças, a qual pode ser utilizada como suporte das empresas de distribuição de energia elétrica para o estudo de cenários.

Para apoiar o processo de planejamento é de vital importância para as empresas efetuarem previsões de demanda confiável, tanto a longo quanto em curto prazo. A previsão de demanda em longo prazo é necessária para a contratação da energia e a de curto prazo é importante para se garantir que o sistema de distribuição opere dentro dos limites contratados, para evitar sanções.

No caso Brasileiro, este fato é ainda mais importante devido a grande pressão por parte da legislação existente (BRASIL, 2003). O novo modelo para o setor elétrico brasileiro estabelece que as concessionárias de distribuição e outros agentes de consumo devem garantir, por meio de licitação na modalidade de leilões, o atendimento à totalidade de seu mercado no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). O objetivo de tais leilões é propiciar a possibilidade, por parte das distribuidoras, de contratação antecipada de energia para o atendimento pleno de sua demanda estimada três a cinco anos à frente. É de vital importância para o desempenho operacional da distribuidora, a estimação da quantidade de energia nova necessária para atender ao crescimento de sua demanda ao longo destes cinco anos, pois a energia existente total do país pode ser insuficiente para atender ao total de carga demandada pelas distribuidoras. Por outro lado, a contratação de uma demanda maior do que a fornecida implica perdas financeiras para a concessionária, as quais toda empresa deseja evitar.

No novo modelo institucional do setor elétrico brasileiro, as distribuidoras estão autorizadas pela ANEEL a repassarem para as tarifas de energia os montantes contratados até o limite máximo de 103% de sua carga futura efetiva. Este limite aumenta a segurança do sistema, pois estabelece um limite de tolerância para o erro da previsão dos agentes distribuidores e reconhece a impossibilidade de uma previsão perfeita da demanda. Caso a distribuidora exceda o limite máximo, os ganhos serão apropriados por esta, mas as perdas também serão absorvidas. Tal sistema, sólido do ponto de vista do planejador, impõe à distribuidora de energia a necessidade de um alto grau de precisão, tendo que superar as incertezas pertinentes à previsão de demanda.

O setor de distribuição é considerado muito importante nessa nova etapa do sistema elétrico de potência. Este fato tem levado a novas e melhores leis para o setor elétrico. No

caso específico do Brasil, as novas leis de distribuição para as empresas elétricas encontram-se descritas nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), a qual impõe no item 4.2b do módulo dois (ANEEL, 2008), o uso da previsão de carga espacial nos estudos de expansão do sistema de distribuição de média tensão.

Atualmente, na maioria das empresas de distribuição, a previsão de demanda é feita unicamente para efeitos de compra de energia no correspondente mercado, e não para efeitos de planejamento da rede. Assim, não existe disponibilidade imediata de metodologias nem dados suficientes para se efetuar uma previsão espacial de demanda que inclua o crescimento dinâmico das cidades.

A previsão de demanda espacial divide a área de serviço em quadrículas, similar a um tabuleiro de xadrez. Para caracterizar cada quadrícula será necessário conhecer: localização geográfica, uso do solo, as informações socioeconômicas, classe de consumidores com sua demanda elétrica respectiva, entre outras. Uma contribuição dos métodos propostos é que expressa a demanda esperada de cada quadrícula como um número real, e não, como uma expressão linguística (baixa, média ou alta densidade), que é um dado de boa qualidade para realizar o planejamento de expansão da rede elétrica.

Deve-se considerar que quanto menor for o tamanho da quadrícula mais quadrículas se incluirão na área de serviço e, conseqüentemente, maior quantidade de dados serão requeridos para caracterizar o espaço de estudo.

Um dos principais problemas das empresas de distribuição para realizar uma previsão espacial de demanda é a falta de dados disponíveis. Por isso, o método mostrado neste trabalho, considera que as empresas do serviço público têm acesso somente à informação básica, como a base de dados comerciais dos consumidores e um registro de todas as instalações elétricas do sistema. Todos estes dados estão organizados em uma base de dados multidimensional, que permite extrair as informações relacionadas com as zonas específicas de acordo com as necessidades do método escolhido.

As técnicas atuais de previsão de demanda empregadas utilizam geralmente padrões em grande escala, aproveitando como modelo de crescimento um padrão determinado, calculado, preexistente, ou extraído do comportamento atual da cidade. Um dos principais problemas destes tipos de técnicas é que consideram a cidade como um ente estático, logo, todos os efeitos dinâmicos associados com o crescimento das cidades deixam de ser

considerados, e não se analisa fatores influentes na forma da cidade. Por exemplo, não é possível considerar o crescimento normal da cidade com o crescimento planejado ao mesmo tempo.

Como foi dito anteriormente, para considerar o crescimento da cidade as empresas realizam estudos de cenários. A maioria das ferramentas para realizar tais estudos considera toda área de serviço, dificultando a análise do efeito local de cargas especiais nas subáreas. Uma carga especial é aquela que sua preponderância só se apresenta dentro de um raio de influência, portanto, não será necessário considerar toda a área de concessão para a modelagem desta.

Deste modo, torna-se necessário o desenvolvimento de uma metodologia para a previsão espacial de demanda que permita modelar o crescimento das cidades de uma forma dinâmica e realize estudos de cenários, na qual simule a influência de cargas especiais, no entorno destas.

Entende-se por dinâmica urbana, o conjunto de processos espaço-temporal de categoria social, cultural, comercial e política que acontecem simultaneamente dentro de um espaço geográfico urbano. É criada pelas múltiplas interações entre as pessoas e os grupos de pessoas, como são as organizações públicas e privadas, lícitas e ilícitas, comerciais e altruístas, entre outras, que coexistem em uma cidade. Além disso, esta dinâmica urbana tem lugar nas vizinhanças, nos centros comerciais, nas áreas de moradia e no tempo.

Um exemplo de dinâmica urbana pode ser aquela criada pela construção de um novo shopping que se apresentará à cidade gerando uma nova demanda elétrica. Este novo shopping necessitará dos serviços existentes, como restaurantes para os empregados que trabalhem neste shopping e, posteriormente, precisará da criação de novos serviços, caso os atuais não sejam suficientes para supri-la. Esses novos serviços requererão de produtos para abastecer as necessidades do novo consumo, e conseqüentemente, refletirão na procura de serviços presentes no centro de atividades. Logo, o centro de atividades se comporta como um ponto de agregação de bens e serviços. Deste modo, esta dinâmica urbana pode ser simulada utilizando os conceitos de sistemas multiagentes (BATTY, 2007).

Os métodos propostos utilizarão os sistemas multiagentes para poder simular o crescimento dinâmico das cidades, dotando a cada agente com informações disponíveis para realizar uma previsão espacial de demanda.

1.2 AGENTES E SISTEMAS MULTIAGENTES (SMA)

Existem muitas formas de definir e classificar um agente, pois existem várias abordagens e diferentes pontos de vista adotados pelos diferentes pesquisadores. A definição de agente está associada às características e funcionalidades apresentadas pelo agente em questão.

Na definição do dicionário Aurélio (2004) um agente é uma pessoa que opera, agência ou age. Aquilo que produz, ou é capaz de produzir, determinado efeito. Esta definição dada seria no caso de um agente humano. No caso de agentes artificiais, as características acima citadas é também aplicável apesar de não haver uma definição universalmente aceita. No entanto, o que se tem visto é um consenso no fato de que agentes são entidades que se adaptam a um meio, reagem a ele e provocam mudanças neste meio.

A definição que se dá em Russel e Norving (2003) é que um agente pode ser visto como aquilo que percebe seu entorno através de sensores e que atua sobre ele mediante seus executores.

Wooldridge e Jennings (1995) adotaram duas definições gerais: noção fraca e noção forte de agentes. Na definição ou noção fraca de agentes, eles conceituam como sistemas computacionais, sendo hardware ou software, com certas propriedades tais como autonomia, habilidade social, reatividade e proatividade. Na noção forte de agentes, mais adotada pelos pesquisadores ligados a área de Inteligência Artificial, possui, além das propriedades citadas, noções relacionadas ao comportamento humano tais como o conhecimento, a crença, a intenção e a obrigação.

Um agente pode ser uma entidade física ou virtual (FERBER, 1999). Pode ser física quando o agente é alguma coisa concreta e que atue no mundo real, ou pode ser virtual quando é uma entidade abstrata tais como componentes de software.

Algumas comparações entre objetos e agentes são inevitáveis, porém, apesar de existir semelhanças, as diferenças são muito mais evidentes. Diferenças, segundo Weiss (2000), são o fato de agentes terem uma noção mais forte de autonomia em relação aos objetos, ser capazes de um comportamento flexível.

No geral, agentes seriam entidades de software autônomas que atuam em determinados ambientes para interagir com este e com outros agentes. Além de produzir ações e percepções sem requerer intervenções humanas constantes. Numa abordagem mais aplicada a Inteligência Artificial um agente ideal teria que ser capaz de funcionar continuamente e adquirir experiências e conhecimentos acerca do ambiente que está interagindo. Ou seja, ser capaz de “aprender” e tomar decisões a partir de situações diferentes. Na figura 1.1 representa-se um agente genérico.

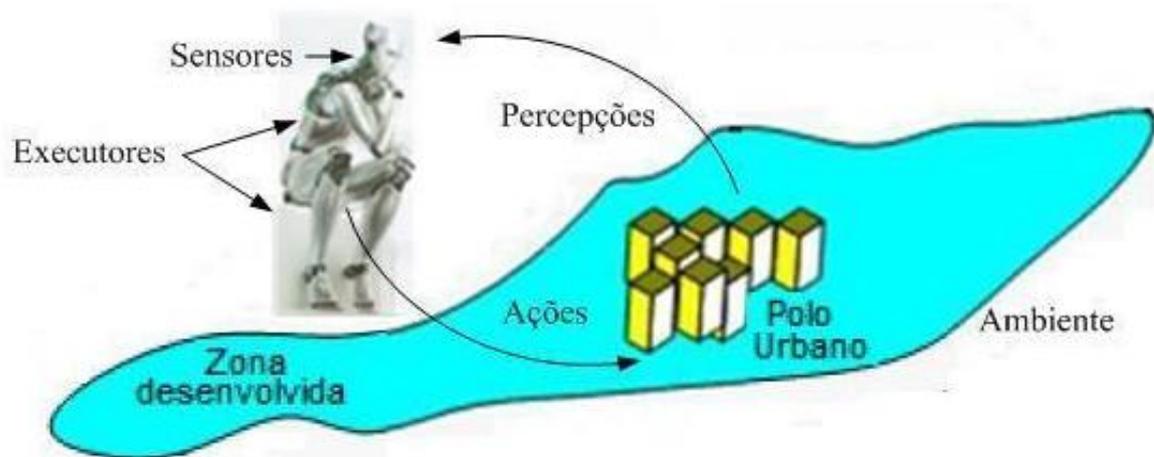


Figura 1.1 – Agente genérico de acordo com a Inteligência Artificial.

O trabalho de Wooldridge e Jennings (1995) mostra algumas propriedades que são essenciais para uma melhor caracterização do agente, como:

- *Autonomia*: característica que o agente inteligente deve ter para tomar decisões e ações importantes para a conclusão de uma tarefa ou objetivo sem a necessidade da interferência do ser humano ou qualquer outra entidade. Ser capaz de agir independentemente com seu ambiente através de seus próprios “sensores” ou com as suas próprias percepções com o objetivo de realizar alguma tarefa seja ela externa ou gerada por ele próprio;
- *Proatividade*: capacidade que o agente deve ter de tomar iniciativas. Eles não respondem simplesmente de acordo com o meio. Têm a capacidade de exibir comportamentos baseados em objetivos;
- *Reatividade*: capacidade de reagir rapidamente a alterações no ambiente. Percebe o meio e responde de modo oportuno;

- *Robustez*: ser capaz de tomar decisões fundamentadas em informações incompletas ou escassas, lidar com erros e ter uma capacidade de adaptação ou aprendizagem através da experiência;
- *Habilidade de comunicação*: capacidade de comunicação com repositórios de informações. Seja apenas repositório de dados, seja outro agente, ou seja, o próprio ambiente é fundamental uma constante troca de informações;
- *Raciocínio*: é talvez o aspecto mais importante que distingue um agente inteligente dos outros agentes. Afirmar que um agente tem raciocínio significa dizer que ele tem a capacidade de analisar e inferir baseado em seu conhecimento atual e nas suas experiências. Esse raciocínio pode ser: com regras predefinidas ou fundamentadas no conhecimento.

Para Weiss (2000) uma flexibilidade de ações tais como reatividade, proatividade e sociabilidade são suficientes para classificar um agente como inteligente.

Por fim, deve haver uma capacidade de cooperação: agentes inteligentes podem e devem trabalhar juntos para mútuo benefício na execução de uma tarefa complexa e um comportamento adaptativo, no qual possa examinar o meio externo e adaptar suas ações para aumentar a probabilidade de ser bem sucedido em suas metas.

Para garantir uma maior segurança e confiança ao usuário de que o agente vai representar fielmente seu papel com precisão, é fundamental também um alto grau de confiabilidade por parte do agente. Isso é necessário para que o agente simule e/ou represente da maneira mais possivelmente próxima da realidade.

Contudo, um agente não precisa ter todas essas características ao mesmo tempo. Existem agentes que possuem algumas características. Outros que possuem todas, o que é certo é que atualmente existe pouca concordância sobre a importância dessas propriedades e se é necessária sua obrigatoriedade para a caracterização de um agente. O consenso é que essas características tornam o agente muito diferente dos simples programas e objetos.

É possível fazer uma classificação de agentes de acordo com vários aspectos como quanto à mobilidade, quanto ao relacionamento interagentes e quanto à capacidade de raciocínio. Outra classificação de agentes, do ponto de vista da inteligência artificial, é que se pode classificar em três grandes grupos: agentes móveis ou estáticos; agentes reativos ou

proativos; agentes cooperativos, autônomos, com aprendizagem ou com uma mistura dessas características.

Object Management Group (OBJECT MANAGEMENT GROUP- OMG, 1998) define os conceitos de agentes estáticos e agentes móveis como segue:

- Agente estático: aquele que só pode ser executado na máquina onde foi iniciado. Se este necessita de uma interação com outros agentes o programa requer certas informações que não se encontram no sistema. A comunicação pode ser feita mediante qualquer método de interação para objetos distribuídos.

- Agente móvel: aquele que não está limitado ao sistema onde começou sua execução, sendo capaz de transportar-se de uma máquina à outra através da rede. Esta possibilidade lhe permite uma interação com o objeto desejado de forma direta sobre o sistema de agentes onde se localiza tal objeto. Também pode utilizar os serviços oferecidos pelo sistema multiagente destinatário.

Os sistemas multiagentes (SMA) são sistemas compostos por múltiplos agentes que exibem um comportamento autônomo, mas ao mesmo tempo interagem com os outros agentes presentes no sistema. O mundo real é um entorno de multiagente porque não se podem ignorar os outros agentes para alcançar as metas. Estes agentes exibem duas características fundamentais: serem capazes de agir de forma autônoma, tomando decisões que levam a satisfação dos seus próprios objetivos e serem capazes de interagir com outros agentes utilizando protocolos de interação social (RUSSEL; NORVING, 2003). Esses objetivos podem ser comuns a todos os agentes ou não. Os agentes dentro de um sistema multiagente podem ser heterogêneos ou homogêneos, colaborativos ou competitivos, etc. A definição dos tipos de agentes depende da finalidade da aplicação que o sistema multiagente está inserido.

Os sistemas multiagentes com agentes reativos são constituídos por um grande número de agentes. Estes são bastante simples. Não possuem inteligência ou representação de seu ambiente e interagem utilizando um comportamento de ação/reação. A inteligência surge conforme esses sistemas trocam de interações entre os agentes e o ambiente. Ou seja, os agentes não são inteligentes individualmente, mas o comportamento global sim.

Já os sistemas multiagentes constituídos por agentes cognitivos são geralmente compostos por uma quantidade bem menor de agentes, se comparado aos sistemas multiagentes reativos. Estes agentes cognitivos são inteligentes e contêm uma representação parcial de seu ambiente e dos outros agentes. Podem, logo, comunicar-se entre si, negociar uma informação ou um serviço e planejar uma ação futura.

Esse planejamento de ações é possível, pois em geral os agentes cognitivos são dotados de conhecimentos, competências, intenções e crenças, o que lhes permite coordenar suas ações visando à resolução de um problema ou a execução de um objetivo.

Os SMA constituem um campo relativamente novo. Embora o início da investigação neste campo se tenha dado nos anos 80, só em meados dos anos 90 esta ganhou uma notoriedade digna de destaque (WOOLDRIDGE, 2002). Ao longo dos últimos anos a investigação no campo dos sistemas multiagente tem sofrido um acentuado crescimento. Este crescimento levou ao aparecimento de periódicos, livros e conferências internacionais sobre o assunto.

Atualmente, a pesquisa em sistemas multiagentes está interessada principalmente na coordenação das ações e comportamentos dos agentes, como eles coordenam seu conhecimento, planos, objetivos e crenças com o objetivo de tomar ações ou resolver problemas.

Segundo Jennings, Sycara e Wooldridge (1998), alguns motivos para o crescimento do interesse em pesquisas com sistemas multiagentes são:

- A capacidade de fornecer robustez e eficiência;
- A capacidade de permitir interoperabilidade entre sistemas ligados;
- A capacidade de resolver problemas cujo dado, especialidade ou controle é distribuído.

Na atualidade, uma das ferramentas utilizadas pelos principais pesquisadores na área de urbanística aplicadas a outras áreas, que consideram o crescimento dinâmico dos centros urbanos, são as técnicas de sistemas multiagentes. Como se mostrará neste trabalho os sistemas multiagentes apresentam vantagens para modelar a complexidade urbana, devido a que proporcionam um modelo útil e potente, capaz de modelar os complexos processos de interação entre as pessoas e os ambientes urbanos que eles mesmos criam. Uma grande

vantagem de usar este tipo de modelo é que fatores extremadamente subjetivos, reais ou simbólicos podem ser incorporados. Aproveitando essa vantagem, neste trabalho dotam-se os agentes com informações de densidade de demanda e probabilidades de desenvolvimento para obter a previsão espaço-temporal da cidade em estudo.

O principal objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia de previsão espacial de demanda elétrica para sistemas de distribuição que considere o crescimento dinâmico da cidade e que permita simular as influências de cargas especiais nas vizinhanças. Para cumprir este objetivo propõe-se utilizar os sistemas multiagentes.

Além de cumprir o objetivo principal será necessário cumprir uma série de objetivos específicos como:

- Determinar uma estrutura especializada para uma base de dados espacial de forma a aproveitar os dados disponíveis;
- Desenvolver uma modelagem espacial adequada para as características do problema visando cumprir a lei vigente;
- Avaliar as distintas metodologias existentes de simulações espaço-temporal usando sistemas multiagentes, como agentes caminhantes e agentes de dispersão;
- Desenvolver uma metodologia especializada considerando as características do problema, adequando os operadores utilizados em outras metodologias e criando novos operadores desde que seja necessário;
- Testar a metodologia em um sistema de distribuição real.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Evidenciou-se, na década de 50, que a complexidade do planejamento do sistema de distribuição pode ser simplificada tomando em conta uma uniformidade de densidade de carga e uma forma regular geométrica. Os resultados obtidos por esta suposição ratificam a importância de modelar o sistema de uma forma espacial (VAN WORMER, 1955). Os primeiros métodos computacionais de previsão espacial foram desenvolvidos através da curva de demanda aplicando-se uma regressão múltipla a fim de extrapolar as tendências da demanda.

A partir dos anos 60, outros processos foram desenvolvidos, por exemplo, o uso de solo, ou seja, estudavam as relações entre as classes de consumidores, o solo e a sua respectiva densidade de carga na área de interesse para previsão de demanda conforme a intuição do planejador (LAZZARI, 1962). Lazzari realizou vários testes com a finalidade de melhorar o planejamento de expansão da rede elétrica. Dos testes, o que merece destaque foi o experimento desenvolvido através de uma quadrícula de 1-milha na qual se utilizou um programa que permitiu modelar a densidade de carga. Tal programa trabalhava com uma curva em forma de sino tridimensional onde o ponto máximo da curva representava o centro da cidade, sendo que todos os pontos ao longo da curva denotavam a posição da quadrícula e sua densidade de carga, localizada no eixo Z. As previsões foram realizadas extrapolando o volume desta curva; expandindo para cima a densidade de carga e para fora a fim de cobrir novos territórios.

A partir dos anos 70, a evolução computacional comportou a utilização de novas metodologias, que posteriormente permitiram o desenvolvimento dos primeiros programas computacionais comerciais para previsão de demanda, descritos a seguir: Previsão de carga por regressão múltipla para planejamento do sistema de distribuição, (MENGE, 1977); modelo urbano aplicado na previsão de demanda elétrica, (WILLIS, 1977); previsão espacial considerando curvas de demanda de 24 horas para cada classe de consumidor e cenários para os eventos futuros, (WILLIS; GREGG; CHAMBERS, 1978).

Os métodos supracitados exigem que as quadrículas sejam organizadas em pequenas áreas geográficas a fim de que se obtenha uma alta resolução espacial para uma análise mais precisa (WALL; THOMPSON; NORTHCOTE-GREEN, 1979). Outra técnica adicional, que busca ter uma alta resolução, trata-se daquela que se fundamenta no uso do solo para cada subárea dentro de um polígono regular (BACKLUND; BUBENKO, 1979).

Uma grande quantidade de trabalhos na área surgiu até o ano de 1983. A maioria desses trabalhos foi organizada em um tutorial que coleta as principais metodologias aplicadas ao problema (WILLIS; NORTHCOTE-GREEN, 1983). Esse tutorial serviu como documento base para muitos trabalhos seguintes. Dentre os vários modelos desenvolvidos por diversos autores destacam-se o modelo multivariado EMPIRIC, baseado no modelo de análise urbana combinando o zoneamento e adequação de entrada manual, com um valor de carga único para cada classe de consumidor, (EPRI, 1978); método de uso de solo não analítico, foi o primeiro método de simulação moderno, ELUFANT (WILLIS; GREGG; CHAMBERS,

1977); e o programa baseado no anterior incluindo cálculos simplificados da função de preferência, CEALUS (WILLIS, 2002).

Um trabalho para a previsão de carga de pequenas áreas, com o objetivo de diminuir o esforço computacional nos computadores da época, foi apresentado em Willis e Parks (1983). Para isto se empregaram técnicas de processamento de sinais, como a transformada rápida de Fourier, para gerar mapas de preferências com as distâncias euclidianas ao centro de atividade.

Em Willis, Engel e Buri (1995) é mostrada uma metodologia de previsão espacial de carga que utiliza análise e projeções de dados de uso final do solo. São usados blocos de imagens de satélite, dados de consumidores, dados de medições de carga, e curvas de uso final para calibração e o ajuste da base de dados do ano referência. É realizada a previsão de carga baseada em quadrículas, em que três estágios são indicados para atingir os resultados buscados e na qual o estágio final converte a projeção de densidade de futuros consumidores sobre uma quadrícula base, estimando assim a carga elétrica e aplicando modelos de carga de uso final sobre a classe consumo. Ao final se mostra uma comparação desta metodologia com os métodos de tendência, mostrando que apesar de ser o método proposto mais lento os resultados fornecidos são mais precisos.

Um sistema inteligente híbrido de previsão de carga para longo prazo foi apresentado em Parlos, Oufi e Muthusami (1996). Neste trabalho, utilizam-se uma rede neural artificial e base de dados históricos anuais como; temperaturas, ajuste de preço da eletricidade, área de serviço de consumidores, população e outros indicadores econômicos tais como, o aumento de renda per capita real e o produto interno bruto.

Em Mo-Yuen e Hahn (1996a) é apresentada uma aplicação de lógica nebulosa para a previsão espacial de carga baseada em uso do solo e dividindo a área de serviço em quadrículas. As relações entre os diferentes elementos que podem modificar a preferência do uso do solo foram modeladas com tabelas de preferências, permitindo o uso dos operadores da lógica nebulosa para gerar os mapas de preferência. O crescimento da demanda foi encontrado através de uma equação matemática que descrevia o crescimento para cada quadrícula.

Em Mo-Yuen e Hahn (1996b) foram apresentadas teorias e metodologias para incorporar considerações de redesenvolvimento urbano na previsão de carga espacial. São

usados mapas de preferências comparando o valor atual das quadrículas, com o valor que poderiam ter de acordo com as características do seu entorno, como a proximidade a pontos de interesse, disponibilidade de terra e características geográficas.

No trabalho de Chow, Zhu e Tram (1998), é apresentado um método de tomada de decisão multiobjetivos em previsão espacial de carga utilizando a proposta de Yager. Esta metodologia consiste em que cada objetivo tenha seu peso relativo em relação aos outros. Entre os objetivos considerados estão às preferências dos usuários em relação a sua localização a distintas partes da cidade, assim como os custos dos terrenos.

Um trabalho sobre a previsão de carga em ambiente competitivo foi apresentado em Wu, Tsa e Lu (1999). Esse trabalho integra ferramentas de informação geográfica para automação de mapas. A teoria do “cluster” é utilizada para determinar automaticamente o número de regras e funções de pertinência de modelos nebulosos que determinam os resultados das quadrículas em relação à possibilidade de mudança de carga. A densidade de carga neste trabalho não é um valor discreto, mas sim um valor real.

Em Miranda e Monteiro (2000) é apresentada uma metodologia que utiliza um modelo de inferência nebulosa para determinar um conjunto de regras de classificação que permitem caracterizar as preferências do uso do solo. O sistema de inferência nebuloso alimenta informações para uma máquina de autômatos celulares que aloca as cargas espacialmente.

No trabalho de Vasquez-Amez et al. (2008), foi desenvolvido um método de previsão espacial de energia elétrica que concertou as imagens aéreas da cidade, para identificação da saturação de cada pequena área com os processos estatísticos aplicados no desenvolvimento da cidade.

Nos últimos anos foram realizados trabalhos importantes com o fim de melhorar a previsão de demanda espacial aplicando conceito de extração do conhecimento e heurísticos com a finalidade de melhorar a previsão espacial, como: conceitos da teoria da incerteza para modelar um sistema visando determinar as preferências do uso do solo, as regras são extraídas da informação espacial usando conceitos de mineração de dados (YANG; YUAN; ZHANG; MAO, 2006); aplicação de um heurístico evolutivo para gerar novas regras para determinar o futuro uso do solo (CARRENO; PADILHA-FELTRIN, 2008), os resultados obtidos deste último serão utilizados como dados de entrada para os métodos propostos de sistemas multiagentes.

Aplicações de sistemas multiagentes, utilizados para estudar o comportamento das distintas situações nos centros urbanos podem ser encontradas em: segurança do transporte aéreo, (PRITCHETT et al., 2002); tráfego nas rodovias, (KHALESIAN; DELAVAR, 2008); deslocamento da criminalidade, (BOSSE; GERRITSEN; HOOGENDOORN, 2008).

Por outro lado, sistemas multiagentes aplicados no setor elétrico podem ser encontrados em: MASCEM um sistema multiagente que simula a competição de mercados elétricos, que permite a combinação bilateral de mercados de comércio e mercados afins a este e também adicionar entidades cambiantes como comerciantes de eletricidade (PRACA; RAMOS; VALE; CORDEIRO, 2003); Soporte multiagente em tempo real para a administração de energia elétrica, neste trabalho foram consideradas as necessidades dos consumidores e também os problemas dos produtores através de um controle distribuído e com autonomia local (WEDDE; LEHNHOFF; HANDSCHIN; KRAUSE, 2006); sistema baseado em agentes para a proteção de dispositivos elétricos, na qual foi mostrada uma arquitetura multiagente para dispositivos elétricos de controle e proteção, esta foi aplicada a um transformador de potência (IPPOLITO; SIANO, 2004).

Trabalhos de sistemas multiagentes aplicados na previsão espacial de demanda podem ser encontrados em: evolução do consumo da energia elétrica considerando os fenômenos sociais por meio de agentes (ARANDA; BOROBIA; VÁZQUEZ, 2007); previsão espacial de demanda sobre um sistema de agentes, utilizando faixas de consumo para representar a densidade de carga para cada subárea (CARRENO; PADILHA-FELTRIN, 2009), as faixas de consumo são uma representação linguística do nível esperado de demanda, por exemplo, baixo, médio ou alto. Os métodos desenvolvidos e apresentados neste trabalho diferenciam-se do sistema de agentes desenvolvido por Carreno e Padilha-Feltrin (2009), em expressar a demanda esperada de cada subárea como um número real e não como uma expressão linguística (baixa, média ou alta demanda), esta quantidade é um dado de boa qualidade que ajuda aos planejadores a definir a expansão de alimentadores, a expansão das subestações, entre outras informações importantes para o planejamento de expansão da rede elétrica. Além disso, os sistemas multiagentes que se apresentam também permitem o estudo de cenários, modelando a influência de cargas especiais nas vizinhas desta.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura deste trabalho é a seguinte:

- No Capítulo 2, é apresentada uma visão geral sobre as metodologias de previsão espacial de demanda;
- No Capítulo 3, é apresentado o método proposto para realizar a previsão espacial de toda a área de serviço, este método é a aplicação da metodologia de sistema multiagente na previsão espacial de demanda, neste capítulo será explicado o algoritmo geral a seguir;
- No Capítulo 4, é apresentada uma aplicação do método proposto no capítulo 3 e os resultados obtidos por este método em uma cidade real;
- No Capítulo 5, é apresentada a principal contribuição deste trabalho, que é o método proposto para estudo de cenários, este método é a aplicação da metodologia de sistema multiagente na previsão espacial de demanda. Neste capítulo será explicado o algoritmo geral;
- No Capítulo 6, é apresentada uma aplicação do método proposto no capítulo 5 e os resultados obtidos por este método considerando dois cenários e,
- No Capítulo 7, são apresentadas às conclusões finais e os trabalhos futuros a desenvolver.

Capítulo 2 - Visão Geral das Metodologias de Previsão Espacial de Demanda

Neste capítulo apresentam-se as metodologias empregadas nos estudos tradicionais de previsão de demanda e as metodologias de previsão de demanda já desenvolvidas para o setor elétrico por outros pesquisadores.

2.1 PREVISÃO DE CARGA TRADICIONAL

No atual ambiente do setor elétrico, a previsão de demanda é um dos passos mais importantes no processo do planejamento e operação das empresas do setor elétrico. A confiabilidade, eficiência e economia do sistema de distribuição dependem da localização dos elementos da rede dentro da área de serviço e da sua capacidade para poder abastecer a demanda elétrica. Assim, as empresas necessitam determinar com precisão as grandezas de

demanda de consumo de energia, assim como a localização geográfica das cargas elétricas no horizonte de planejamento.

O horizonte de planejamento pode estar sujeito ao país ou a atividade de estudo. Os mais reconhecidos são:

- Curtíssimo prazo: 15 minutos – 24 horas;
- Curto Prazo: 24 horas – 1 mês;
- Médio Prazo: 1 mês – 3 anos;
- Longo Prazo: 3 anos – 15 anos.

No novo modelo para o sistema elétrico brasileiro se estabelece que o planejamento da expansão deva ser desenvolvido em três etapas (BRASIL, 2003):

- Monitoramento das condições de atendimento: 5 anos, atualizado mensal/semestral;
- Planejamento de médio prazo: 10 anos, atualizado cada 1 ano até 5 anos;
- Planejamento de longo prazo: 20 anos, atualizado cada 4 anos.

Já as empresas de distribuição no Brasil devem contemplar prazos de 10 anos com periodicidade anual em previsão de demanda para os sistemas de distribuição de alta tensão e 5 anos com periodicidade anual nos sistemas de distribuição de média tensão (ANEEL, 2008).

As técnicas atuais para previsão de demanda elétrica, utilizadas pelas empresas de distribuição, envolvem geralmente a determinação de padrões em grande escala, utilizando para isto bases de dados multidimensionais de grande tamanho e um determinado modelo de crescimento padrão, calculado, preexistente, ou extraído do comportamento atual da cidade, que geralmente considera os efeitos das vizinhanças.

A previsão de demanda tradicional procura responder as questões: *quanto* de demanda se precisará no sistema elétrico, para o desenho da capacidade de novas instalações, e também *quando* será demandada, dentro de um horizonte de estudo, para o planejamento financeiro, como se pode observar na Figura 2.1.

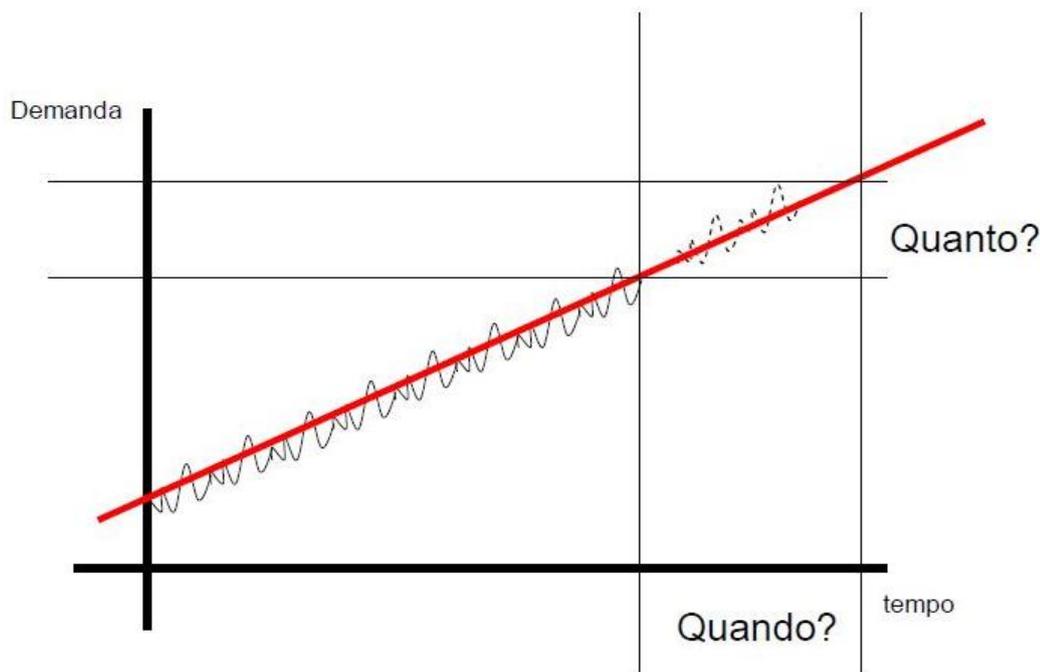


Figura 2.1 – A previsão de demanda tradicional é a determinação de quanta demanda será requerida e quando.

A demanda do sistema é um processo estocástico, não estacionário, composto por muitos componentes individuais. O comportamento da demanda do sistema é influenciado por fatores como: temporais, climáticos, aleatórios, sazonais, entre outros. Devido ao fenômeno aleatório da demanda, o valor da demanda não pode ser determinado de forma exata para o futuro. Por isso, devem ser feitas previsões com um nível de incerteza aceitável.

A previsão de demanda tem sido estudada por diferentes pontos de vista com o fim de obter bons resultados. Técnicas como regressões, sistemas inteligentes, redes neurais artificiais e avaliações multiobjetivo tem sido utilizadas com diferentes bases de dados. Estas diferem em complexidade, funcionalidade e procedimentos de estimativa para resolver o problema da previsão de carga.

Na literatura especializada podem-se encontrar distintas revisões sobre métodos de previsão, como: técnicas de previsão de demanda para o curto prazo considerando informações e condições meteorológicas, (MATTHEWMAN; NICHOLSON, 1968); revisão das diversas metodologias on-line e off-line para a previsão de demanda no curto prazo, (ABU EL-MAGD; SINHA, 1982); análise e avaliação de cinco técnicas para a previsão de carga no curto prazo mostrando algumas recomendações sob a experiência, (MOGHRAM; RAHMAN, 1989).

Alfares e Nazeeruddin (2002) realizaram uma categorização das técnicas de previsão de demanda, mostrando as vantagens e desvantagem de cada técnica. Esta categorização considera nove grupos descritos a seguir:

- Regressão múltipla;
- Aproximação exponencial;
- Séries de tempo;
- Previsão de carga adaptativa;
- Séries de tempo estocástico;
- Modelos ARMAX baseados em algoritmos genéticos;
- Lógica nebulosa;
- Redes neurais;
- Sistemas especialistas baseados em conhecimento.

Os métodos supracitados, segundo Willis (2002), podem ser agrupados em duas categorias. Métodos de simulação, que oferecem adequada precisão, mas requerem uma grande base de dados e um maior esforço computacional. E, por outro lado, os métodos de tendência de consumo histórico que são rápidos e simples de programar, mas algumas vezes fornecem uma baixa precisão nas previsões de curto prazo.

As técnicas de previsões mencionadas nesta seção não compõem parte do enfoque deste trabalho. Estas técnicas foram apresentadas para mostrar as ferramentas disponíveis e que são comumente utilizadas pelos pesquisadores e diversas empresas do setor elétrico.

2.2 PREVISÃO ESPACIAL DE DEMANDA

A fim de realizar um planejamento de expansão eficiente da rede elétrica com uma viabilidade econômica e técnica, para manter os consumidores satisfeitos pela qualidade do serviço prestado, as empresas precisam identificar onde a carga será localizada e quanto em cada localidade. A previsão espacial de demanda ajuda a responder estas questões, ajudando assim os planejadores a alcançar os objetivos das empresas elétricas.

A previsão espacial de demanda faz uma análise espacial para identificar onde a demanda será localizada dentro da área de serviço e quanto corresponde em cada subárea. Este tipo de previsão vem ganhando especial importância durante os últimos anos em razão do rápido crescimento das cidades nos países com economias emergentes, devido a melhoria do estilo de vida e incremento das migrações do interior para as cidades com maior desenvolvimento.

A seguinte revisão está baseada no livro (WILLIS, 2002), que é considerado uma das maiores fontes de informação disponíveis na área.

2.2.1 Crescimento Espacial da Carga

A demanda apresenta um crescimento vertical (densidade de carga) e um crescimento horizontal (novos consumidores). Esta pode variar em uma região por dois motivos:

1. Chegada de novos consumidores na área de serviço;
2. Mudanças no comportamento dos consumidores devido a agentes externos (troca de fontes de energia, aquisição ou troca de equipamentos, entre outros).

Devido a violência, poluição, políticas de racionamento de energia ou qualquer outro fator perturbador para a demanda, pode-se apresentar uma redução desta. Esta classe de comportamento precisará de uma grande base de dados e pode ser modelado considerando cenários. A simulação desta está fora do enfoque deste trabalho.

Geralmente, a principal causa do aumento na demanda é a chegada de novos consumidores na região, pois as mudanças no comportamento dos consumidores existente não afetam muito o consumo em geral, a menos que seja uma mudança drástica (troca de eletricidade por gás, por exemplo), que são pouco comuns.

O crescimento da demanda que será localizada em áreas previamente vazias é o objetivo geral da previsão da expansão da rede de distribuição, porque é precisamente nestes lugares que será necessário instalar novos dispositivos. O incremento no consumo per capita

está distribuído em áreas com dispositivos já existentes, e a velocidade do crescimento é baixa.

Quando o crescimento da carga é analisado em pequenas áreas, é muito diferente de uma análise feita para o sistema total. O crescimento geral é caracterizado por uma série temporal que tem como característica uma tendência de crescimento contínuo, com interrupção apenas por fatores externos (Figura 2.2). Porém, à medida que se começa a analisar regiões menores, este crescimento contínuo é substituído por um crescimento de curva em S, em que se podem identificar três regiões. A primeira é uma região que não tem crescimento, isto é, quando a região não tinha consumidores. A segunda é um rápido crescimento devido à chegada de consumidores e a aquisição de novos aparelhos para suprir suas necessidades, e finalmente um período de estabilização no qual o crescimento é muito baixo comparado com o crescimento da etapa anterior e fica estável, como mostrada na Figura 2.3.

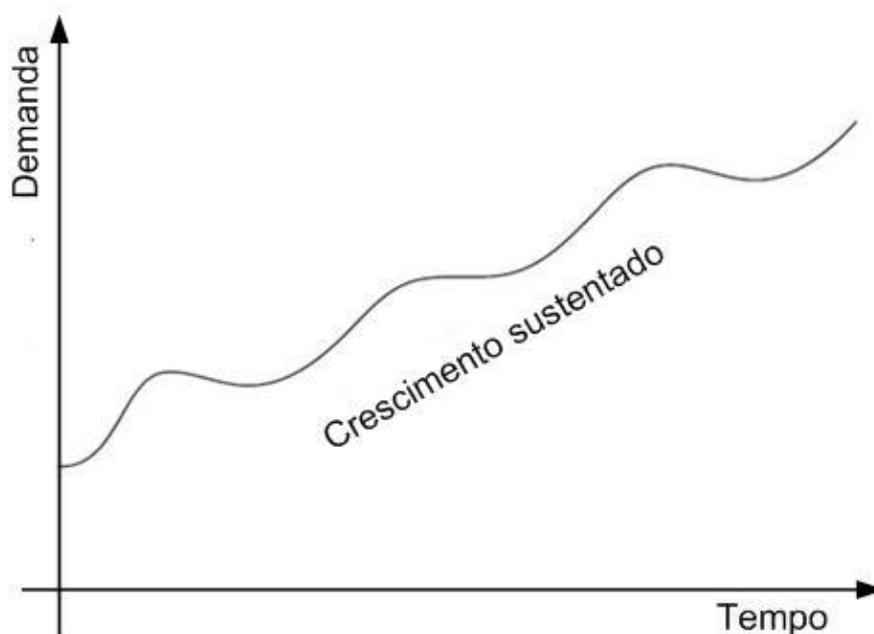


Figura 2.2 – Crescimento geral esperado considerando toda a área de serviço.
Fonte: Carreno (2008).

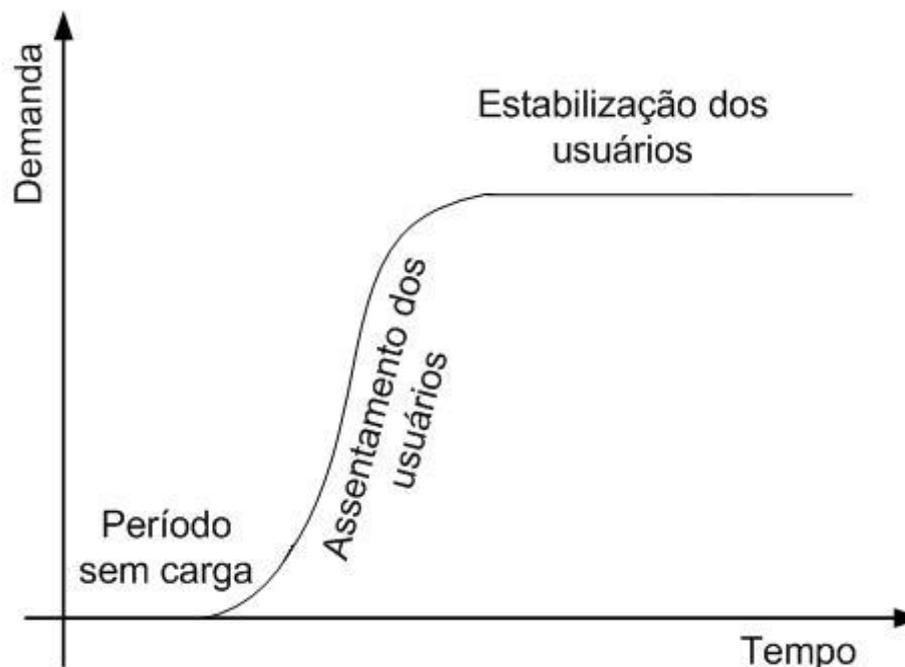


Figura 2.3 – Crescimento específico esperado ao analisar o comportamento em pequena escala, no mesmo período de tempo.

Quase todos os métodos de previsão espacial de demanda fazem uma previsão total da área de serviço, que logo depois será distribuída nas pequenas áreas. Há duas razões para isso ser realizado:

- Primeiro: há um investimento maior dentro das empresas elétricas para prever o aumento total da demanda do sistema sendo motivado pelo planejamento financeiro, pois considera as rendas do mercado elétrico e a necessidade do planejamento da geração de energia elétrica. Os investimentos são altos e os erros obtidos ao longo dos anos foram pequenos, podendo ser considerados confiáveis;
- Segundo: na maioria das empresas elétricas, os projetos de engenharia serão aprovados caso forem compatíveis com o planejamento financeiro. Portanto, para que haja aprovação de um plano de expansão, terão que ser analisados a previsão total do sistema e o planejamento financeiro.

2.2.2 Resolução da Previsão

Willis e Northcote-Green (1983) mostraram uma série de métodos para prever a demanda de energia elétrica de uma forma espacial. Em todos eles, a área de serviço é dividida em pequenas subáreas com a finalidade de interpretar informação em uma forma espacial. Estas podem ser de tamanhos e formas distintas, sujeitos ao tipo de aplicação. As áreas quadradas iguais divididas por uma grade facilitam as simulações realizadas por computador. Outros tipos de divisões têm sido feitos, por exemplo, considerando a área de influência de alimentadores ou transformadores (por equipamentos).

Em Willis, Power e Tram (1992) foi apresentado um método de tendência adotando como divisão as áreas de influência dos alimentadores. O método expõe as previsões de curto prazo que são de uma precisão comparável aos métodos de simulação, mas exigem mais dados que os métodos de regressão com um maior esforço computacional.

A previsão por equipamentos tem a vantagem de ter informações disponíveis para fazer previsões mais precisas em um nível geral. Por exemplo, de carregamento de certo alimentador, mas possui a desvantagem de ter pouca densidade espacial para ser útil.

A principal vantagem das grades, fora do aspecto computacional, é que se pode chegar a resoluções espaciais baixas. As regiões pequenas podem dar mais precisão no momento de localizar as novas cargas, porém necessitam de mais dados. Portanto, a resolução sempre será determinada pelos dados disponíveis e pelo método a utilizar.

Nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 apresentam-se três representações distintas da mesma região de estudo, na mesma escala. Na Figura 2.4 apresenta-se uma divisão por equipamentos, na Figura 2.5 apresenta-se uma grade de grande dimensão onde é difícil selecionar áreas específicas, mas precisa de poucos dados. A Figura 2.6 apresenta o mesmo mapa dividido em grades de pequena dimensão. É mais fácil selecionar áreas individuais, mas requer uma maior quantidade de dados.

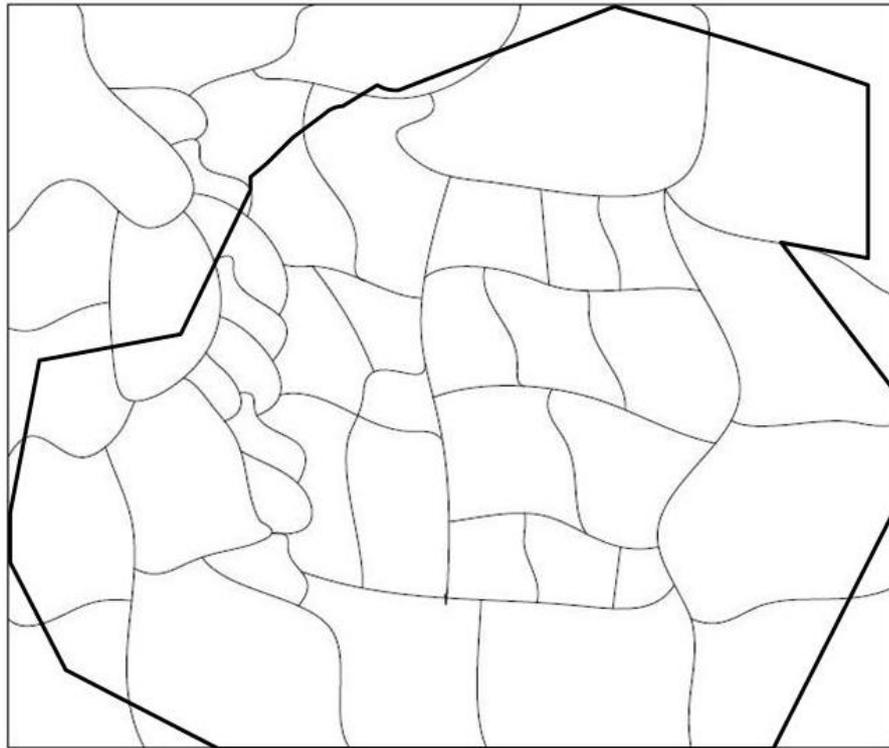


Figura 2.4 – Mapa de uma região com tamanho de áreas distintas para representar as áreas de influência por alimentador.

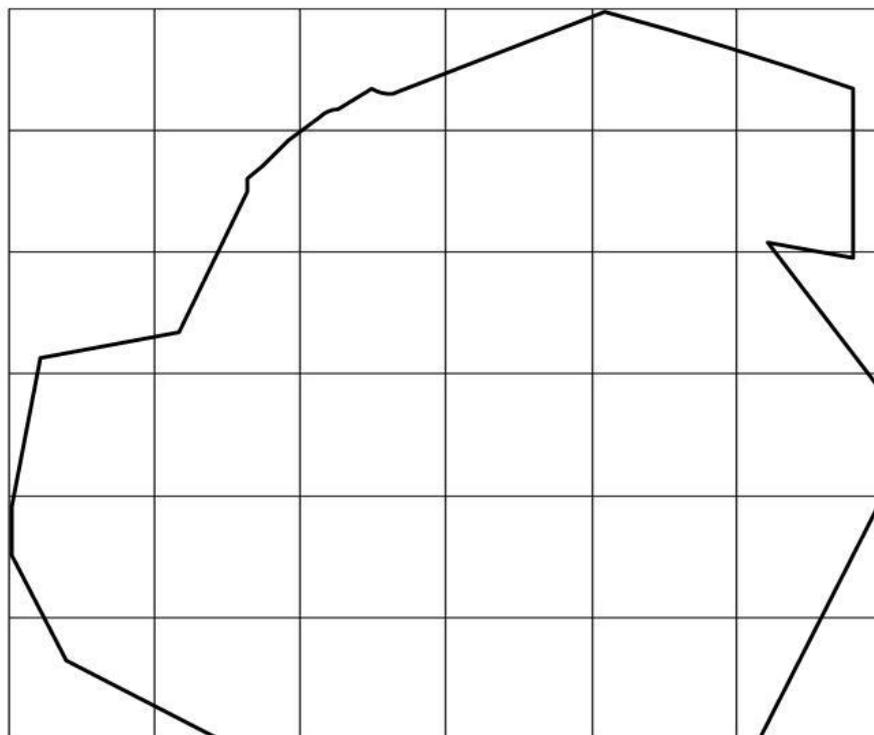


Figura 2.5 – Mapa de uma região dividido em uma grade de tamanho grande. É difícil selecionar áreas específicas, porém não necessita de muitos dados.

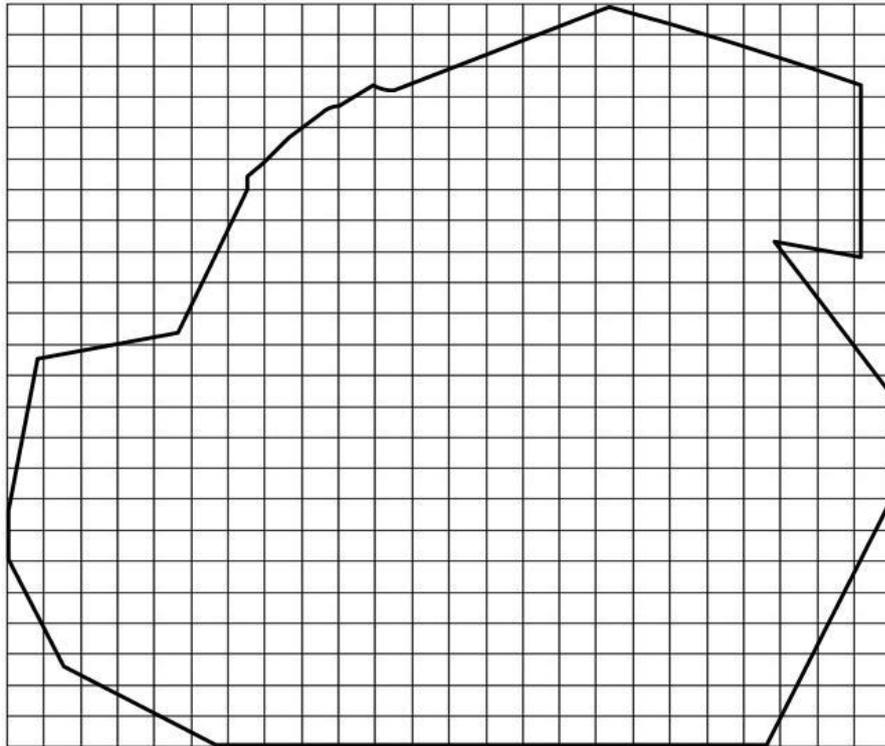


Figura 2.6 – Mapa de uma região dividida em uma grade pequena. É fácil de analisar regiões separadas, mas precisa de uma quantidade maior de dados.

Quando as áreas são menores é mais evidenciado o fenômeno da curva de crescimento de carga em formato de *S*. Quanto maior é a resolução tem-se: uma maior quantidade de áreas sem carga, uma maior quantidade de áreas a serem consideradas para ter carga no futuro e também conseguir uma melhor representação do comportamento de crescimento de cada uma delas.

Assim, as dinâmicas observadas do crescimento de carga são diretamente ligadas à resolução adotada para a modelagem da área de serviço.

2.2.3 Exigências de Dados

Qualquer método de previsão espacial precisa de uma grande quantidade de dados para ter bons resultados. Quanto maior é a resolução espacial adotada, maior é a quantidade de dados requerida, devido ao fato de ser necessário caracterizar cada uma das subáreas em

estudo de forma clara, tendo isso como a maior dificuldade na aplicação deste tipo de previsão.

Segundo Willis (2002), os dados necessários para uma metodologia básica de previsão de carga são:

- Descrição física da rede;
- Histórico de pelo menos 10 anos de demanda máxima no nível de alimentadores/subestações;
- Informação socioeconômica da região;
- Conhecimento urbanístico sobre a região de estudo e mapas de zoneamento, rodovias, loteamento, entre outros.

Alguns dados são difíceis de obter, pois não estão disponíveis para o domínio público ou se tem complicações técnicas envolvidas na sua obtenção, tais como os históricos de demanda máxima. Neste caso, é necessário utilizar ferramentas que permitam obter esses históricos através de outros dados, como a base de dados comercial de consumo de energia, a qual é obtida por medições mensais nos consumidores finais, sendo estes os dados semelhantes mais representativos. O problema de usar esses dados são os erros de medição que serão incorporados nos dados no momento de converter a energia consumida mensal em demanda máxima.

Outro tipo de dado a ser considerados são os dados pertencentes à distribuição do espaço físico e as interações entre eles. Esses dados, geralmente, são de domínio de poucas pessoas em uma cidade e são de difícil codificação para serem aproveitados.

2.2.4 Polo Urbano

Nas cidades modernas, as classes sociais têm a preferência de ficarem mais próximas possíveis do centro da cidade ou centros de atividades, tanto para oferecer seus produtos ou para adquirir outros. Para representar essa tendência é utilizado com frequência o modelo de “polo urbano” (observe-se Figura 2.7).

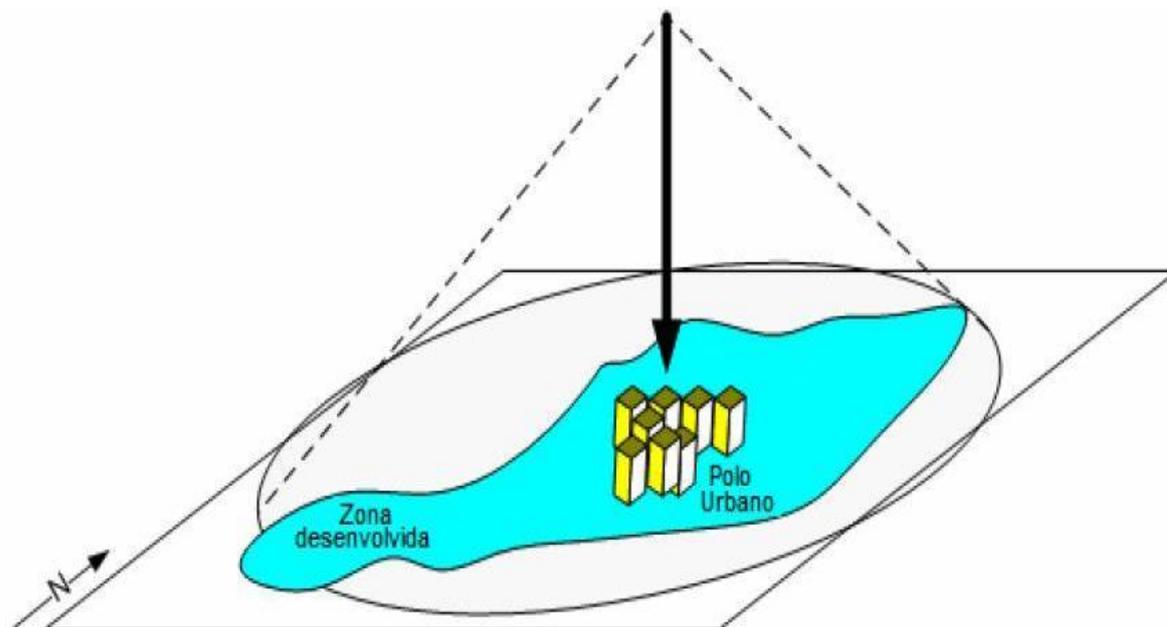


Figura 2.7 – O modelo de polo urbano representa a influência de um ponto específico de forma decrescente com a distância.

Fonte: Carreno (2008).

O “polo urbano” modela a influência de atrair outros usuários para ele. A influência do polo urbano é maior no centro da cidade e vai diminuindo à medida que a distância aumenta. O polo urbano é interpretado e aplicado como um modelo de preferência dos residentes para estar perto das principais atividades econômicas, laborais, de lazer, entre outras. Mas esta preferência não pode ser normalmente materializada, devido ao fato de não haver mais espaço disponível e, portanto, os moradores são forçados a escolher uma localização retirada do polo urbano, porém ficando o mais próximo possível em termos práticos e de acordo com as circunstâncias.

A influência do polo urbano vai determinar dois tipos de modelos. O primeiro é o modelo de gravidade onde a influência é uma função inversa da distância, não necessariamente proporcional. O segundo é o centro de atividades, onde a influência é concentrada no centro da cidade.

Os centros de atividades são concentrações de grupos residenciais, comerciais, laborais ou culturais, entre outros, que podem influenciar e modificar o comportamento dos seus arredores. O modelo de gravidade é aplicado para representar a influência em lugares perto e também longe.

O atributo “distância”, neste contexto, é considerado como tempo de viagem de carro ou meio de transporte público, não como uma distância linear entre dois pontos. Entretanto, para simplificar os cálculos, é assumido que o tempo de viagem seja proporcional à distância linear entre dois pontos. Isto é verdadeiro especialmente para cidades pequenas e médias, onde o sistema viário não é muito complexo. Esta simplificação apresenta bons resultados para cidades com uma população menor a 1 milhão de habitantes (WILLIS, 2002).

Em cidades de porte maior, é comum modelar a cidade como um sistema com vários polos urbanos. O programa ELUFANT (GREGG, 1978) foi um dos primeiros em utilizar este conceito, representando a cidade de Houston com 11 centros de atividades, cada um com uma função de polo urbano.

Geralmente, o centro da cidade será o centro principal de atividades, e os demais são representados por grandes áreas industriais, centros de negócios, centros de comércio, e outros. Em geral, esses centros referem-se a qualquer área que represente uma grande concentração de emprego ou atividade comercial. Uma característica importante é que a influência é aditiva na interseção da área de influência de dois polos, modelando a preferência de um usuário de estar perto de vários polos ao mesmo tempo (observe-se Figura 2.8).

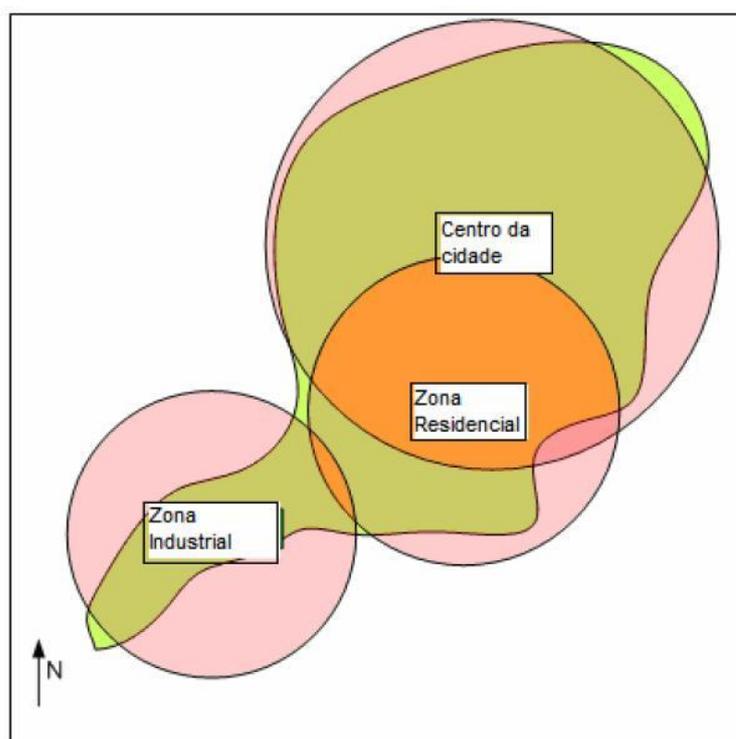


Figura 2.8 – Mapa da região considerando diferentes polos urbanos.
Fonte: Carreno (2008).

2.2.5 Determinação de Mapas de Preferência

O mapa de preferência ilustra, para cada subárea, a probabilidade de alguma mudança na demanda. As preferências dos grupos sociais por cada subárea ou a preferência por uso do solo é utilizada para localizar os novos usuários na área de serviço.

Diferentes técnicas têm sido empregadas para esse fim. A primeira técnica é a simulação manual explicada em detalhe em (WILLIS, 2002).

A técnica de simulação manual consiste em determinar fatores lineares entre a quantidade de carga e a classe de consumo. Assim, é possível determinar uma densidade de carga média por classe de consumo. Identificando a alocação dessas classes de consumo na área de serviço, é possível determinar a densidade média de carga por uso do solo.

Usando a informação do crescimento de carga esperado, é possível determinar quantas novas subáreas serão alocadas. O processo de escolha das novas subáreas que serão alocadas é feito manualmente, considerando as informações do desenvolvimento da cidade, conhecimento e experiência por parte do planejador.

Os dados de densidade de carga por classe de usuário e por uso do solo podem ser combinados linearmente para obter matrizes de entrada – saída, que permitem calcular o crescimento de uma classe devido ao desenvolvimento de outra. Por exemplo, quando uma empresa chega a uma cidade, gera um aumento no consumo da classe industrial; esta empresa incrementará a demanda da classe residencial devido ao fato que precisará de novas moradias para os novos empregados que podem vir de fora da cidade; esta também precisará de bens e serviços, o qual será refletido em um aumento da demanda da classe comercial. Essa matriz permite determinar com maior precisão a quantidade de novas áreas a serem alocadas e também ajuda na determinação de cenários de crescimento considerando diferentes fatores.

Outra técnica usada é o reconhecimento de padrões, a qual tem muitas variações aplicadas ao problema. Essa técnica é usada para determinar como uma subárea é afetada por fatores na sua vizinhança e, assim, determinar um padrão que permita classificar uma área em um possível uso do solo. Diferentes classes têm diferentes necessidades relacionadas com as características do solo onde estão localizadas. A proximidade a um setor comercial é algo muito importante para o uso do solo comercial, mas não é muito útil para o uso do solo

industrial. As rodovias são fatores importantes na preferência do uso do solo industrial, devido à facilidade de transportar seus produtos, mas, sob alguns aspectos, é um fator negativo para o uso do solo residencial devido ao barulho e a poeira constante, o qual fará com que os grupos sociais escolham uma subárea considerando a característica de uso de solo que esta possa ter.

Cada subárea tem necessidades distintas, dependendo do uso do solo. Uma complicação é que muitas dessas necessidades não têm nenhuma relação com ela mesma, mas sim com os seus arredores e vizinhança.

A primeira etapa para o reconhecimento de padrões é estabelecer quais fatores serão analisados e seus valores. Esses fatores podem ser classificados em três tipos: fatores locais, fatores de proximidade e fatores de vizinhança.

Os fatores locais são atributos próprios de cada subárea, relacionados com a facilidade do terreno para construção e a disponibilidade de serviços públicos, como a água. Outros atributos que podem ser importantes, dependendo do entorno, são os atributos estéticos. Esses fatores são medidos como variáveis binárias e considerados como dados de entrada.

Os fatores de proximidade medem as influências que, geralmente, são funções da distância. Esses fatores não consideram quantidades; por exemplo, uma rodovia pode ajudar uma indústria a distribuir seus produtos, mas a importância de ter uma segunda rodovia perto é irrelevante. Esses fatores são medidos com uma função de distância que pode ser calculada usando diferentes métodos e considerando fatores lineares ou não lineares para expressar a pouca importância que um fator pode ter com uma distância maior.

Os fatores de vizinhança medem as influências que dependem das quantidades de determinado atributo nos arredores. O fator mais simples é a quantidade de desenvolvimento residencial, industrial e comercial na vizinhança de cada subárea.

Os maiores desenvolvimentos comerciais só são possíveis quando o desenvolvimento residencial de uma área alcançou uma determinada meta, e uma grande quantidade de uso de solo industrial pode atuar como uma força repulsiva para o desenvolvimento residencial e comercial. Esses fatores são expressos em termos de área ocupada.

2.2.6 Uso da Lógica Nebulosa

Intuição, conhecimento técnico, experiência e descrições linguísticas são com frequência usada pelos engenheiros dentro do planejamento da rede de distribuição. Por exemplo, zonas industriais *desejam estar mais perto* das estradas. Observe-se que a expressão linguística tal como, *desejam estar mais perto* é de natureza nebulosa. A natureza básica da previsão de demanda espacial é muito propícia para introduzir a aplicação da lógica nebulosa usando funções de pertinência, regras nebulosas, processo de nebulização e denebulização. O qual se evidencia no modelo de preferência espacial e o reconhecimento de padrões utilizados na modelagem e a tomada de decisões na simulação do processo de atribuição de cargas que são ideais para aplicar a lógica nebulosa.

A lógica nebulosa tem sido usada para a classificação das proximidades, determinação das preferências e prioridade de alocação.

No trabalho de Mo-Yuen e Hahn (1996a), toma em conta a variável distância com respeito ao polo urbano e a variável preferência com as funções de pertinência que se mostra na Figura 2.9 e 2.10.

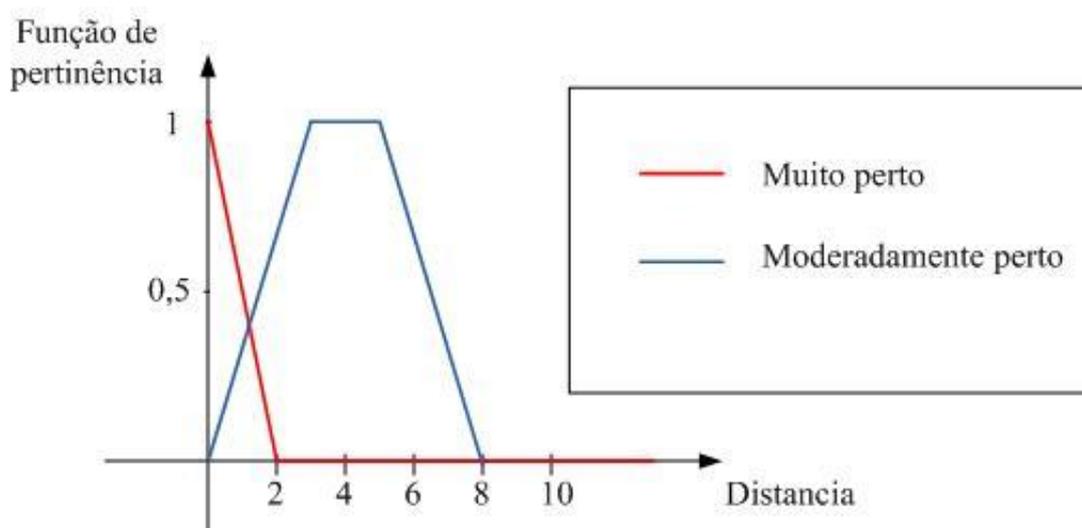


Figura 2.9 – Função de pertinência para representação da variável distância.

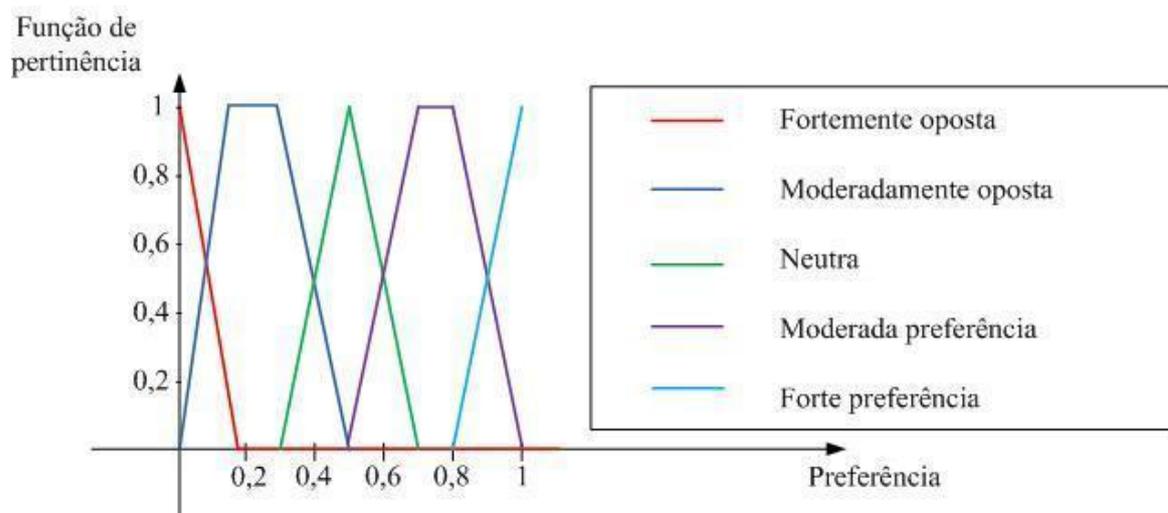


Figura 2.10 – Função de pertinência para representação da variável preferência.

Assim, as funções de pertinência da lógica nebulosa podem ser usadas para determinar as ponderações combinadas dos diferentes objetos de interesse por classe para a previsão de demanda espacial. Esta metodologia pode gerar saídas do tipo nebuloso ou crisp (exato).

No trabalho (MIRANDA; MONTEIRO, 2000) utilizam-se preferências nebulosas para criar as regras de classificação, mas conservando uma saída de tipo discreta (numérica). A seguinte regra de classificação é um exemplo:

Se (distância a estrada é *perto*) **e** (distância ao centro urbano é *relativamente perto*) **e** (inclinação do terreno é *moderada*) **e** (saturação residencial *perto* é *media*) **e** (saturação industrial *perto* é *baixa*), **então**, preferência doméstica é 20 consumidores por etapa **e** preferência industrial é 0,1 consumidores industriais por etapa.

Outros trabalhos que apresentam algumas das contribuições nesta área foram feitos em: Mo-Yuen e Hahn (1996b) e Chow, Zhu e Tram (1998), entre outros.

2.2.7 Uso de Autômatos Celulares

No trabalho de Von Neumann (1966) mostrou-se o interesse nas conexões entre a biologia e a Teoria dos Autômatos, mais precisamente, no fenômeno biológico da autorreprodução. Von Neumann apresentou a seguinte questão: “Que tipo de organização lógica é suficiente para um autômato ser capaz de reproduzir a si próprio?”.

A construção de Von Neumann (1966) foi simplificada por outros autores, dentre eles Stephen Wolfram (1994), qual propôs autômatos com modelos matemáticos simples de sistemas naturais, constituídos de uma malha, ou grade, de células idênticas e discretas, onde cada célula possui um valor pertencente a um conjunto finito. Esses valores evoluem em passos de tempo discreto, respeitando regras determinísticas, as quais são função dos valores de cada célula e das células da sua vizinhança. Essa vizinhança bidimensional pode ser observada na Figura 2.11. A vizinhança de Neumann é apresentada na Figura 2.11 (a), onde esta considera apenas as células vizinhas acima, abaixo, à direita e à esquerda da célula em questão. Já a vizinhança de Moore, apresentada na Figura 2.11 (b), leva em consideração as células vizinhas com raio unitário, ou seja, é a vizinhança de Neumann mais as diagonais.

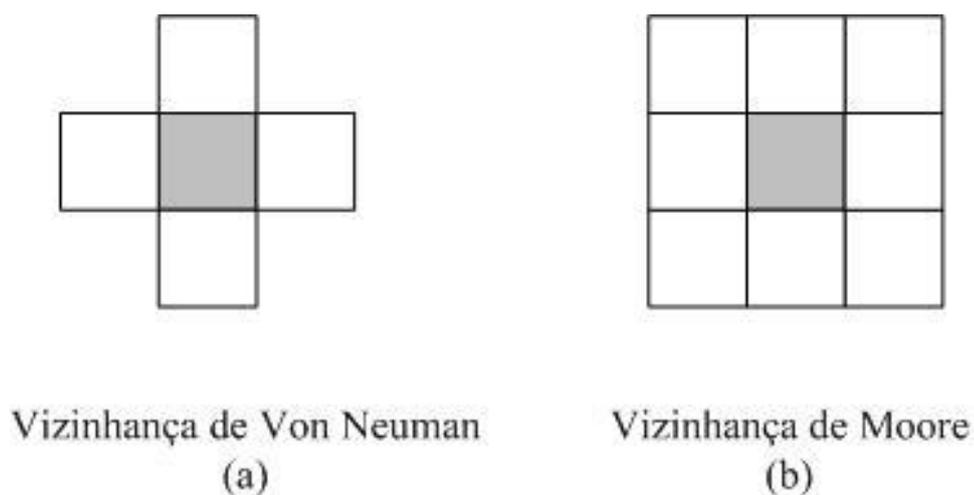


Figura 2.11 – Modelos de vizinhança.
Fonte: Stephen Wolfram (1994).

Segundo Wolfram (1994), os autômatos celulares são idealizações discretas das equações diferenciais parciais frequentemente utilizadas para descrever os sistemas naturais. A partir dessa natureza discreta, pode-se fazer uma analogia com os computadores digitais. Assim, os autômatos celulares podem ser vistos como computadores de processamento paralelo de natureza simplificada.

Como ferramenta de modelagem, os autômatos celulares são uma maneira de representar comportamentos que acontecem no espaço e tempo. Para o problema de previsão de demanda ajudam a simular o crescimento e as mudanças que existem entre o uso do solo e a densidade de demanda. Aplicações de autômatos celulares na previsão de demanda podem ser encontradas em: Yang, Lin, Wang, Chen, Huang e Cheng (2008). Nesse trabalho foi realizado uma previsão de demanda espaço-temporal para o sistema de distribuição utilizando o software MapInfo e foi feita uma comparação com o método de extrapolação. Zhou, Fu, Liu, Yang, Sun e Li (2008) simularam o processo de desenvolvimento dinâmico do uso do solo, utilizou-se um conjunto de regras para a redução dos atributos dos diversos fatores dentro de cada passo de tempo e obtiveram-se regras dinâmicas do Autômato celular. Outra aplicação de interesse pode-se encontrar em Cong et al. (2009).

O trabalho desenvolvido por Carreno, Rocha e Padilha-Feltrin (2010), utilizou um autômato celular para realizar uma previsão espaço-temporal que considerou o crescimento das cargas elétricas através da curva “S” e utilizou 4 faixas de consumo para representar a demanda esperada em cada subárea. O método proposto nesse trabalho analisa o espaço físico, áreas com carga e áreas sem carga, mas não se conseguiu analisar uma parte de zona de serviço para observar a influência de determinadas cargas especiais nas vizinhanças, impossibilitando realizar o estudo de cenários. Deste modo, os métodos de sistemas multiagentes propostos neste trabalho procuram superar as deficiências do trabalho desenvolvido com autômato celular para o estudo de cenários e diferenciar-se por expressar a densidade de demanda com um número real e não como uma faixa.

A seguir se mostrará um resumo do algoritmo e resultados obtidos da aplicação do autômato celular desenvolvido por Carreno, Rocha e Padilha-Feltrin (2010), devido à importância deste trabalho para o trabalho proposto aqui de sistemas multiagentes.

Algoritmo para a construção do autômato celular:

1. Processar os dados disponíveis e criar o banco de dados espacial;
2. Criar o banco de regras;
3. Determinar o estado de cada célula;
4. Calcular a probabilidade de desenvolvimento para cada subárea sem carga utilizando o heurístico evolutivo;
5. Calcular a probabilidade de redesenvolvimento para cada subárea com carga;
6. Para cada célula determinar se a célula se desenvolverá de acordo com as regras de atualização e sua correspondente probabilidade;
7. Terminar o algoritmo.

Os passos 3 até 7 são repetidos para cada passo de tempo.

Nas figuras 2.12 e 2.13 se mostram os resultados fornecidos por este método para a carga residencial e comercial respectivamente:

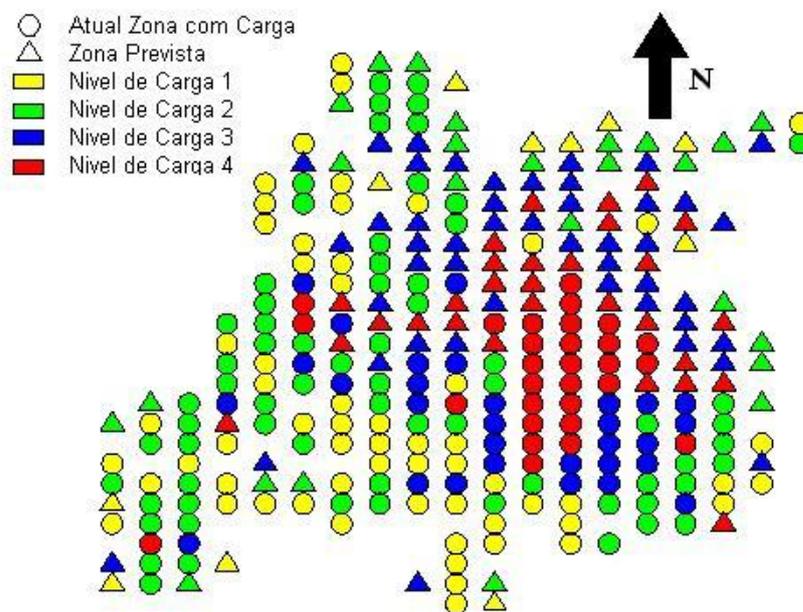


Figura 2.12 – Previsão de crescimento das cargas residenciais em 20 anos.
Fonte: Carreno, Rocha e Padilha-Feltrin (2010).

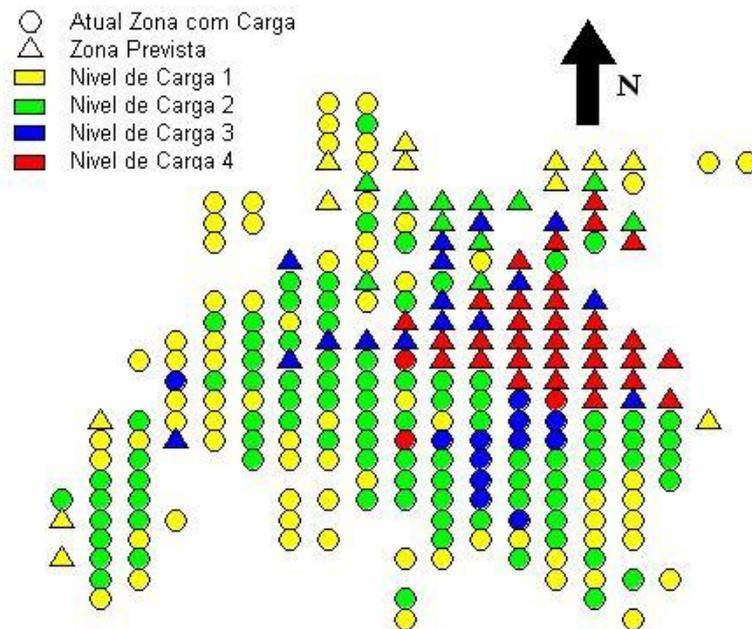


Figura 2.13 – Previsão de crescimento das cargas comerciais em 20 anos.
Fonte: Carreno, Rocha e Padilha-Feltrin (2010).

O modelo baseado em autômatos celulares apresenta a restrição inerente de origem físico-matemático, utilizando um conjunto fixo e predeterminado de estados possíveis das células. O desejo dos indivíduos e a interação entre estes e o espaço urbano não é contemplada dentro dos modelos tradicionais de autômatos celulares. Como se evidencia no passo 3 do algoritmo supracitado para cada passo de tempo se estuda todas as células da área de serviço, na qual apresentaram deficiências no momento de tentar analisar uma parte de zona de serviço ou a influência de determinadas cargas especiais nas vizinhanças. Para o estudo de cenários este modelo necessitará simular todo o espaço de busca para cada cenário, o qual é desnecessário conhecendo que as cargas especiais só teriam efeito em determinadas zonas. Uma maneira de superar isto é aplicando outros métodos da mesma família dos autômatos celulares, como são os métodos de sistemas multiagentes.

O trabalho desenvolvido com sistemas multiagentes difere-se do trabalho desenvolvido com autômato celular, pois dota cada agente com um número real para representar a demanda e permite a simulação da influência de determinadas cargas especiais nas vizinhanças.

No seguinte capítulo se mostrará em um primeiro momento como se aplica os autômatos celulares para logo dar passo aos sistemas multiagentes, no qual se detalhará as vantagens de utilizar estes e a forma de como aplicar esta metodologia dentro da previsão espacial de demanda. Por último se mostrará o primeiro método proposto para o estudo de previsão espacial de demanda de toda a área de serviço.

Capítulo 3 - Método de Previsão Espacial de Demanda para toda a Área de Serviço Utilizando um Sistema Multiagente

Neste capítulo, apresenta-se um método para a previsão espacial de demanda para toda a área de serviço, baseado na utilização de um sistema multiagente. As principais características deste método são: o uso de dados comerciais e não técnicos, fácil implementação, o uso de um número real para a densidade de demanda e localização espaço-temporal das cargas elétricas. Em um primeiro momento se apresentarão as bases para a simulação da dinâmica urbana. Logo se define o que é um sistema multiagente, evidenciando as vantagens desta e os dados necessários para aplicá-la na previsão de demanda espacial. Ao final deste capítulo será mostrado o algoritmo para a localização espaço-temporal das novas cargas em toda a área de serviço utilizando tal sistema.

3.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO DA DINÂMICA URBANA

Como foi mencionado no Capítulo 1, a dinâmica urbana é um conjunto de processos espaços-temporais, criados pelos indivíduos que habitam em uma cidade, e que são realizadas simultaneamente dentro do espaço urbano.

Os indivíduos, ou o conjunto de indivíduos, que são responsáveis pela dinâmica urbana podem ser considerados como atores urbanos porque seu papel pode mudar com respeito a suas próprias motivações ou as circunstâncias nas que se desenvolvem. Cada ator urbano tem sua própria motivação de atuação, a qual procura realizar em um ambiente onde estão presentes outros atores, estes atores podem ter a mesma ou diferentes motivações com o mesmo poder de realizar seu papel.

Os fenômenos urbanos determinados pela sociedade, cultura, economia, política ou uma combinação destas, são conhecidos como sistemas complexos (ALLEN, 1997; EPSTEIN; AXTELL, 1996).

Os sistemas complexos são caracterizados por ter múltiplos componentes ou unidades de interação. Além disso, tem uma propriedade que deriva dos comportamentos individuais dos componentes do sistema. O comportamento de um sistema complexo é dinâmico e interligado. Portanto uma mudança de uma de suas variáveis, por menor que seja, causa uma variação nas outras variáveis.

A melhor forma de estudar e compreender os sistemas complexos é através da construção de modelos de simulação (GILBERT; CONTE, 1995). Para representar uma cidade se devem representar duas peculiaridades: A primeira representa as unidades de infraestrutura física da cidade e a outra simula os movimentos dos indivíduos dentro da cidade. Os elementos de infraestrutura urbana, entre outros como: unidades de solo, edifícios, estradas, são considerados como fixas, entretanto os indivíduos são potencialmente livres de mudar sua localização dentro da cidade (PORTUGALI; BENENSON, 1997).

Um estilo de criar um modelo de simulação que inclua a interação das duas peculiaridades é utilizar os modelos aperfeiçoados nos conceitos de autômatos celulares e os sistemas multiagentes. Estes modelos consideram o marco espacial no qual os atores urbanos realizam suas atividades dentro de uma grade, similar a um tabuleiro de xadrez. Nestes

modelos, os atores urbanos são objetos computacionais autônomos, com a capacidade de realizar ações, perceber seu entorno e comunicar-se com outros atores.

3.2 AUTÔMATOS CELULARES

Os autômatos celulares foram desenvolvidos por John Von Neumann e Stanislaw Ulam na década de 40 (VON NEUMANN, 1966). Von Neumann introduz o conceito de autômato celular como uma estrutura matemática, na qual permitia pesquisar a organização existente nos processos biológicos de autorreprodução celular. No entanto, não foi até a década dos setenta quando John Horton Conway desenvolveu uma aplicação prática dos autômatos celulares com seu famoso Jogo da Vida (GARDNER, 1970).

O Jogo da Vida é um autômato celular bidimensional em que cada célula somente pode estar em um dos dois estados definidos: viva ou morta. Para que uma célula nasça, sobreviva ou morra, é necessário um conjunto de regras. Estas regras são aplicadas a todas as células da rede, para determinar os estados de cada célula na próxima geração. O estado de cada célula depende de seu estado atual e do estado das células da sua vizinhança. A rede é atualizada contendo as células que nasceram, sobreviveram ou morreram.

Do ponto de vista da matemática, os autômatos celulares são parte dos sistemas dinâmicos discretos. Entende-se por sistema a união de várias partes em uma forma organizada, de tal maneira que cada uma das partes afetam mutuamente pelo fato de pertencer ao sistema. Por outro lado, são sistemas dinâmicos porque a união dessas partes realiza alguma tarefa no decorrer do tempo. Enquanto que são discretos no sentido de que a evolução, mudança de um estado a outro, no tempo e no espaço é feita através de passos finitos e contáveis.

Os autômatos celulares representam dificuldades ou fenômenos complexos que acontecem simultaneamente no espaço e no tempo. As ideias básicas na modelagem com autômatos celulares são as seguintes:

1. Muitos fenômenos do mundo real são inerentemente complexos;
2. É possível compreender a dinâmica global dos sistemas complexos através do comportamento individual de seus elementos menores;
3. Esses elementos seguem regras simples de comportamento;
4. A dinâmica e complexidade do sistema surgem por interação dos indivíduos simples, devido ao fato que as interações locais conduzem a uma dinâmica global;

A construção de um autômato celular é relativamente simples. Esta começa definindo um conjunto de células, as quais conformarão o espaço celular. Uma célula é considerada em um lugar dentro do espaço, completamente especificado por suas coordenadas. Cada célula é idêntica à outra, e só se diferencia das outras por suas coordenadas. Por outro lado, cada célula pode ter vários estados. Os estados são fenômenos ou ocorrências que também se encontram localizados no espaço e se associam a cada célula. Por exemplo, em uma área urbana, as células podem representar as subzonas e os estados podem ser a média de consumo de energia elétrica de cada subzona.

De acordo com a computação, uma célula é um tipo de elemento de memória e sua função é armazenar os estados. Os estados regularmente se codificam através de uma representação numérica. Por exemplo, em um caso simples, cada célula pode ter os estados 1 e 0. Em representações complexas, as células podem ter um maior número de estados diferentes.

As células se acomodam em um arranjo espacial. O arranjo mais simples é o unidimensional, o qual significa que todas as células estão acomodadas em uma linha. O seguinte tipo de arranjo é o bidimensional, neste as células formam uma grade. Podem ser construídos arranjos de mais dimensões. Contudo, os autômatos mais comuns se constroem em uma ou em duas dimensões.

O espaço celular e seus estados associados em uma unidade de tempo dado representam o estado global estático de algum fenômeno ou circunstância particular. É como tirar uma foto do fenômeno. Para introduzir a dinâmica dentro do sistema é necessário adicionar ao autômato a evolução dos estados das células. Isto se consegue estabelecendo regras de transição de estados. A função destas regras de transição é definir o estado particular das células para o seguinte intervalo. As regras definem o estado de uma célula particular em função das células na vizinhança da mesma. Por vizinhança se entende um conjunto de células

no entorno de uma célula particular. Se for considerado um arranjo bidimensional são comuns as seguintes definições da vizinhança (TOFFOLI; MARGOLUS, 1987):

1. A vizinhança de Von Neumann. Esta vizinhança se encontra conformada por quatro células, as células acima e abaixo, direita e esquerda, no entorno de uma célula central. O raio da vizinhança indica a proximidade das células a considerar. Na figura 3.1 (a) é mostrada a forma da vizinhança de Von Neumann, neste caso o raio é 1;
2. A vizinhança de Moore, é uma extensão da vizinhança de Von Neumann, a qual contém as outras células na diagonal. Na Figura 3.1 (b) se mostra esta vizinhança;
3. A vizinhança alargada de Moore, é uma descrição equivalente à vizinhança de Moore, mas a vizinhança alarga sua distância até o seguinte conjunto de células próximas. Aqui o raio é $r=2$. Como se mostra na Figura 3.1 (c).

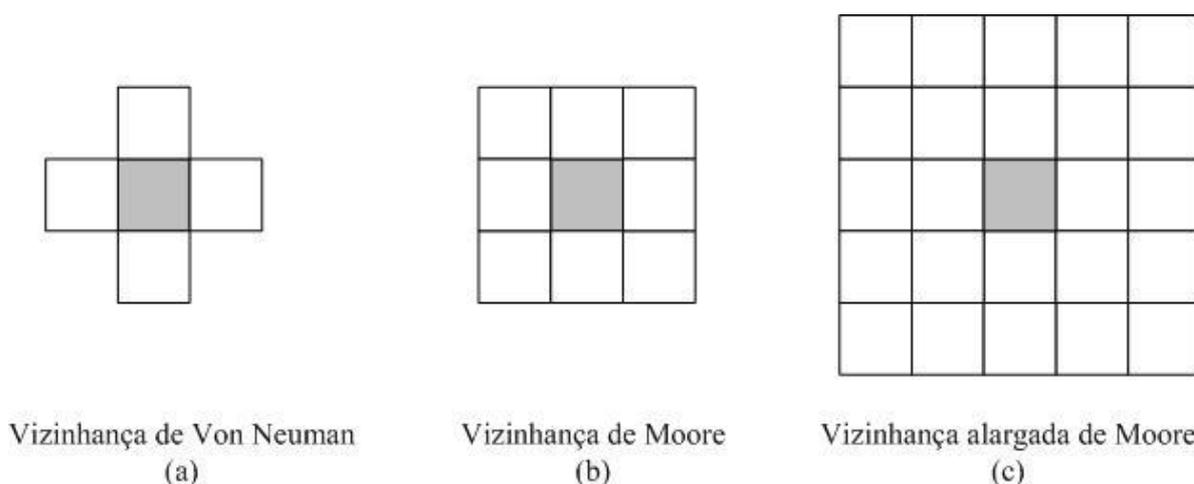


Figura 3.1 – Classes de vizinhanças.
Fonte: Stephen Wolfram (1994).

A metodologia de autômatos celulares foi apresentada nesta seção porque forma parte da família dos sistemas multiagentes, mas não será implementada neste trabalho devido às dificuldades que apresenta esta metodologia nas simulações de cenários como se mencionou ao final do Capítulo 2.

3.3 SISTEMAS MULTIAGENTES NA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS URBANOS

Os sistemas multiagentes (SMA) são um ramo da inteligência artificial distribuída, que pode ser definido como o campo do conhecimento que estuda ou tenta construir conjuntos de entidades autônomas e inteligentes, as quais cooperam umas com as outras para desenvolver um trabalho ou tarefa específica. Estas entidades se comunicam por meio de mecanismos baseados no envio e recepção de mensagens (FERBER, 1999).

Os SMA envolvem o estudo de muitos atores e suas interações. Os atores podem ser átomos, animais, pessoas, organizações ou nações. As entidades que conformam um SMA são conhecidas como agentes. Um agente pode ser definido como uma entidade, parcial ou completamente autônoma, que atua de modo racional ou reativo em concordância com suas percepções do exterior e o estado de seu conhecimento. Esta definição está relacionada com o ponto de vista da inteligência artificial. Conforme foi mencionado no Capítulo 1, existem muitas formas de definir um agente, seja quando sujeito ao trabalho que realiza ou ao seu desígnio.

A classificação dos agentes pode ser realizada considerando o papel que estes desempenham dentro de um sistema, sua particularidade, seus objetivos ou metas especiais, sua funcionalidade, suas crenças, sua capacidade de comunicação e de aprendizagem. Existem três formas diferentes de formalizar um agente (FERBER, 1999):

1. Agentes reativos: são aqueles cujas respostas estão fundamentadas nas mensagens do entorno, além disso, enviam mensagens a outros agentes e atualizam suas representações de entorno de forma continuada. Operam apenas como planos ou regras prefixadas que não podem ser modificadas por eles;
2. Agentes proativos: têm a mesma capacidade que os reativos, no entanto aplicam regras para definir objetivos que consideram suas motivações e necessidades. São capazes de detectar conflitos em suas metas, estabelecem prioridades e projetam planos para alcançar suas metas. Podem, inclusive, estar informados das metas de outros agentes, de suas ações e intenções;

3. Agentes sociais: esta classe de agentes adiciona aos anteriores modelos explícitos sob outros agentes. Isto lhes dá a capacidade de raciocinar sobre os objetivos, expectativas e crenças dos outros.

Os agentes se vinculam em um universo multiagente. Um universo multiagente é um conjunto de agentes acoplados com um conjunto de processos desenvolvidos por estes. Os processos podem acontecer de forma simultânea. No universo multiagente, os agentes compartilham recursos comuns e podem se comunicar entre si. A chave para o desenvolvimento de um universo multiagente é formalizar a coordenação necessária entre eles.

Um SMA deve especificar a classe de organização social que tem os agentes. Esta organização compreende a forma de como um grupo de agentes está constituído em um instante dado, sob um universo multiagente. A organização social de um SMA está relacionada com a estrutura dos componentes funcionais do sistema a modelar, como são suas características, responsabilidades, necessidades e o modo como se realizam as comunicações no sistema. A organização de um SMA pode ser estática ou dinâmica, específica para cada função ou tarefa de cada agente.

Pode-se considerar que uma sociedade de agentes está constituída por três elementos:

- Um grupo de agentes;
- Um conjunto de tarefas a realizar; e,
- Um conjunto de recursos.

A atribuição de tarefas aos agentes pode ser organizada de várias formas. Um modo é atribuir a execução de cada tarefa para um agente, outra maneira é dividir as tarefas das subáreas, através de algum mecanismo de decomposição de problemas, e estas subtarefas são realizadas pelos diversos agentes. A tarefa que deve realizar um agente dependerá, entre outros fatores, das funções que este agente se apropria do sistema. Para realizar esta, o agente pode necessitar recursos do sistema. Neste caso, tem que coordenar com outros agentes do sistema que desejam usar o mesmo recurso.

Uma sociedade pode ser construída utilizando agentes e estará organizada como uma rede, na qual cada nó representa um agente e as ligações representarão os mecanismos de intercâmbio de informação entre os mesmos como se observa na Figura 3.2. A partir da

organização das ligações, o intercâmbio de informação pode realizar-se diretamente ou entre agentes, ou bem indiretamente através de um intermediário.

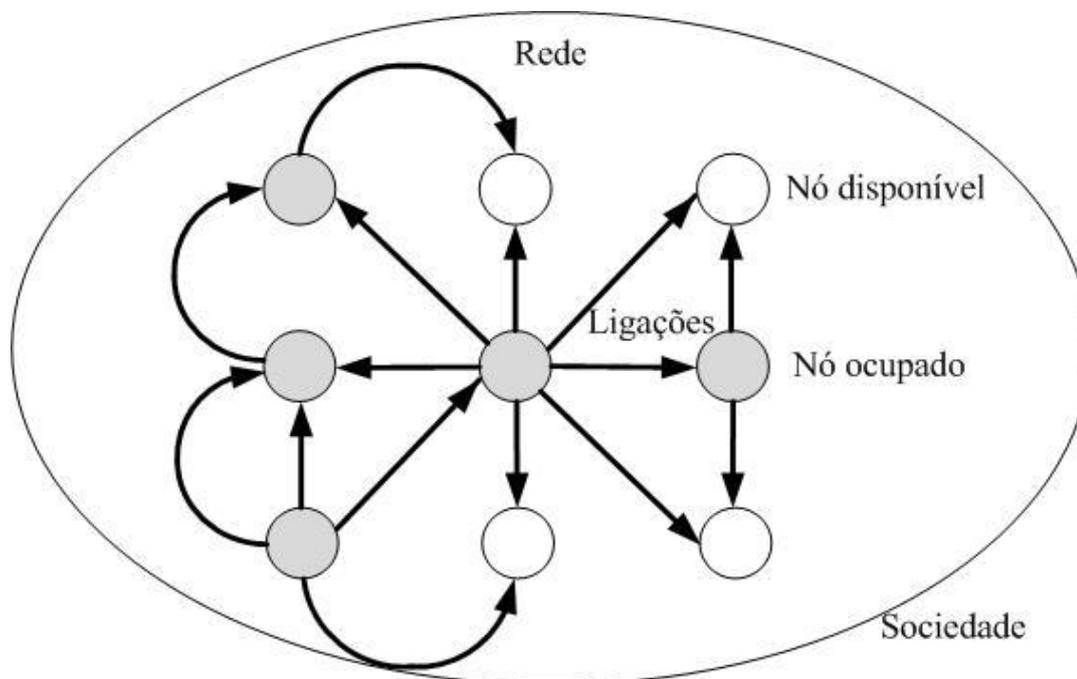


Figura 3.2 – Representação de uma sociedade através de uma rede de agentes.

Existem dois tipos fundamentais de sociedades construídas com agentes: A sociedade centralizada e a sociedade descentralizada. No primeiro caso, a autonomia dos agentes está restringida, devido a existência de um agente controlador que governa de forma parcial, e em alguns casos de forma total, o estado do sistema. Na sociedade descentralizada a autonomia que possuem os agentes é máxima. Não possui um controlador central que governe e organize a cooperação, mas cada agente conhece suas próprias habilidades e as do resto das entidades, utilizando este conhecimento para decidir de qual parte do sistema deve ocupar-se e com quem pode cooperar ou competir (FERBER, 1999).

As técnicas de simulação social modelam os fenômenos globais, realizando uma observação e estudo destes a partir dos comportamentos individuais. Isto é possível através da organização dos comportamentos, e não por agregação destes. Desta forma, gera-se uma nova dinâmica global a partir destas inter-relações. Esta aproximação é conhecida como *bottom-up*, na qual se considera os fenômenos sociais como uma coleção de unidades elementares simples, cujas interações definem a dinâmica do sistema social como um todo (GILBERT, 1996)

Por outro lado, é necessário utilizar um marco teórico social adequado para poder juntar os conceitos matemáticos e computacionais próprios da teoria dos SMA, com os conceitos sociológicos. Existem vários marcos teóricos sociais que se podem utilizar na modelagem, todos estes se deparam com as seguintes qualidades:

1. Envolver uma explicação indutiva dos fenômenos sociais. Partem de comportamentos individuais e interações de baixo nível para logo estabelecer a dinâmica global;
2. Ter um ponto de referência sócio-espacial. A localização e interação espacial dos entes sociais é parte explícita da teoria;
3. A dinâmica do sistema social esta claramente constituída. A existência de vários estados específicos que podem ser perfeitamente localizados no tempo e espaço e, simultaneamente, tem uma razão de troca temporal destes.

Os modelos urbanos de sistemas multiagentes estão baseados na teoria do individualismo. Esta teoria estabelece que todos os conceitos nas ciências sociais fossem analisados entre outras por interesse, atividades e desejos.

Em resumo, a ideia básica de modelar a complexidade urbana através de SMA é que o comportamento global de um sistema urbano se deriva na integração dos comportamentos locais específicos. O espaço urbano se divide em quadrículas, as quais podem estar vazias ou ocupadas por diferentes tipos de atividades humanas, como comércio, indústria, residência, recreação, entre outras (CLARKE; HOPPEN; GAYDOS, 1996). As quadrículas, em outros casos, podem estar ocupadas por grupos sociais diferenciados entre eles por alguma característica socioeconômica ou cultural. A dinâmica destas quadrículas é governada por regras de transição. Na maioria dos modelos estas regras se fundamentam na teoria econômica do uso do solo e/ou na localização espacial das atividades produtivas. Não obstante, em outros modelos as regras de transição se fundamentam nas observações empíricas da realidade. Portanto, tem elementos aleatórios na sua definição, o que permite adicionar um fator probabilístico nestes modelos.

3.4 CONSTRUÇÃO DO MÉTODO DE SISTEMAS MULTIAGENTE PARA A PREVISÃO DE DEMANDA ESPACIAL DE TODA A ÁREA DE SERVIÇO

Para esta seção utilizaram-se os conceitos até aqui estudados, para a construção do algoritmo do modelo de sistema multiagente aplicado na previsão de demanda espacial de toda a área de serviço.

O algoritmo proposto neste capítulo utiliza dados disponíveis, provenientes das diversas entidades presentes na área de serviço.

A primeira fonte disponível é composta por estudos realizados por algumas dependências locais, como secretarias de planejamento. As informações brindadas por esta não são muito confiáveis devido a sua dependência política.

Considerando esse fato, as empresas contam com um conjunto de dados em nível interno, apropriado à identificação de suas instalações e de seus usuários, que pode ser empregadas.

As medições técnicas de potência máxima demandada pelo sistema elétrico em pontos estratégicos, tais como: subestações, alimentadores e até transformadores, são dados que podem ser importantes no desenvolvimento de qualquer metodologia. Mas a obtenção desses dados nem sempre é econômica ou tecnicamente possível de conseguir.

Para compensar a falta dos dados técnicos, é necessário ter disponibilidade de dados que permita usar a informação comercial como informação técnica, por exemplo, curvas de cargas padrão para o sistema em particular.

Para complementar as informações técnica e comercial faz-se necessário o uso de informações socioeconômicas da região, como distribuição social e geográfica da riqueza na região, atividades primárias nas diferentes sub-regiões, centros econômicos, centros industriais, vias de transporte, centros de ensino, hospitais, serviços públicos, centros comerciais, entre outros.

Outra informação importante são os projetos de infraestrutura da região, em andamento e futuros. Essa informação permite incorporar pontos de referência para o médio e longo prazo.

3.4.1 Processamento dos Dados

Os dados para este método de previsão de toda a área de serviço podem ser organizados em duas bases de dados, expostos a seguir.

3.4.1.1 Base de Dados Espacial

Esta base conta com informações da distribuição geográfica das instalações elétricas dentro da área de serviço, demanda de energia de todos os consumidores dos anos passados, curvas típicas dos consumidores para cada nível de energia, informação espacial e mapas da zona de serviço. Para nossa aplicação estes dados são extraídos de Carreno e Padilha-Feltrin (2008).

A área de serviço para aplicação deste método se observa na Figura 3.3, a qual tem uma extensão total de 180 km^2 . Cada círculo representa uma subárea de $0,5 \text{ km}^2$. Os círculos pretos representam as atuais zonas com carga e os círculos brancos representam as zonas sem carga com possibilidade de receber carga. A determinação da resolução espacial foi adotada de Carreno e Padilha-Feltrin (2008) e forma parte dos dados de entrada para a aplicação deste método.

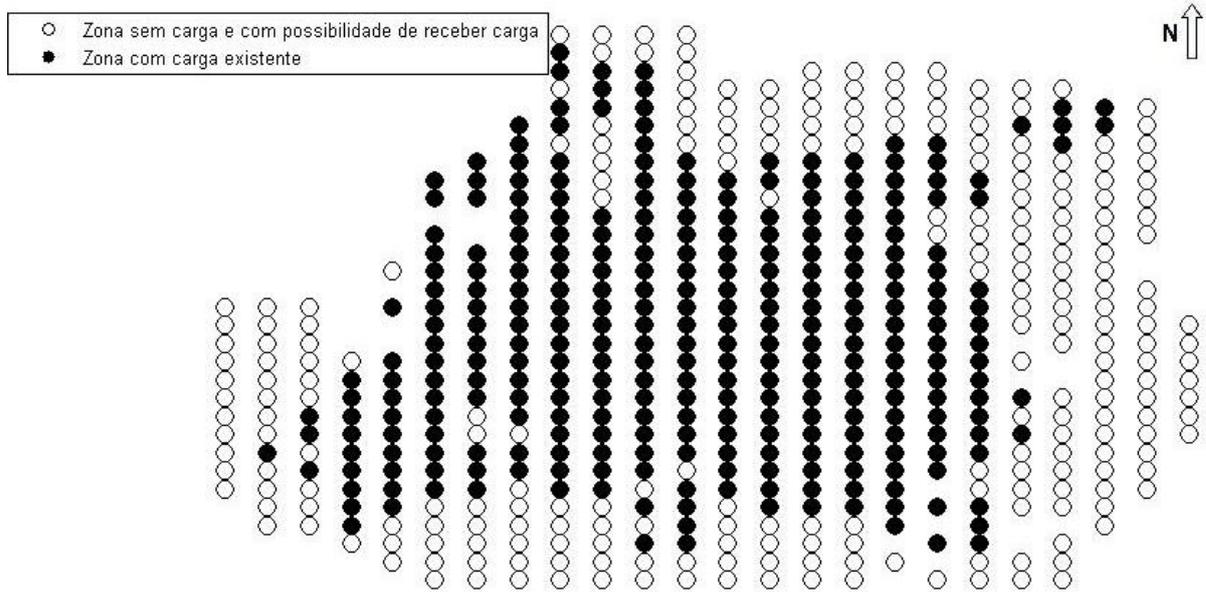


Figura 3.3 – Mapa da área de serviço, vista aérea.

3.4.1.2 Base de Dados de Demanda

Cada subárea contará com uma combinação de demanda residencial, comercial e industrial. Um valor diferenciado deste método é que os dados de densidade de demanda, para cada classe de consumidor, são números reais. Por exemplo, para a subárea localizada na posição (3,4) sua demanda em MW pode ser observada na Figura 3.4:

0,643	0,020	0,234
Residencial	Industrial	Comercial

Figura 3.4 – Demanda da subárea (3,4) em MW.

3.4.2 Representação da Zona de Estudo

Após a divisão da área de estudo em um tamanho fixo e obter a densidade de demanda, o próximo passo no método é colocar um agente estático em cada subárea. Este agente adquirirá as particularidades de cada subárea, as quais podem ser:

1. Combinações de demanda elétrica em residencial, comercial e ou industrial;
2. Classificação do uso do solo;
3. Localização;
4. Probabilidade de desenvolvimento ou redensolvimento.

Como foi mencionada na seção anterior a densidade de demanda para cada classe de consumidor em uma subárea será representada com um número real. Portanto, a densidade de demanda para cada agente estático pode ser considerada como um vetor com números reais, conforme ilustra a Figura 3.4.

Por outro lado, considere-se um agente móvel situado no centro de atividades e que vai percorrer a área de serviço interagindo com os agentes estáticos que ele vai encontrar em sua caminhada. Este agente móvel representa uma quantidade de demanda disponível para distribuir na cidade. A característica deste é ser um ente autônomo. Devido à decisão em aumentar, ou não, a demanda de cada agente estático que interatua. Esta tomada de decisão está sujeita a diversos fatores, como por exemplo, a probabilidade de desenvolvimento destas.

O cálculo das probabilidades de desenvolvimento e redensolvimento serão esclarecidos na seguinte seção.

3.4.3 Probabilidade de Desenvolvimento

Este método considera que cada agente estático tem uma probabilidade de desenvolvimento. Estas probabilidades são consideradas como dados de entrada para o método e foram obtidas de Carreno, Rocha e Padilha-Feltrin (2010), os quais classificaram as

probabilidades de desenvolvimento de duas formas diferentes considerando se a subárea tem carga ou não. A seguir serão mostradas esta classificação e a metodologia seguida para o cálculo destas probabilidades.

3.4.3.1 Probabilidade de Desenvolvimento para Subáreas sem Carga

Em Carreno (2008), uma heurística evolutiva determina a saída das regras de classificação estabelecendo um conjunto de regras semelhantes entre si (RSM), usando o valor de SM como o valor de adaptação (*fitness*) e aplicando um cruzamento ponto a ponto (*cross-over*) entre dois candidatos selecionados por torneio.

A distância de Hamming entre duas regras é usada para determinar o quão similar elas são. O valor de SM é definido como a distância de Hamming entre duas regras, isto é, o número de posições para as quais os correspondentes valores da regra X são diferentes dos valores da regra Y.

As regras de classificação são agrupadas em dois conjuntos R1, o conjunto das regras para as subáreas com carga e R2, o conjunto das regras para as subáreas sem carga. Cada regra possui duas partes:

1. Inputs: que são as distâncias medidas entre os objetos de interesse e a densidade de carga. Define-se como objeto de interesse uma escola, rodovias, polo urbano, entre outras;
2. Outputs: densidade de carga para cada classe de consumidor.

Pode-se resumir o processo seguido em Carreno (2008) de seguinte modo:

Para cada subárea K sem carga:

1. Constrói-se a parte de entrada da regra (*input*) de classificação R2(k);
2. Calcula-se o valor de SM entre a regra R2(k) e todos os elementos no conjunto R1;
3. Monta-se o conjunto de regras similares (RSM) usando os valores de SM;
4. Selecionam-se dois candidatos para serem cruzados, usando a seleção por torneio;

5. Cruza-se a saída de dois candidatos selecionados e atribuir-se o valor de saída da regra de classificação (*output*) a $R2(k)$.

No final deste processo, todas as áreas sem carga são classificadas dentro das diferentes preferências das classes consumidoras, de acordo com a densidade de carga esperada. Deste modo é possível designar probabilidades para cada subárea.

Se em uma subárea é esperada uma densidade de carga residencial muito alta, então a probabilidade de desenvolvimento é muito alta. Assim, uma probabilidade de desenvolvimento de 90% é designada; se, por exemplo, a densidade de carga esperada é baixa, então a probabilidade de desenvolvimento será considerada em 1%, e assim por diante. Assim, cada subárea terá três probabilidades de desenvolvimento, uma para cada classe de consumidores.

3.4.3.2 Probabilidade de Redesenvolvimento para as Subáreas com Carga

Para as subáreas com carga é calculada uma probabilidade de redesenvolvimento visando determinar a sua probabilidade de crescimento. Para o cálculo desta probabilidade se aproveita do fato que as cidades crescem ao redor de um, ou vários, centros de atividades.

Em primeiro lugar se extrai as características do centro de atividades para obter a regra de classificação desta, logo esta regra é comparada com sua vizinhança em uma janela 3x3, e uma pontuação é feita somando-se esses valores. Esses valores representam o relacionamento entre o centro de atividade e seus vizinhos imediatos.

Quando esses resultados são mostrados graficamente, percebe-se que as diferentes subáreas compartilham semelhanças com o centro de atividade e, especialmente, mostram como os diferentes fatores em uma cidade levam a um crescimento urbano em uma direção específica. As pontuações calculadas são normalizadas entre 1 e 100, sendo assim, expressos em forma de probabilidades.

O processo de redesenvolvimento considera também um crescimento do centro de atividades que se pode apresentar devido a um aumento da demanda dos serviços deste.

3.4.4 Previsão Geral de Demanda para a Área de Serviço

As empresas realizam consideráveis esforços para prever o aumento total de demanda do sistema, motivado pelo planejamento financeiro. Para obter esta previsão existem muitas metodologias amplamente pesquisadas e divulgadas que não fazem parte do objetivo deste trabalho. Este passo pode ser realizado utilizando as técnicas de previsão de carga tradicionais mostradas em Alfares e Nazeeruddin (2002).

Entre as técnicas que podem ser usadas, se tem as regressões tanto univariada como multivariada, as técnicas de inteligência artificial, séries temporais, estudos econométricos, entre outras. Neste crescimento da demanda se considera como um dado de entrada para este método.

O resultado desta previsão será utilizado no algoritmo como critério de parada, obtendo-se uma demanda disponível que se apresenta à cidade.

3.4.5 Localização Temporal Usando Sistema Multiagente

A cidade é dividida em subáreas que correspondem a um agente estático. Cada agente estático tem sua própria demanda e uma probabilidade de desenvolvimento explicada nas seções anteriores. Também, se tem como entrada o resultado da previsão geral para a área de serviço que representa uma nova demanda disponível para a cidade.

Um exemplo de uma nova demanda pode ser aquela gerada pela construção de casas populares que se apresentará à cidade. Os novos moradores necessitarão dos serviços existentes, como restaurantes, lojas, shopping, entre outros e, posteriormente, precisarão da criação de novos serviços, caso os atuais não sejam suficientes para suprir as necessidades das novas atividades. Esses novos serviços requererão de produtos, e conseqüentemente, refletirão na procura de serviços presentes no centro de atividades. Logo, o centro de atividades se comporta como um ponto de agregação de bens e serviços. Uma nova demanda em algum lugar da cidade será assim refletida na demanda do centro de atividades.

Para poder simular o efeito das novas cargas na demanda do centro de atividades, seria necessário conhecer a localização dos novos serviços, mas esse é um dado desconhecido. De tal modo, o sistema multiagente vai simular o processo contrário. Dado um aumento de carga no centro de atividades, simular os possíveis efeitos das zonas vizinhas, inclusive das zonas sem carga que poderiam receber novas cargas. Este processo será simulado com um agente móvel que representa o aumento de carga que caminha do centro de atividades até outras subáreas. O agente móvel interagirá com cada agente estático que ele encontre em sua caminhada e decidirá deixar, ou não, uma quantidade de demanda, afetando assim seu entorno.

Como foi mencionado na seção anterior, a quantidade de demanda obtida da previsão geral é utilizada para este algoritmo como critério de parada. O agente móvel irá repartir separadamente a demanda de cada tipo de consumidor percorrendo a área de serviço até atingir o critério de parada.

Também, deve-se definir a quantidade de demanda que o agente móvel vai repartir cada vez que determine que um agente estático deva aumentar sua demanda. Este valor foi determinado em 0,2 MW, sendo que este corresponde ao valor médio da maioria das zonas residências com carga na base de dados que se encontra disponível para a área de serviço em estudo.

Os agentes estáticos não têm a possibilidade de aumentar sua demanda, a não ser que o agente móvel decida deixar demanda nestes. As probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes estáticos podem variar em passos discretos de tempo. Estes passos discretos são de um ano. Os resultados discretos de uma simulação são utilizados como entrada para a seguinte simulação.

Um agente estático é selecionado de uma janela 3x3. Na figura 3.5, ilustra-se uma janela 3x3 delimitada por uma linha grossa onde cada posição tem uma probabilidade de desenvolvimento, expressa em porcentagem. No centro da janela se encontra o agente móvel, na cor cinza.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%
40%	40%	60%	10%	60%	10%	30%
40%	40%	40%	60%	10%	10%	30%
50%	50%	50%	20%	30%	30%	90%
80%	80%	80%	70%	90%	90%	30%
40%	40%	60%	10%	60%	30%	90%
40%	60%	30%	30%	60%	10%	60%

Figura 3.5 – Localização inicial do agente móvel.

Para a seleção de um agente estático dentro da janela será utilizado o operador genético de torneio. Para realizar isto, escolhem-se aleatoriamente quatro agentes estáticos que competem entre si dois a dois. Com o objetivo de representar a característica estocástica dos usuários no sistema de distribuição se gerará um número aleatório e o agente estático vencedor em cada torneio será aquele cuja probabilidade de desenvolvimento se encontre próxima pela direita do número aleatório gerado. Os vencedores competem entre si, para que haja somente um único agente estático ganhador. Assim, são aproveitadas as características deste operador genético, como aleatoriedade controlada e sobrevivência estatística do mais forte. Este critério de seleção foi escolhido depois de fazer vários processos de experimentação, obtendo-se uma melhor distribuição da demanda e melhor representação do processo estocástico dos usuários nos sistemas de distribuição. Uma vez conhecido o agente estático ganhador, o agente móvel caminhará até a localização deste agente estático.

Por exemplo, para o caso anterior, supõe-se que o agente estático ganhador foi o agente com probabilidade de desenvolvimento de 60%. Por isso o agente móvel caminhará até a posição deste agente estático ganhador e as demais posições serão zeradas, para que não retorne à posição na qual se encontrava anteriormente, como se mostra na figura 3.6.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%
40%	40%	60%	10%	60%	10%	30%
40%	40%	0	60%	0	10%	30%
50%	50%	0	↑	0	30%	90%
80%	80%	0	0	0	90%	30%
40%	40%	60%	10%	60%	30%	90%
40%	60%	30%	30%	60%	10%	60%

Figura 3.6 – Localização final do agente móvel

O agente móvel interatuará com este agente estático que decidirá em deixar, ou não, uma quantidade de demanda. Isto de forma aleatória controlada, considerando a probabilidade de desenvolvimento como fator de controle, representando deste modo à autonomia do agente móvel. Uma vez tomada esta decisão o agente móvel está pronto para continuar sua caminhada.

Novamente este procedimento se repete até que o agente chegue a atingir o critério de parada, isto é, repartir toda a demanda obtida da previsão geral para área de serviço.

O crescimento das cargas elétricas nos sistemas de distribuição segue um padrão similar a uma curva em S. Antes que a zona comece a ser habitada, o valor de demanda é zero, quando a zona começa a ser habitada tem um rápido aumento no crescimento da demanda. Isto é causado pelos novos aparelhos elétricos que vão ser instalados e este comportamento se mantém durante um período curto de tempo, depois disso, o crescimento da região estabiliza-se no tempo. Para simular este comportamento as seguintes regras se agregam ao proposto método de sistemas multiagente:

- Se um agente estático representa uma subárea não desenvolvida e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança em sua demanda nesse agente e este ganhará uma probabilidade alta de desenvolvimento para o próximo passo de tempo;

- Se um agente estático representa uma subárea desenvolvida com uma demanda considerada média e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança de sua demanda nesse agente e este ganhará uma probabilidade média de desenvolvimento para o próximo passo de tempo;
- Se um agente estático representa uma subárea desenvolvida com uma demanda alta e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança de sua demanda nesse agente e este ganhará uma probabilidade baixa de desenvolvimento para o próximo passo de tempo.

Um resumo deste algoritmo é apresentado na Figura 3.7. O algoritmo é repetido para cada passo de tempo utilizando a resposta final do passo $t-1$ como dado de entrada para o passo t .

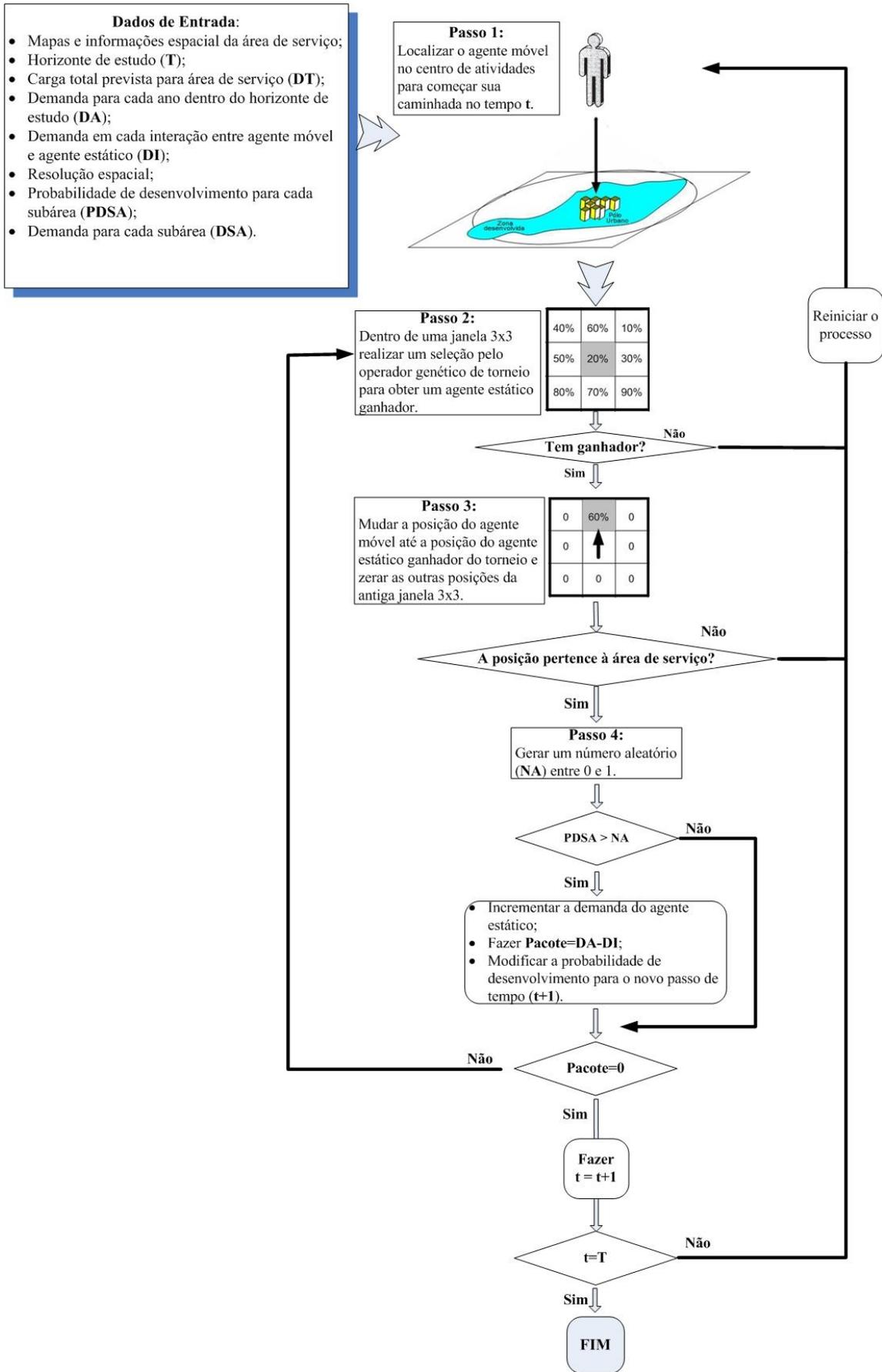


Figura 3.7 – Fluxograma do algoritmo para o método proposto de previsão de toda área de estudo.

Capítulo 4 - Aplicação do Método de Previsão Espacial de Demanda para toda a Área de Serviço

Neste capítulo, o método proposto que foi detalhado no Capítulo 3, será mostrado passo a passo, apresentando todos os detalhes necessários para entendê-lo, começando pela apresentação da base de dados, mostrando a forma pormenorizada o algoritmo e finalizando com mapas de previsão espacial de demanda para a área de estudo. Ao final deste capítulo serão mostradas as conclusões da aplicação deste método.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A metodologia foi testada utilizando dados de uma cidade de médio porte no Brasil, com aproximadamente 200.000 habitantes, dos quais 98% são classificados como urbanos e 2% são considerados como rurais, e cuja área é de 562,11 km². O PIB da região é de 2.971,25 milhões de reais correntes, e o PIB per capita é 14.651,93 reais correntes (SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS- SEADE, 2010).

O principal componente econômico é o setor dos serviços, com participação também do agronegócio, e em menor porcentagem, da indústria.

Na Figura 4.1, apresenta-se o mapa geral da zona de serviço.

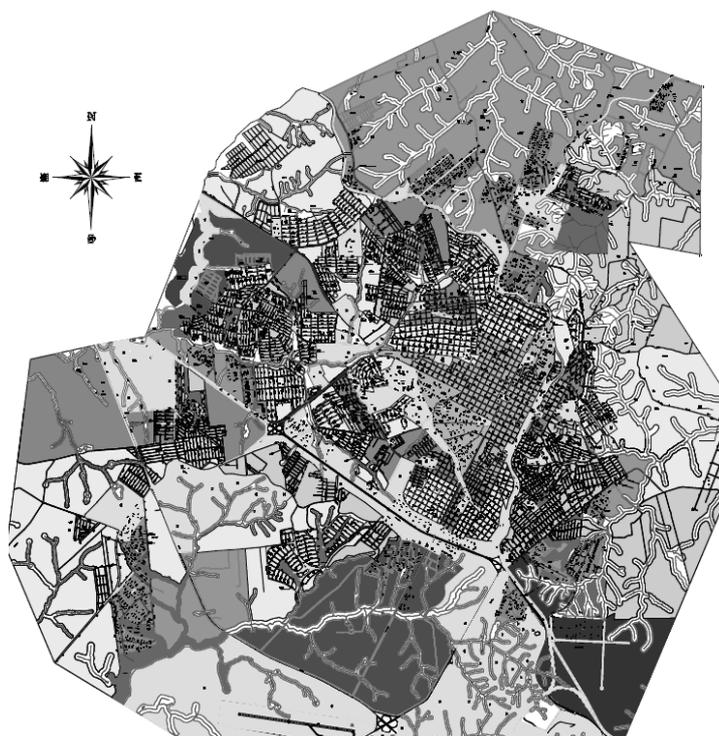


Figura 4.1 – Mapa geral da zona de serviço.
Fonte: Carreno (2008).

4.2 COLETA DE DADOS

Para uma previsão de demanda espacial a coleta de dados é a tarefa que leva mais tempo no processo e deve ser considerada com uma das tarefas mais importantes.

Os dados técnicos utilizados foram cedidos pela empresa responsável pela rede de distribuição da cidade.

Esses dados técnicos incluem os seguintes itens:

- Mapa da distribuição física das subestações, alimentadores e transformadores na área de serviço para consumidores residenciais, industriais, comerciais, rurais, poder público, iluminação, serviço público e consumo próprio. Os consumidores catalogados como rurais não foram considerados;
- Lista de códigos dos usuários ligados a cada transformador e alimentador na área de serviço, assim como informação de potência de cada transformador;
- Lista de consumo de energia dos últimos três anos de todos os usuários atendidos na área de serviço, com código de usuário, nome, endereço e classificação;
- Lista de novos projetos de infraestrutura recebidos pela empresa.

Outras informações importantes foram cedidas pela Secretaria de Planejamento da prefeitura da cidade, onde foram obtidas muitas informações sobre projetos atuais e futuros no planejamento da cidade, loteamentos, melhorias na cidade e outros dados pertinentes, assim como um mapa de zoneamento atual da cidade.

Por outro lado uma informação importante é a previsão temporal de demanda para a área de serviço calculada pela empresa concessionária, esta previsão geral deu um aumento de 40 MW durante um período de 20 anos. Esta demanda será tomada como critério de parada para o algoritmo. Os dados são especificados anualmente para um cenário de crescimento normal.

4.3 PREPARAÇÃO DOS DADOS

Nesta parte devem-se organizar os dados disponíveis da seção anterior com o objetivo de obter a resolução espacial e informações importantes que possam ajudar a verificar o método proposto para previsão espacial de toda área de serviço.

Como foram mostrados, no Capítulo 3 (seção 3.4.1), os dados disponíveis são organizados em duas bases de dados: espacial e demanda. A partir dessas bases obteve-se uma resolução espacial de $0,5 \text{ km}^2$ para cada subárea e a densidade de demanda para cada uma destas para cada classe de consumidor.

Ao final cada subárea da área de serviço tem-se a seguinte informação, como se mostra na Figura 4.2.

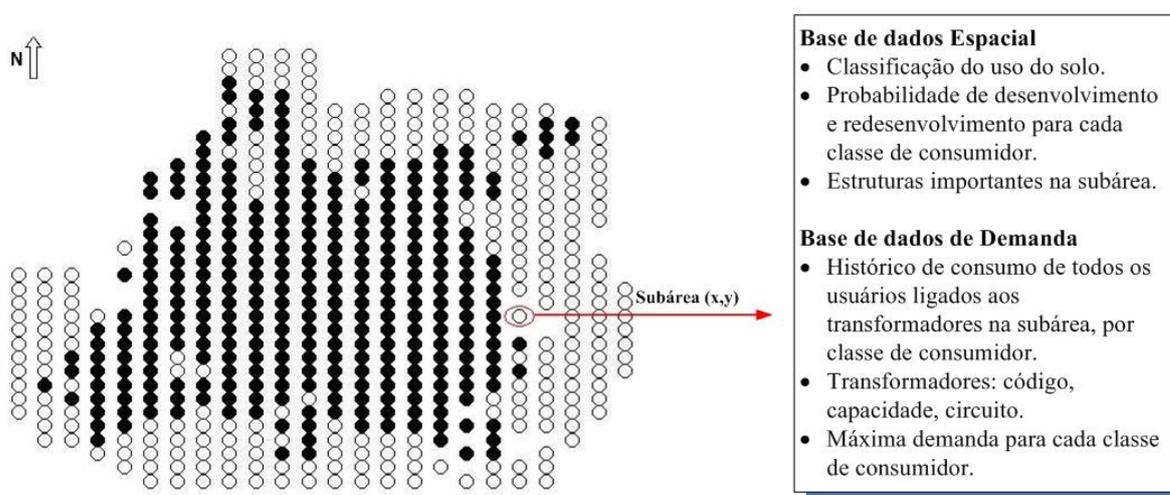


Figura 4.2 – Elementos de uma subárea na base de dados

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE SERVIÇO

Como já foi explicado nas seções do Capítulo 3, o método é formado por duas classes de agentes. As informações recebidas por cada agente são descritas a seguir:

- Agente Estático. Este receberá todas as informações da subárea já detalhadas na seção anterior. Quando este agente tiver que interagir ele informará ao agente móvel sua probabilidade de desenvolvimento ou redesenvolvimento e também sua demanda atual no tempo t ;
- Agente móvel. Este receberá o valor da previsão temporal de demanda para a área de serviço, demanda a repartir cada vez que interatue com um agente estático, tempo de horizonte de estudo e localização do centro de atividades.

Na figura 4.3 ilustra-se o caminho percorrido por um agente móvel em uma iteração. Este é mostrado no sentido da seta vermelha. Nesta figura se ressalta com um triângulo os agentes estáticos que foram escolhidos e a cor destes depende do nível de densidade de demanda. Pode-se observar como o agente móvel altera primeiro o centro de atividades para logo ir caminhando em direção do norte da cidade.

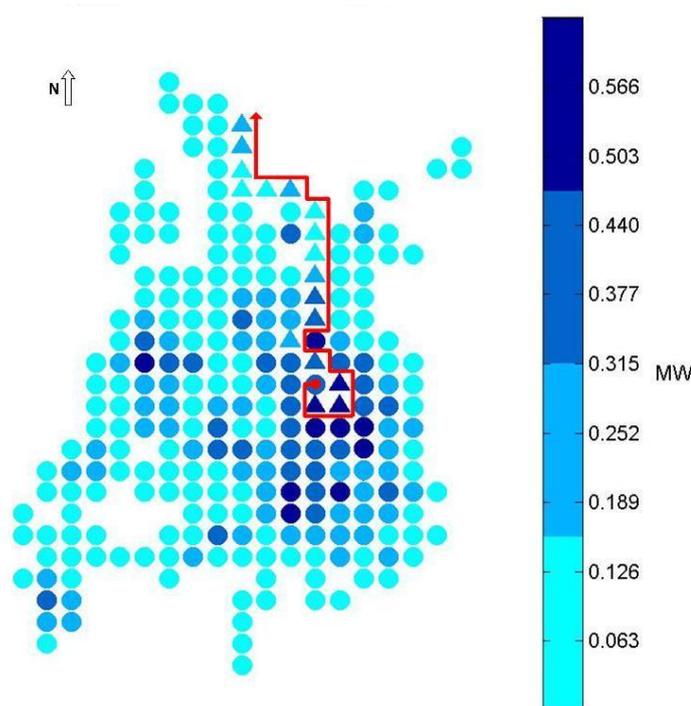


Figura 4.3 – Caminho percorrido pelo agente móvel representado por uma seta.

4.5 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS NOVAS CARGAS

O método implementado termina quando o agente móvel atinge o critério de parada, com o intuito de repartir a demanda prevista para cidade, e esta é obtida da previsão geral realizada para o horizonte de estudo. Ao final do método são gerados como saída, mapas que mostram a previsão de carga futura.

As previsões de crescimento só foram feitas para as cargas residenciais e comerciais, pois estas são a maioria em uma cidade. As cargas industriais, geralmente são alocadas em um parque industrial, tornando assim sua previsão mais fácil. Para que indústrias se instalem em uma cidade é necessária uma solicitação prévia de ligação à rede de distribuição.

A seguir se mostrará três iterações do algoritmo para uma melhor compressão da forma de como se realiza a distribuição espaço-temporal das novas cargas pelo método proposto.

O algoritmo na primeira iteração aloca o agente móvel no centro de atividades e dentro de uma janela de 3x3. Logo, se escolhe aleatoriamente 4 agentes estáticos para aplicar o operador genético de torneio. Em um primeiro momento se realiza dois torneios, onde em cada um destes é gerado um número aleatório e o agente ganhador é aquele cuja probabilidade de desenvolvimento se encontra mais perto pela direita do número aleatório gerado. Com os dois ganhadores se realiza um novo torneio e se obtém um agente estático ganhador. Este processo é mostrado na Figura 4.4.

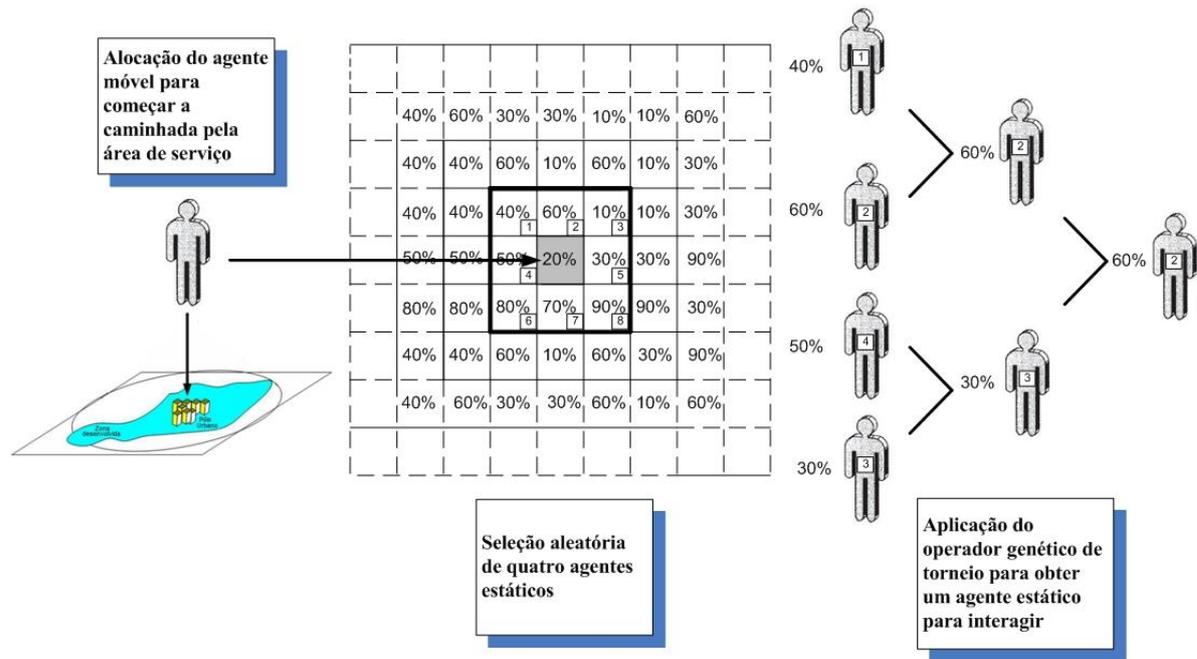


Figura 4.4 – Alocação do agente móvel no centro de atividades e aplicação do operador genético de torneio para primeira iteração.

A seguir, o agente móvel se traslada até a posição do agente estático ganhador do torneio e zeram-se as outras posições da antiga janela para que o agente móvel não possa retroceder.

O agente móvel gera um número aleatório e compara este valor com a probabilidade de desenvolvimento do agente estático ganhador. Para esta iteração o número gerado é 0,2 e a probabilidade de desenvolvimento do agente estático ganhador é 0,6. Assim, o agente móvel decide deixar uma quantidade de demanda e modificar a probabilidade de desenvolvimento do agente estático. Até atingir o critério de parada, inicia-se uma nova iteração. Este processo é mostrado na Figura 4.5.

Na figura 4.5 pode-se observar que depois da interação entre o agente móvel e o agente estático, este último teve um aumento de demanda e sua probabilidade de desenvolvimento tornou-se um valor baixo. Este agente se encontra em um período de estabilização no qual o crescimento é muito baixo, como foi explicado na seção 2.2.1, do Capítulo 2.

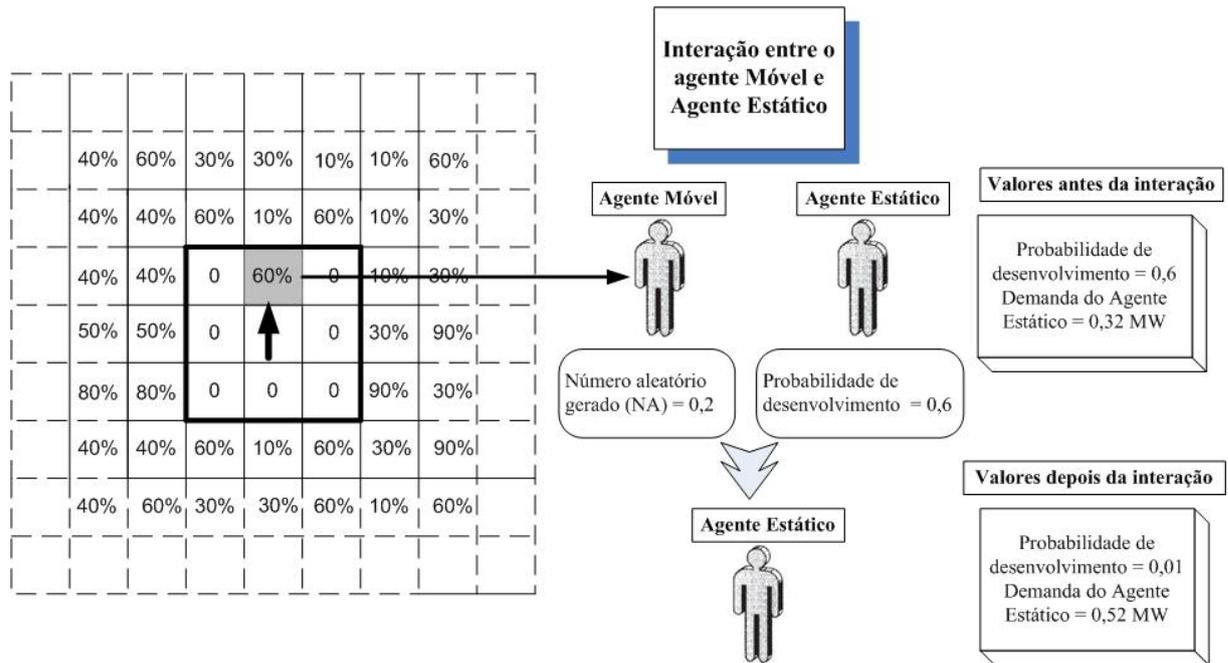


Figura 4.5 – Interação entre o agente móvel e agente estático para primeira iteração.

Na segunda iteração, se considera uma janela de 3x3 tomando como centro a nova posição do agente móvel. Novamente, realiza-se a seleção de um agente estático como foi mostrado na iteração anterior para obter um agente estático ganhador, como se mostra na Figura 4.6.

Observe-se que na janela de 3x3 se encontram cinco agentes com probabilidades iguais a zero, dois agentes com probabilidade igual a 0,6 e um agente com probabilidade de 0,1, para esta iteração o algoritmo deu como ganhador o agente com probabilidade de 0,1. Deve-se considerar que não em todas as iterações acontecerá que sempre ganha o agente estático com maior probabilidade de desenvolvimento que se encontra na janela de 3x3. Este agente estático com maior probabilidade de desenvolvimento não garantirá que seja o ganhador depois de aplicar o operador. Este agente pode ser escolhido em futuras iterações realizadas pelo algoritmo.

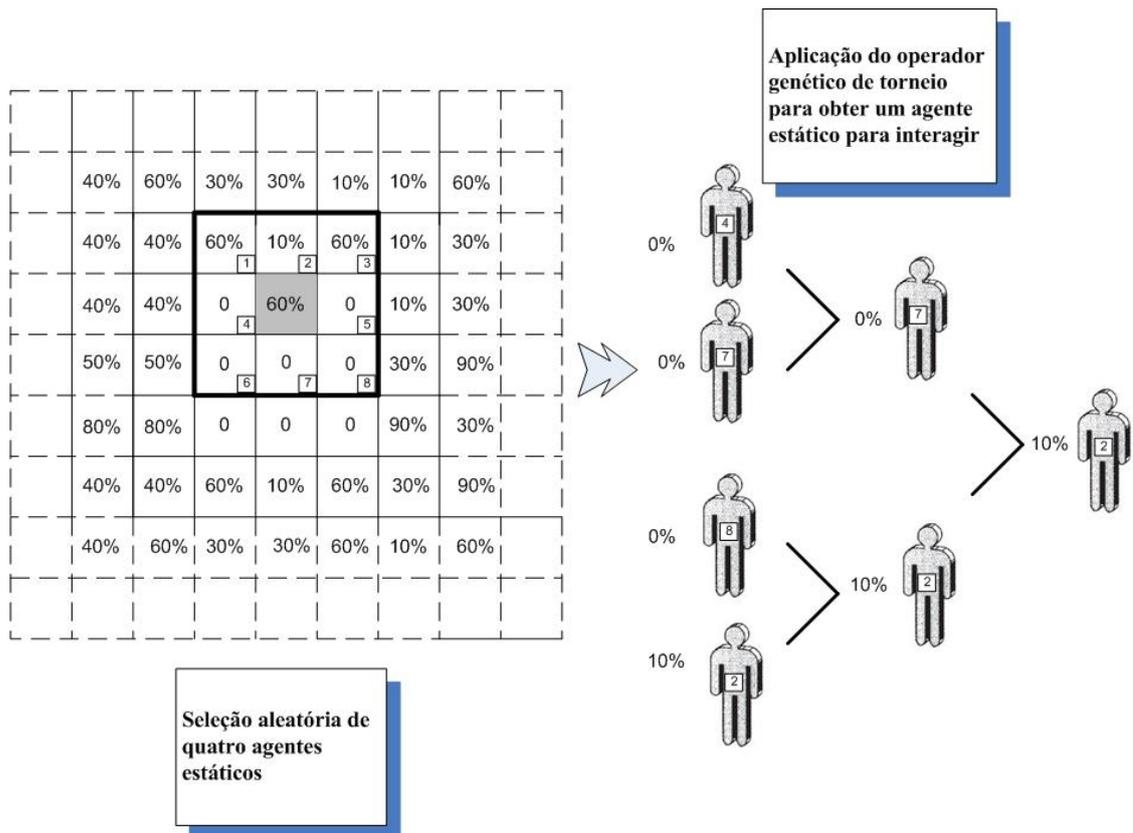


Figura 4.6 – Aplicação do operador genético de torneio para segunda iteração.

Logo, o agente móvel se move até a posição do agente estático ganhador do torneio, zeramos as outras posições da antiga janela, e é gerado um numero aleatório. O número aleatório gerado é 0,8 e probabilidade de este agente é 0,1. O agente móvel toma a decisão de não deixar demanda neste agente estático. O agente móvel ainda não atingiu o critério de parada, por isto precisará de uma nova iteração. Este processo se mostra na Figura 4.7.

Na figura 4.7 pode-se observar que depois da interação entre o agente móvel e o agente estático, não foram modificadas a demanda e a probabilidade neste último agente. Este agente se encontra em um período de estabilização, o valor da sua demanda pode aumentar, mas a probabilidade de que isto ocorra é baixa.

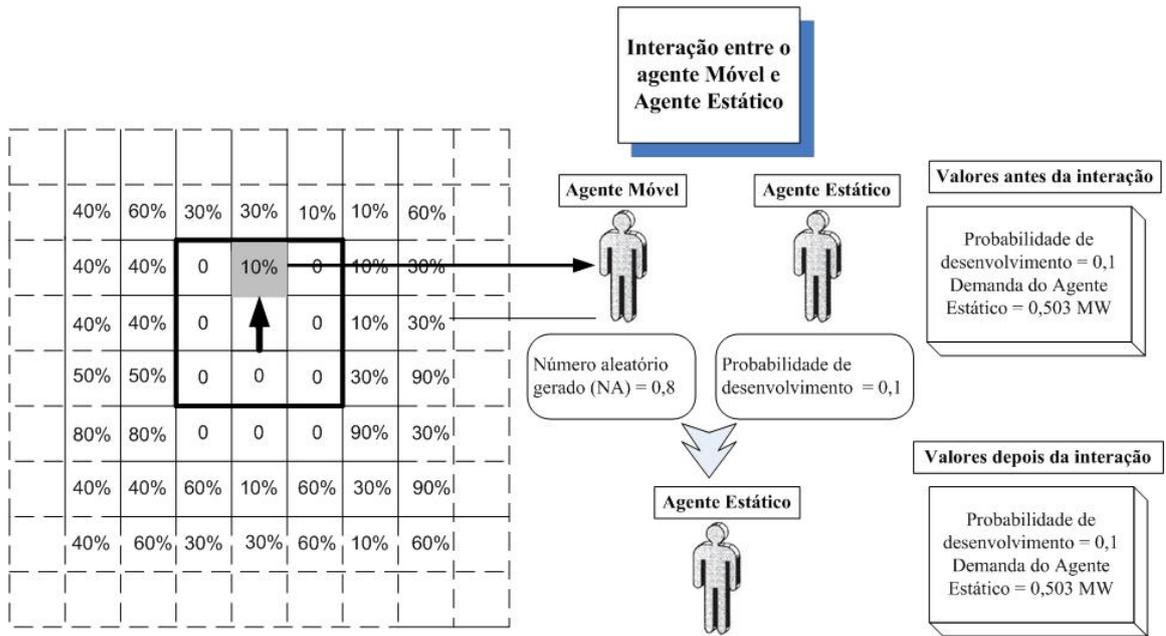


Figura 4.7 – Interação entre o agente móvel e agente estático para segunda iteração.

Na terceira iteração, o agente móvel se encontra em uma janela de 3x3 que tem como centro a nova posição. Realiza-se a seleção de um agente estático, como foi mostrado anteriormente e se gera um número aleatório. O número aleatório gerado é 0,3 e probabilidade de este agente é 0,6. O agente móvel toma a decisão de deixar demanda e modificar a probabilidade do agente estático, como se mostra na Figura 4.8.

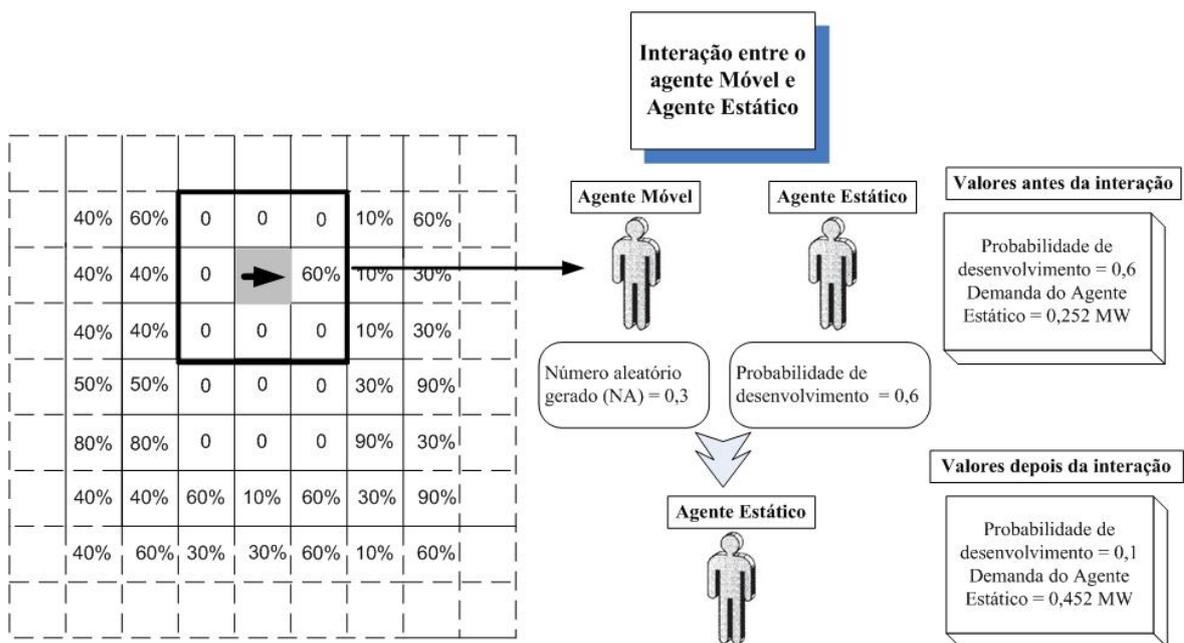


Figura 4.8 – Interação entre o agente móvel e agente estático para terceira iteração.

O agente móvel não atingiu o critério de parada e precisará de novas iterações até atingir este critério. O caminho percorrido até a terceira iteração é mostrada na Figura 4.9.

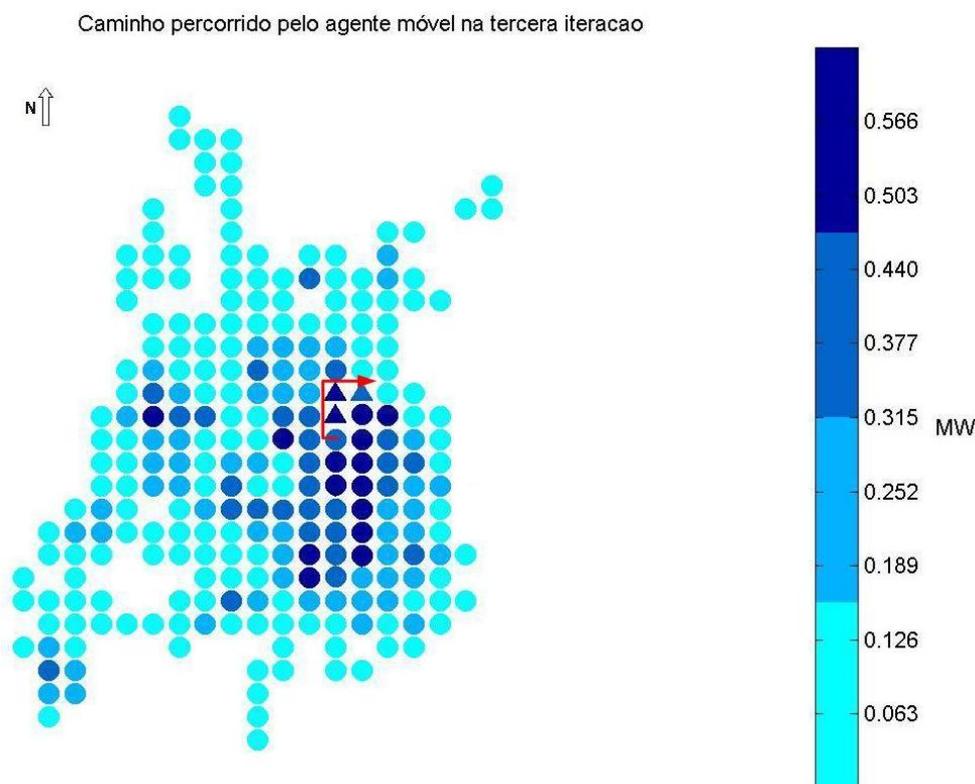


Figura 4.9 – Caminho percorrido pelo agente móvel até a terceira iteração

Ao final deste método, quando o agente atinge o critério de parada, são gerados mapas para a cada classe de consumidores. Nas figuras 4.10 - 4.13 a escala representa os níveis de demanda para cada subzona, as subzonas sem carga não são representadas.

Para realizar uma comparação das saídas do algoritmo com a carga inicial presente na área de serviço, nas figuras 4.10 e 4.14 apresentam-se as cargas residenciais e comerciais, respectivamente ao início das simulações.

Nas figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se os resultados obtidos para uma previsão de 5 e 10 anos respectivamente. Nestas figuras se pode observar como algumas subáreas alocadas na previsão de 5 anos novamente são identificadas na previsão de 10 anos, reproduzindo o crescimento da curva em *S* para as cargas em um sistema de distribuição, como foi mencionado na seção 2.2.1 do Capítulo 2.

Na figura 4.13 apresentam-se os resultados obtidos para a classe residencial utilizando o modelo de sistema multiagente apresentado neste trabalho para uma previsão de 20 anos. Nesta figura, pode-se observar que se deu um crescimento importante ao norte da cidade, devido a existência de uma cidade perto com pessoas que se trasladam para trabalhar na cidade de estudo. Além disso, existem loteamentos para a construção de casas populares. A parte sul da cidade apresenta um pequeno crescimento. Esta zona conta com projetos urbanos no curto prazo e conta com habitantes que têm uma maior renda. O centro de atividade se estendeu ao nordeste, para assim atender as novas cargas.

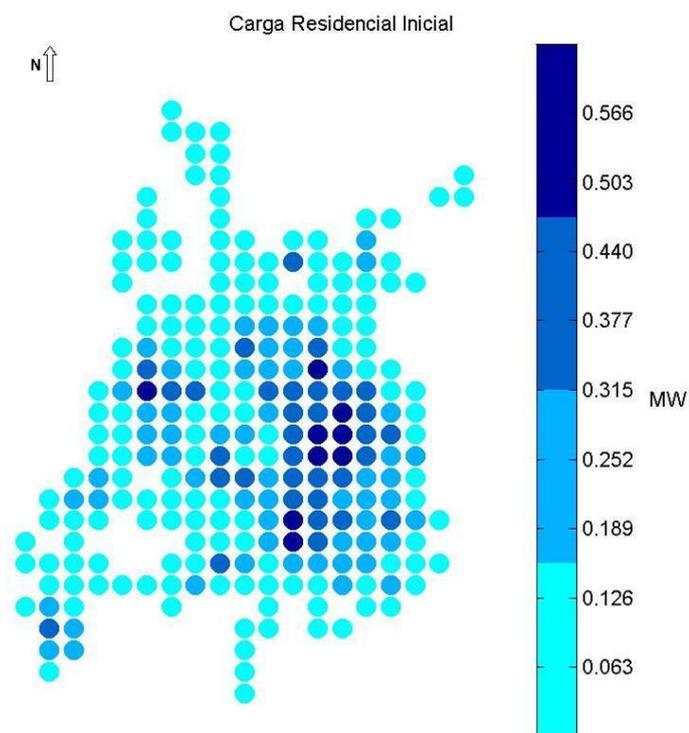


Figura 4.10 – Carga residencial ao início da simulação

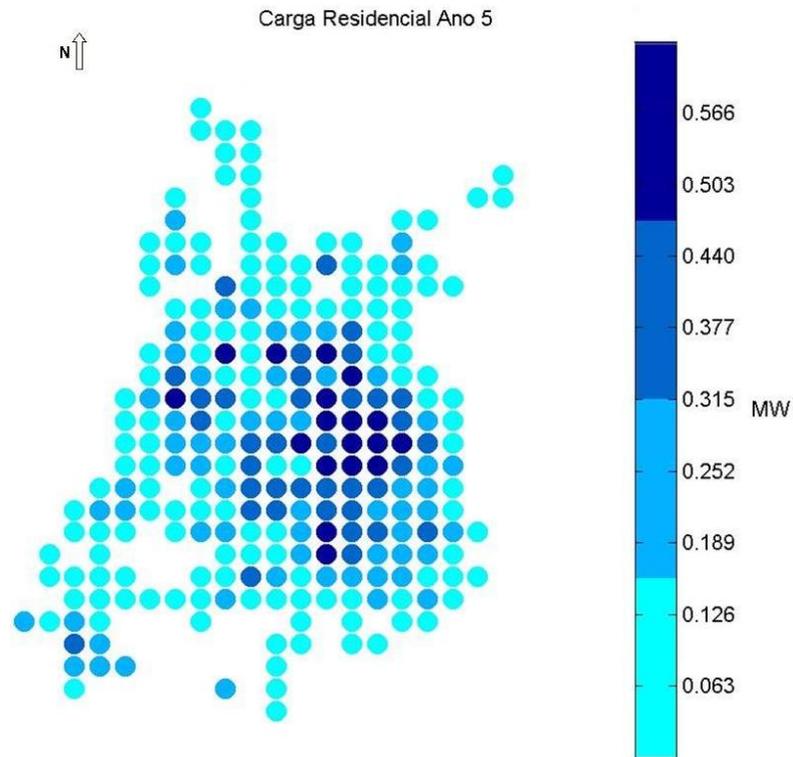


Figura 4.11 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 5 anos.

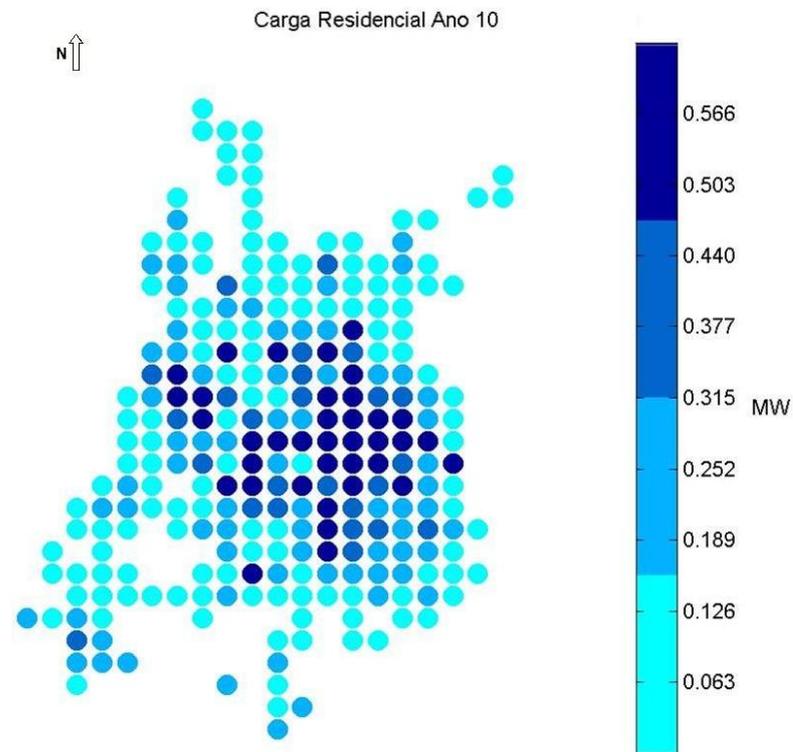


Figura 4.12 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 10 anos.

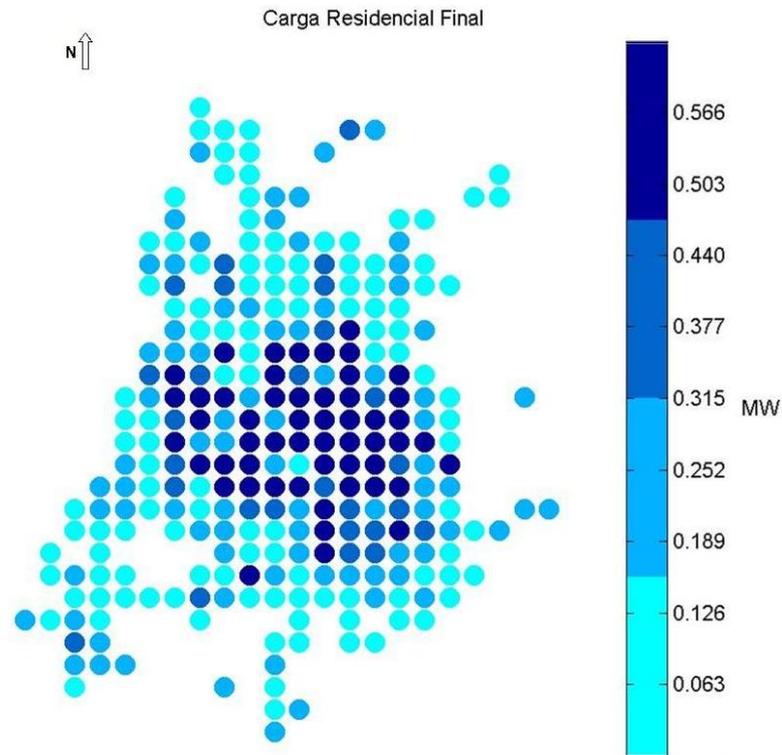


Figura 4.13 – Resultado para a carga residencial aplicando a metodologia de sistemas multiagentes para a previsão de toda a área de serviço em um horizonte de 20 anos.

A figura 4.15 ilustra a distribuição espaço-temporal da classe comercial para uma previsão de 5 anos e a Figura 4.16 ilustra a distribuição espaço-temporal da classe comercial para uma previsão de 10 anos. Estas figuras mostram como algumas subáreas comerciais são desenvolvidas nas áreas onde cargas residenciais na previsão de 5 anos foram desenvolvidas.

Na figura 4.17 apresentam os resultados obtidos para a classe comercial. Podem-se observar como algumas zonas comerciais são desenvolvidas nas áreas onde a zona residencial foi desenvolvida.

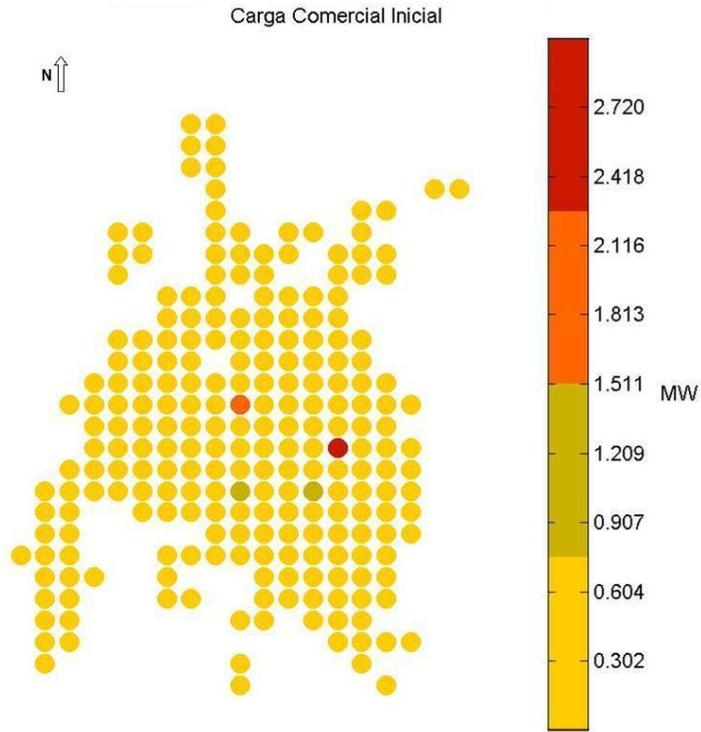


Figura 4.14 – Carga comercial ao início da simulação

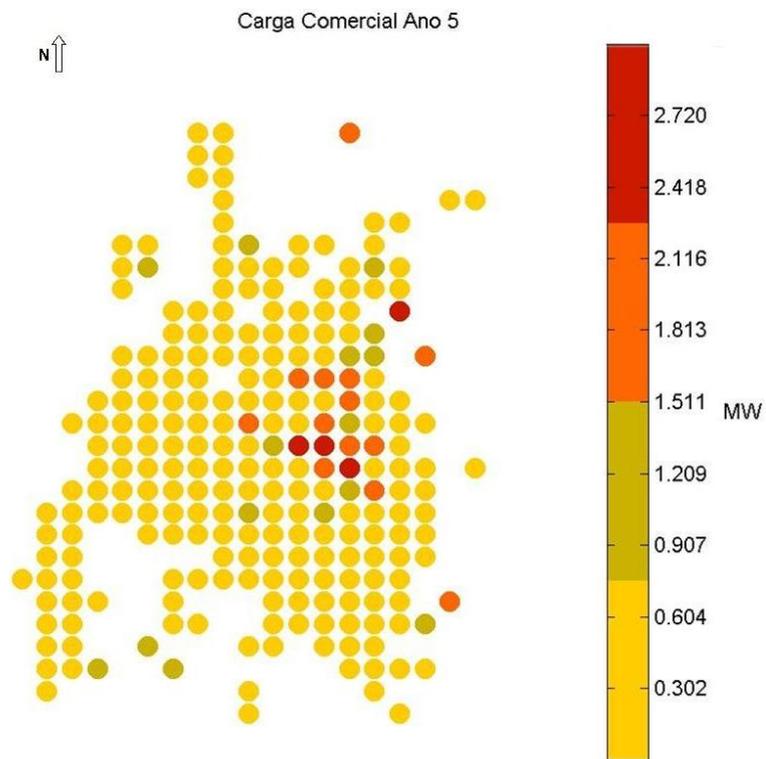


Figura 4.15 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos.

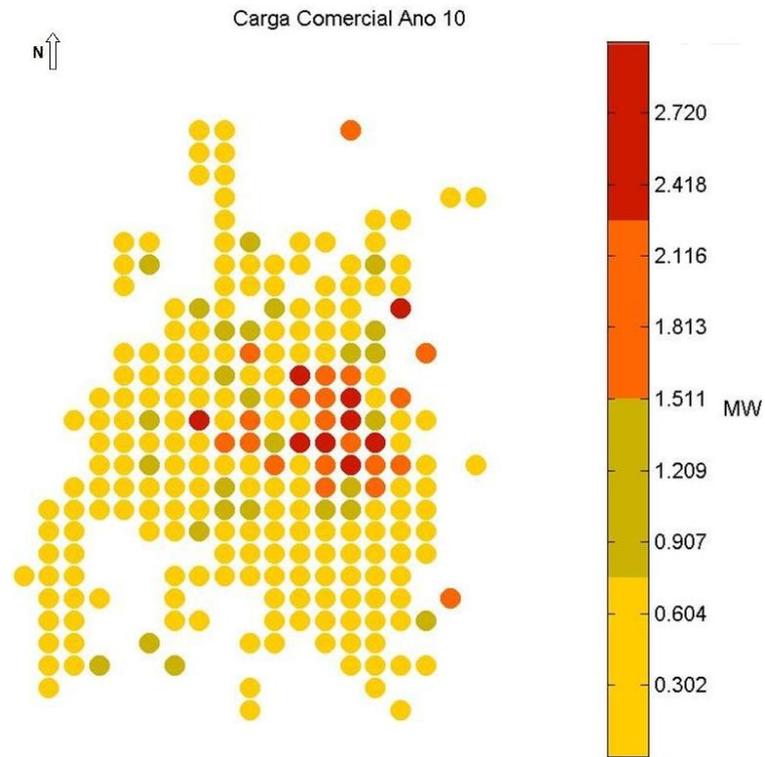


Figura 4.16 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos.

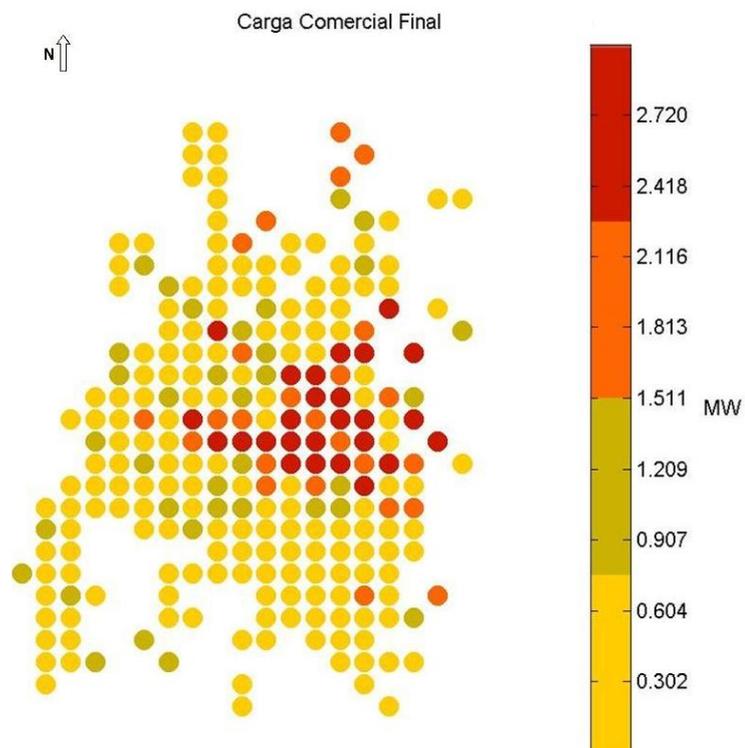


Figura 4.17 – Resultado para a carga comercial aplicando a metodologia de sistema multiagente para a previsão de toda a área de serviço em um horizonte de 20 anos.

4.6 CONCLUSÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO PARA A PREVISÃO ESPACIAL DE TODA A ÁREA DE SERVIÇO

O método desenvolvido cumpre parte do principal objetivo que é modelar os efeitos dinâmicos da cidade. Além disso, o método proposto considera a disponibilidade atual de dados nas empresas do setor, usando só o banco de dados comercial da empresa de serviço elétrico e o conjunto de dados georreferenciados dos elementos da rede.

Considerando a simplicidade do método, o tempo computacional é baixo para qualquer simulação, tomando até 10 segundos para fazer os cálculos e gerar os mapas que identificam o crescimento esperado de demanda na zona de serviço num computador com processador Intel core 2 duo e com 3,5 GB de RAM, utilizando MATLAB versão R2007a.

A característica do método de representar a quantidade de demanda esperada para cada subárea com um número real é uma importante contribuição para melhorar os dados de entrada no planejamento da expansão das redes elétricas.

Devido a complexidade deste tipo de previsão e a grande quantidade de dados diferentes usados em trabalhos anteriores, é difícil fazer uma comparação com outras metodologias. Por exemplo, não se pode comparar este método com o trabalho de autômatos celulares porque esse trabalho utiliza faixas para expressar a demanda de cada subárea. A única metodologia utilizada para comparar alguns trabalhos, realizados na previsão espacial de demanda, é a metodologia manual apresentada em Willis (2002), que utiliza o conhecimento e as decisões do planejador para determinar o crescimento da demanda. Esta metodologia manual foi explicada na seção 2.2.5, do capítulo 2.

O sistema multiagente desenvolvido para realizar a previsão espacial de demanda de toda a área de serviço pode ser considerado com um cenário de referência, no qual se considera o crescimento dinâmico da cidade. Este cenário é importante para estimativas de cargas no sistema de distribuição. Além disso, o objetivo principal procura simular as influências de cargas especiais nas vizinhanças, deste modo, os eventos futuros podem ser tomados em conta nos planejamentos de longo prazo.

Embora seja possível fazer o estudo da influência das cargas especiais nas vizinhanças com o método apresentado, é desenvolvido outro método para simular melhor o efeito radial de crescimentos das cargas especiais.

Deste modo, para cumprir com a totalidade do principal objetivo do trabalho se desenvolveu um novo método que simula outras classes de cenários na previsão de demanda espacial e em conjunto com o método desenvolvido cumprirá com objetivo principal do trabalho.

No seguinte capítulo se mostrará o novo sistema multiagente que se utilizará para o estudo de cenários. O novo sistema multiagente considera duas classes diferentes de agentes e a forma de como estes novos agentes vão interagir, também, é diferente ao sistema multiagente detalhado no Capítulo 3. Estas diferenças serão mostradas no seguinte capítulo.

Capítulo 5 - Método de Previsão Espacial de Demanda para o Estudo de Cenários Utilizando um Sistema Multiagente

A capacidade de considerar acontecimentos futuros na previsão de demanda elétrica é particularmente uma necessidade para o planejamento de longo prazo. Estes acontecimentos futuros podem ser modelados utilizando cenários e representar uma análise de sensibilidade da previsão realizada. Para o planejamento de distribuição, uma análise de sensibilidade é prestar uma atenção especial a possíveis mudanças que podem acontecer no futuro e, conseqüentemente, nas alterações do crescimento de algumas subáreas. Fatores como rodovias, estradas, construções de casas populares, migrações, entre outros fatores da dinâmica urbana podem variar em forma local uma subárea ou subáreas vizinhas. Por exemplo, construção de uma nova ponte e uma estrada, a qual pode alterar os padrões de crescimento na área de serviço, deste modo, mudará o crescimento esperado nas subáreas vizinhas a esta nova construção. A melhor forma de estudar tais acontecimentos e conhecer como modificam os planos de expansão das empresas concessionárias de serviço elétrico é

utilizar os planejamentos multicenários (WILLIS, 2002). Esta classe de planejamento é uma prática das modernas empresas de distribuição que permite considerar os projetos de curto prazo, fornecendo a sensibilidade de considerar estes projetos nos planos de longo prazo.

Neste capítulo é apresentado um novo método para considerar o estudo de cenários dentro da previsão espacial de demanda. As principais características deste método são: permite fazer simulações de subáreas da área de serviço, mostra a influência de determinadas cargas especiais nas vizinhanças desta, uso de dados comerciais e não técnicos, fácil implementação, uso de um número real para caracterizar melhor a densidade de carga de cada subárea. Em um primeiro momento se apresentará a importância de utilizar cenários no planejamento e como se aplicam estes na previsão de demanda. A seguir, mostra-se a construção do modelo para o estudo de cenários, na qual serão definidos os dados necessários para aplicação deste algoritmo, os tipos de agentes a utilizar para a caracterização da área de serviço. E por último se apresentará um fluxograma mostrando o algoritmo do novo método proposto.

5.1 METODOLOGIA DE CENÁRIOS

Em Porter et al. (1991), são definidos os cenários como esboços parciais de alguns aspectos do futuro, no qual sua estruturação pode consistir em formas puramente narrativas, ou até modelos detalhados com dados quantitativos.

O cenário como instrumento de apoio à decisão pode ser afrontado não só como um exercício de predição, mas como uma atividade que pretende fazer descrições plausíveis e consistentes de possíveis situações futuras.

É importante destacar que existem diferenças entre cenários e previsões. A diferença principal está no objetivo de um e de outro. Enquanto a previsão tem o objetivo explícito de acertar, com maior probabilidade possível as variáveis em questão, os cenários têm o objetivo de traçar as possíveis e prováveis combinações de variáveis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2005).

O estudo de cenários é utilizado pelas empresas elétricas de distribuição para se referir ao estudo dos fatores futuros que podem influenciar no planejamento de expansão das redes elétricas, como construção de uma rodoviária que incentivará o crescimento da demanda industrial nas subáreas próximas desta nova edificação. Nesta classe de cenários a nova construção pode ser considerada como uma carga especial que tem um raio de influência. Na maioria das ferramentas utilizadas pelas empresas de distribuição de energia elétrica, para realizar o estudo de cenários se considera toda a área de concessão. Mas existem cargas especiais, nas quais sua preponderância não abrange toda essa determinada área. Deste modo, para o estudo deste tipo de cargas não é necessário considerar toda a extensão da concessão.

Como foi mostrado, evidencia-se a importância de utilizar cenários e visa-se a necessidade de implementar um método que sirva de apoio para as empresas de distribuição na realização de estudos de cenários das empresas concessionárias de serviço elétrico.

Considerando esses precedentes, foi desenvolvido um novo método baseado em sistemas multiagentes para realizar estudo de cenários. O novo método proposto considera que em cada cenário se procura estudar a demanda esperada devido a uma nova carga especial de estudo. Esta demanda será distribuída ou propagada em uma determinada parte da área de serviço, dependendo do raio de influência e da quantidade de demanda da nova carga. Como carga especial se pode considerar uma empresa que é alocada em uma subárea disponível, mudança de uma carga existente a outra subárea dentro da área de serviço, ou qualquer outra carga que tenha a característica de ter um raio de influência e uma demanda para distribuir ou propagar.

O novo método apresentado neste capítulo se diferencia do método apresentado no Capítulo 3, devido ao fato de analisar uma parte da área de serviço, utilizar outra classe de agentes, não utilizar o operador genético de torneio e modelar a propagação da demanda causada por uma carga especial. Esta propagação de demanda é similar à propagação de ondas produzidas em uma vasilha com água, as quais são produzidas quando se deixa cair uma gota de água na vasilha, considera-se que a força de propagação se perde na medida em que se afasta do ponto onde foi deixado cair esta gota de água, como se mostra na Figura 5.1. Na seguinte seção se apresentará a construção do novo método para estudos de cenários.

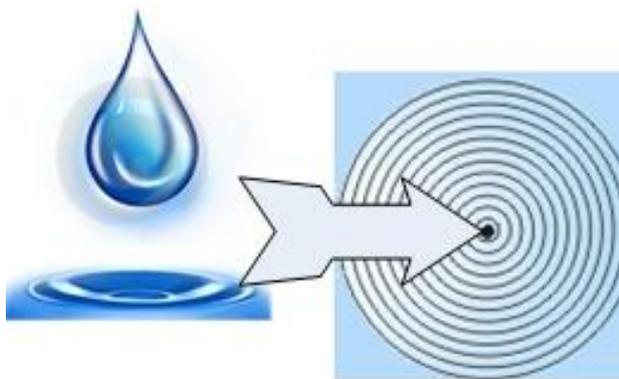


Figura 5.1– Ondas de água geradas em uma vasilha.

5.2 CONSTRUÇÃO DO MÉTODO DE SISTEMA MULTIAGENTE PARA O ESTUDO DE CENÁRIOS NA PREVISÃO DE DEMANDA ESPACIAL

Para construção deste novo método se utiliza todos os conceitos dos capítulos anteriores. Também, os dados do método anterior para a previsão espacial de toda a área de serviço, que foram mostrados na Figura 3.7, estes dados são considerados como parte de entrada deste novo algoritmo.

O novo algoritmo considera que em cada cenário se tem: uma nova carga, com um raio de influência e uma demanda de propagação. Assim, é necessário conhecer este raio de influência da nova carga, para o cálculo deste raio pode-se considerar níveis de ruído, níveis de poluição, entre outros fatores originados pela nova carga. A influência da nova carga só se apresenta nas subáreas que se encontram localizadas dentro deste raio. Por exemplo, um cemitério ou uma estação de esgoto tem um efeito de repulsão em 3 ou 5 km na vizinhança, mas uma pessoa que more a 10 km ou mais do local, não é afetado por esta.

Por outro lado, é necessário determinar se a carga tem efeito de repulsão, atração ou uma mistura destas propriedades, sobre cada classe de consumidor. Por exemplo, Antes da chegada de uma empresa a uma subárea, algumas cargas residenciais da vizinhança desta empresa, podem mudar para outras subáreas para evitar o nível de ruído e poluição gerada por esta empresa, deixando disponíveis estas subáreas para chegada de cargas comerciais ou moradias para serem utilizadas pelos trabalhadores desta empresa. Para simular este efeito se

modificará as probabilidades de desenvolvimento das subáreas vizinhas dentro do raio de influência, considerando a nova classe de carga.

5.2.1 Processamento dos Dados

O processamento de dados para este novo algoritmo é similar ao processo descrito na seção 3.4.1 do Capítulo 3. Todos os dados de entrada para o algoritmo anterior, também são dados de entrada para este novo algoritmo, mas serão necessários novos dados para o estudo de cenários. A seguir se descreve a distribuição dos novos dados em cada uma das bases já mencionadas.

5.2.1.1 Base de Dados Espacial

Nesta base de dados se devem adicionar: a localização da nova carga; estudos de níveis de ruído, poluição, ou outras características importantes que podem produzir efeito nas subáreas vizinhas; estudos da geração de emprego na área de serviço e quantidade de trabalhadores necessários para atividade da empresa; entre outros dados que sirvam para caracterizar melhor esta nova carga.

As empresas realizam diversos estudos para cumprir os objetivos de seus negócios, desses estudos pode-se obter a quantidade de trabalhadores que se requerem por esta empresa. Para a aplicação proposta de cenários foram extraídos dados de Willis (2002), na qual calcula o número de novos consumidores para uma empresa de montagem de caminhão.

A determinação da resolução espacial é a mesma do algoritmo anterior, a qual foi adotada de Carreno e Padilha-Feltrin (2008).

A influência da nova carga em estudo abrange as subáreas vizinhas a esta carga, até um raio de influência previamente calculado. Esta influência modificará as preferências destas

subáreas. Portanto, devem-se modificar as probabilidades de todas as subáreas que se localizam dentro do raio de influência.

Observa-se, que só é necessário mudar as probabilidades das subáreas que se localizam dentro do raio de influência e não as probabilidades das outras subáreas da área de serviço, devido à preponderância da carga que é limitada por um raio de influência. Logo, não é necessário fazer uma mudança nas probabilidades de toda a área de serviço.

5.2.1.2 Base de Dados de Demanda

Nesta base de dados se adicionam: quantidade de demanda esperada para a nova carga especial de estudo e fatores de demanda por cada classe de consumidor da área de serviço.

Da base de dados espacial pode-se obter o número de consumidores novos que demandará esta carga. Para converter esses novos consumidores em demanda disponível que se apresenta na cidade é necessário utilizar um fator de conversão. Este fator de conversão pode sair de uma análise estatística da base de dados de demanda da cidade.

A demanda da carga em estudo será considerada como uma demanda que se propaga por uma parte da área de serviço, desde sua localização até perder sua força. A força é a quantidade de demanda a propagar. Considera-se que esta propagação é similar as ondas geradas por uma gota de água em uma vasilha, como foi mostrado na Figura 5.1. Em cada onda se repartirá uma quantidade de demanda. Deste modo, na seguinte onda se repartirá uma quantidade demanda menor comparada com a onda anterior.

Realizando uma análise da característica de carga, pode-se obter o comportamento desta carga. Este comportamento pode ser de repulsão, atração ou mistura destas sobre as subáreas vizinhas. Portanto, se deve determinar esta característica para poder saber se existirá mudança de cargas vizinhas existentes, chegada de novos consumidores ou uma combinação destas. Em caso de existir uma mudança de cargas a demanda destas, formará parte da demanda de propagação.

Neste algoritmo, similarmente ao algoritmo anterior de previsão espacial de toda a área serviço, se considera números reais para representar a densidade de demanda de cada subárea e a nova carga em estudo.

5.2.2 Representação da Zona de Estudo

O passo seguinte do novo método, após ter a característica da nova carga, o raio de influência e a demanda de propagação, é caracterizar cada subárea utilizando um agente. Devido ao fato que se deseja modelar a influência de uma carga na vizinhança desta, prefere-se utilizar duas classes de agentes diferentes, descritos a seguir:

5.2.2.1 *Agente Reativo*

Esta classe de agentes serão alocados em cada subárea e adquirirá as particularidades de cada subárea, entre estas a demanda para cada classe de consumidor e a probabilidade de desenvolvimento. A principal característica deste agente é que responde ante um estímulo. O estímulo será a influência da demanda de propagação originada por uma carga em estudo.

5.2.2.2 *Agente Proativo*

Esta classe de agente conta com um raio de influência, deste modo as cargas que se localizam dentro deste raio pode ser repelidas, atraídas ou uma combinação destas dependendo da característica da carga. A principal característica é que este agente tem como objetivo propagar a demanda prevista para cada passo de tempo, partindo da localização da nova carga até terminar de repartir esta demanda no passo de tempo correspondente. A propagação da

demanda é feito por meio de ondas, onde em cada onda se deixará, ou não, uma quantidade de demanda nos agentes reativos que são alcançados por esta propagação, isto depende, da probabilidade de desenvolvimento de cada agente. A demanda a propagar-se poderá receber uma quantidade de demanda dos agentes reativos com carga, localizados dentro do raio de influência, caso a característica da carga especial seja de repulsão.

Para modelar a resposta do agente reativo quando é alcançado pela demanda de propagação, foram estabelecidas as seguintes regras:

- Se um agente reativo representa uma subárea não desenvolvida e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança em sua demanda este ganhará uma probabilidade alta de desenvolvimento para o próximo passo de tempo;
- Se um agente reativo representa uma subárea desenvolvida, a carga especial apresenta uma característica de repulsão e se encontra dentro do raio da influência, então este agente perderá uma quantidade de sua demanda e esta quantidade será acrescentada a demanda de propagação para o próximo passo de tempo.
- Se um agente reativo representa uma subárea desenvolvida, se encontra fora do raio da influência, com uma demanda considerada média e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança de sua demanda e este ganhará uma probabilidade média de desenvolvimento para o próximo passo de tempo;
- Se um agente reativo representa uma subárea desenvolvida, se encontra fora do raio da influência, com uma demanda alta e é escolhido pelo algoritmo para aumentar sua demanda, então haverá uma mudança de sua demanda nesse agente e este ganhará uma probabilidade baixa de desenvolvimento para o próximo passo de tempo.

5.2.3 Probabilidades de Desenvolvimento

As probabilidades de desenvolvimento são consideradas como dados de entrada e foram citadas na seção 3.4.3, do Capítulo 3.

Neste algoritmo considera-se para o estudo de cenários que só as subáreas localizadas dentro da área do raio da influência devem sofrer uma mudança em suas probabilidades. Para

fazer esta mudança deve-se considerar a preponderância da carga em estudo, como influência a cada classe de consumidor. Todas as subáreas podem reduzir ou aumentar um determinado valor, ou se pode optar por adotar diferentes valores para cada subárea.

5.2.4 Previsão da Demanda da Carga de Estudo

Toda nova empresa antes de realizar suas atividades realiza diversos estudos como: número de trabalhadores requeridos, quantidade de demanda elétrica necessária, planos de expansão de seu negócio, entre outros.

Para o estudo da previsão de demanda em cada cenário será necessário conhecer a quantidade da nova demanda que será gerada por esta nova carga. Para isto, considerando os estudos disponíveis e base de dados de demanda, se pode obter a demanda que será utilizada como demanda de propagação para cada cenário.

Esta demanda será dada ao agente proativo, com o objetivo de propagar esta demanda, partindo da localização até repartir toda a demanda prevista em cada passo de tempo. A demanda a repartir em cada passo de tempo será considerada como critério de parada deste algoritmo.

5.2.5 Localização Temporal Utilizando o Algoritmo de Cenários

A cidade se encontra dividida em subáreas, nas quais se localiza agentes reativos. Cada agente reativo tem sua própria densidade de demanda e uma probabilidade de desenvolvimento.

A demanda obtida da previsão da nova carga é uma demanda disponível que se propagará desde a localização desta carga, até ser repartida pela área de serviço. Esta

demanda pode apresentar uma atração para alguns consumidores, repulsão para outros ou pode apresentar uma mistura destas.

Para poder simular este fenômeno complexo, o sistema multiagente vai simular as possíveis subáreas vizinhas, subáreas sem carga ou com carga que poderiam receber novas cargas. Também, consideram-se as possíveis subáreas que podem ser repelidas em função da influência da nova carga. Este processo será simulado com um agente proativo que propagará uma quantidade de demanda, em forma de onda, até repartir toda esta demanda prevista no passo de tempo correspondente. Em cada onda alcançará um número de agentes reativos, os quais poderiam ter as seguintes respostas: Por um lado aumentar sua densidade de demanda, a qual depende da probabilidade de desenvolvimento; por outro lado, dar uma quantidade de sua demanda à demanda de propagação, caso a carga especial apresente uma característica de repulsão.

A quantidade de demanda a repartir em cada passo de tempo obtida da previsão para a carga em estudo é utilizada neste trabalho como critério de parada no algoritmo. O agente proativo propagará separadamente a demanda de cada tipo de consumidor pela área de serviço até atingir o critério de parada.

Também se deve definir a quantidade de demanda que vai aumentar cada vez que um agente reativo seja alcançado pela onda da demanda de propagação. No caso em que a nova carga de estudo tenha a característica de repulsão, se deve definir uma quantidade de demanda que o agente reativo dará à demanda de propagação. Para a aplicação deste método se considera um mesmo valor de quantidade de demanda que pode receber ou dar o agente reativo.

Os agentes reativos não têm a possibilidade de aumentar sua demanda, a não ser que sejam alcançados pela onda de propagação. As probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos podem variar em passos discretos de tempo. Estes passos discretos são de um ano. Os resultados de uma simulação são utilizados como entrada para a seguinte simulação.

Os agentes reativos são selecionados dentro uma janela $(2n+1) \times (2n+1)$, na qual o valor de n é o número da onda de propagação da demanda. Na figura 5.2, ilustram-se uma janela 3×3 delimitada por uma linha vermelha, para mostrar a onda número 1; uma janela 5×5 delimitada por uma linha azul, para mostrar a onda número 2. Uma janela 7×7 delimitada por

uma linha verde, para mostrar a onda número 3. Cada posição das janelas se tem uma probabilidade de desenvolvimento, expressa em porcentagem. No centro da janela se encontra o agente proativo, na cor cinza.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	10%	30%
60%	40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	40%
30%	50%	20%	60%	10%	60%	10%	30%	40%
30%	40%	40%	10%	40%	10%	10%	30%	40%
90%	50%	50%	20%	50%	10%	30%	70%	50%
30%	60%	60%	10%	30%	40%	70%	30%	80%
90%	40%	40%	40%	10%	40%	30%	90%	40%
60%	40%	60%	30%	30%	40%	10%	60%	40%
80%	80%	70%	90%	40%	60%	10%	60%	30%

Figura 5.2 – Janela para as três primeiras ondas de propagação da demanda.

Para cada onda de propagação, as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos se organizam em vetores separados. Assim, se tem um vetor de probabilidades e outro vetor de demanda. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Analisam-se cada elemento dos três vetores mencionados. Em um primeiro momento deve-se reconhecer se é um agente reativo sem carga ou com carga. Em caso de ser um agente reativo com carga, deve-se verificar, se este agente encontra-se dentro do raio de influência do agente proativo. Como foi exposto, no caso em que a nova carga de estudo tenha a característica de repulsão, os agentes reativos com carga que se encontram dentro do raio de influência perderam uma quantidade de demanda que será adicionada à demanda de propagação. Em caso de ser um agente reativo sem carga ou um agente reativo com carga que está fora do raio de influência, comparar a probabilidade de desenvolvimento deste agente com o número aleatório correspondente criado, se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade

de demanda, e mudam-se as probabilidades para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas na seção 5.2.2.

Por exemplo, para o caso anterior, considera-se que o raio de influência é igual a 1 Ud, que corresponde à dimensão de 1 subárea e analisa-se a janela da onda 1, como se mostra na Figura 5.3. Os vetores de demanda, probabilidades e números aleatórios gerados, se mostram na Figura 5.4.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%
50%	20%	60%	10%	60%	10%	30%
40%	40%	10%	40%	10%	10%	30%
		1	2	3		
50%	50%	20%	50%	20%	30%	70%
		4		5		
60%	60%	10%	30%	40%	70%	30%
		6	7	8		
40%	40%	40%	10%	40%	30%	90%
40%	60%	30%	30%	40%	10%	60%

Figura 5.3 – Janela da onda 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	Vetor de demanda (MW)
0,30	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	3	4	5	6	7	8	Vetor de probabilidades
0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	
1	2	3	4	5	6	7	8	Vetor de números aleatórios
0,4	0,6	0,3	0,5	0,1	0,2	0,7	0,8	

Figura 5.4 – Vetores associados com a janela da onda 1.

Para passar a onda 2 será necessário zerar os elementos da janela da onda 1, para que estes elementos não sejam considerados na nova janela. Na figura 5.5 mostra-se a janela da onda 2 e na figura 5.6 mostram-se os vetores correspondentes desta janela, observe-se que só são considerados os agentes reativos que tem uma probabilidade de desenvolvimento maior que zero. Assim, o algoritmo analisará agentes reativos que não foram considerados em ondas anteriores.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%
50%	20%	60%	10%	60%	10%	30%
40%	40%	0	0	0	10%	30%
50%	50%	0	50%	0	30%	70%
60%	60%	0	0	0	70%	30%
40%	40%	40%	10%	40%	30%	90%
40%	60%	30%	30%	40%	10%	60%

Figura 5.5 – Janela da onda 2.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Vetor de demanda (MW)
0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Vetor de probabilidades
0,2	0,6	0,1	0,6	0,1	0,4	0,1	0,5	0,3	0,6	0,7	0,4	0,4	0,1	0,4	0,3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Vetor de números aleatórios
0,1	0,4	0,3	0,8	0,5	0,6	0,5	0,7	0,4	0,8	0,8	0,5	0,6	0,2	0,7	0,4	

Figura 5.6 – Vetores associados a janela da onda 2.

Novamente este procedimento se repete até que toda a demanda de propagação seja repartida, atingindo assim, o critério de parada.

Um resumo deste algoritmo é apresentado na Figura 5.7. O algoritmo é repetido para cada passo de tempo utilizando a resposta final do passo $t-1$ como dado de entrada para o passo t .

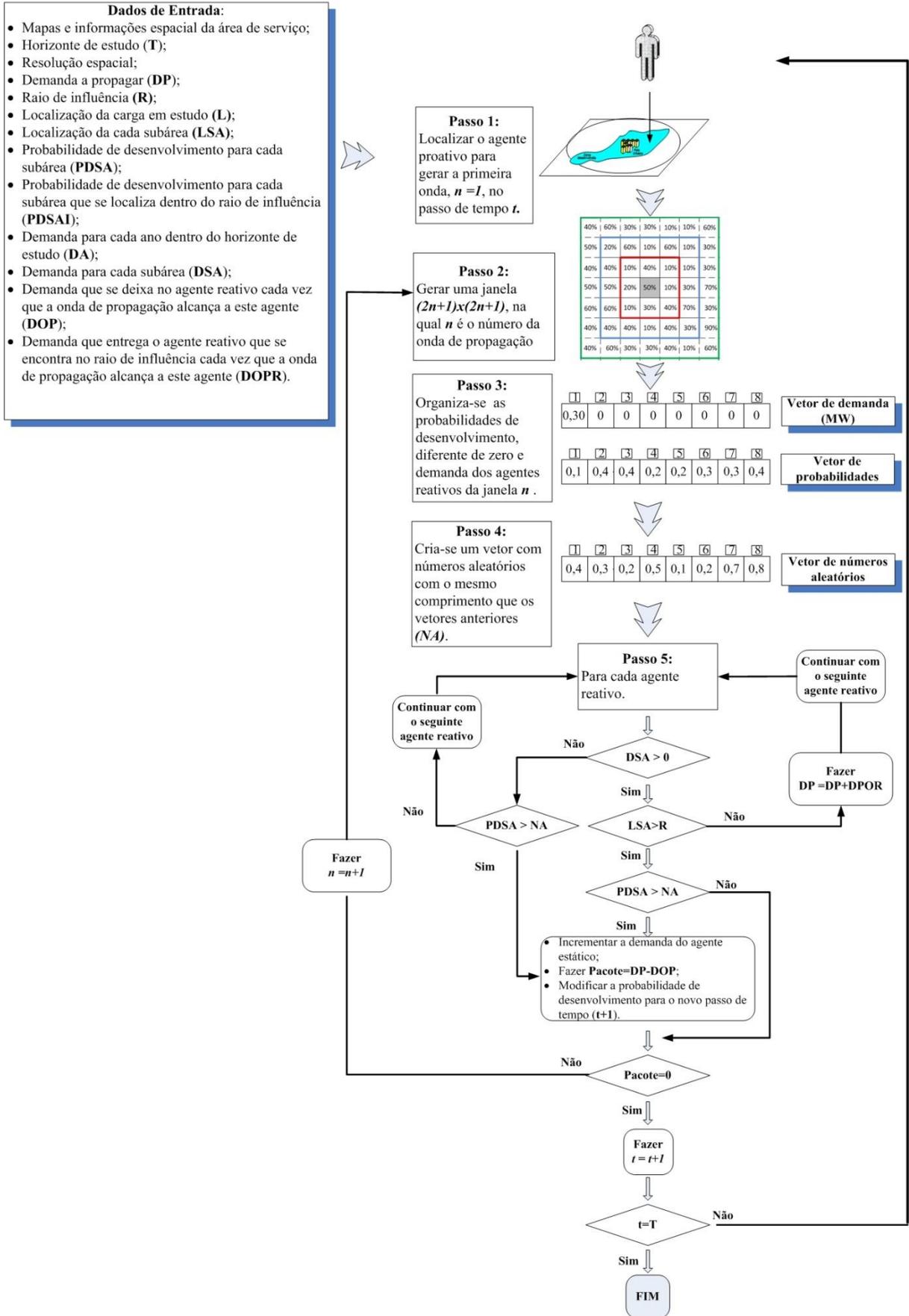


Figura 5.7 – Fluxograma do algoritmo para o método proposto para estudo de cenários.

Capítulo 6 - Aplicação do Método de Previsão Espacial de Demanda para o Estudo de Cenários Utilizando um Sistema Multiagente

Neste capítulo, o novo método proposto para estudo de cenários, será mostrado passo a passo, apresentando todos os detalhes necessários para entendê-lo, começando pela apresentação da nova base de dados, mostrando a forma pormenorizada do algoritmo e finalizando com mapas de cenários futuros de previsão espacial de demanda para a área de estudo. Ao final deste capítulo serão mostradas as conclusões da aplicação deste novo método. As características da área de estudo, na qual foi testado o método, se mostra no Capítulo 4, na seção 4.1.

6.1 COLETA DE DADOS

A aplicação deste novo método, para o estudo de cenários, considera todos os dados técnicos mostrados na seção 4.2, do Capítulo 4.

As cargas industriais, geralmente são alocadas em um parque industrial, devido a medidas governamentais. Para que as indústrias se instalem em uma cidade é necessário um aval da prefeitura. Ao mesmo tempo a empresa concessionária de distribuição de energia elétrica também é comunicada, para que esta faça o estudo e a análise da instalação desta nova carga elétrica. Para realizar isto, a empresa de energia necessitará realizar um estudo de cenário. Considerando essa necessidade, foi desenvolvido o primeiro cenário de aplicação do novo método proposto, no qual a nova carga industrial é localizada na parte sudeste da área de estudo como é mostrado na Figura 6.1.

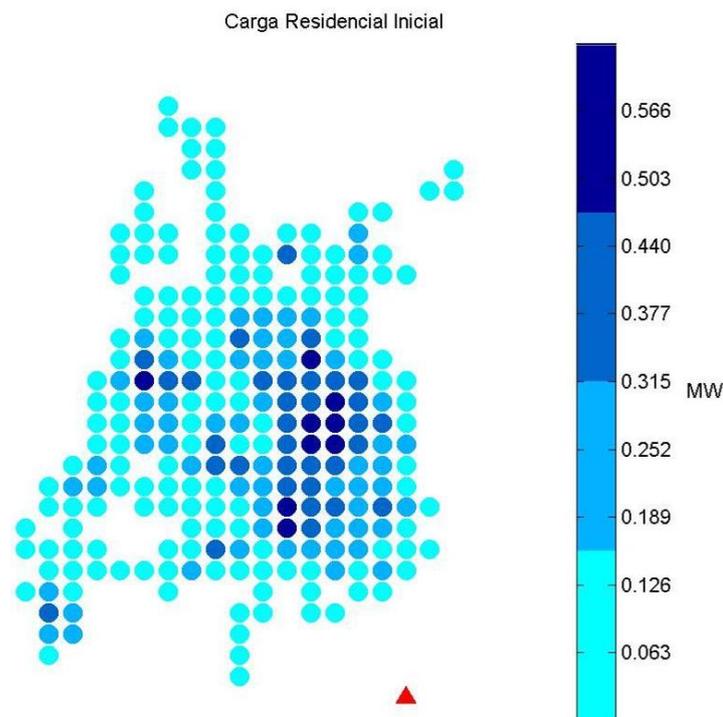


Figura 6.1 – Localização da nova carga industrial, representado por um triângulo vermelho.

Em Willis (2002), se desenvolveu um estudo de cenário considerando a instalação de uma nova empresa. Informações como: o número de consumidores gerados pela nova empresa, tabelas que relacionam consumidores, demanda e áreas utilizadas pelos consumidores foram aproveitadas para a aplicação do primeiro cenário.

Por outro lado, das informações cedidas pela Secretaria de Planejamento da prefeitura da cidade, encontra-se o projeto para a construção de novas instalações para abrigar todos os órgãos do poder público. Pretendem-se construir estas novas instalações no sudoeste da cidade. A construção deste novo complexo irá desenvolver a região de uma forma importante. Para realizar a análise destas novas instalações se considera um segundo cenário para aplicação do novo método proposto, na qual uma grande carga é simulada no sudoeste da cidade como se mostra na Figura 6.2.

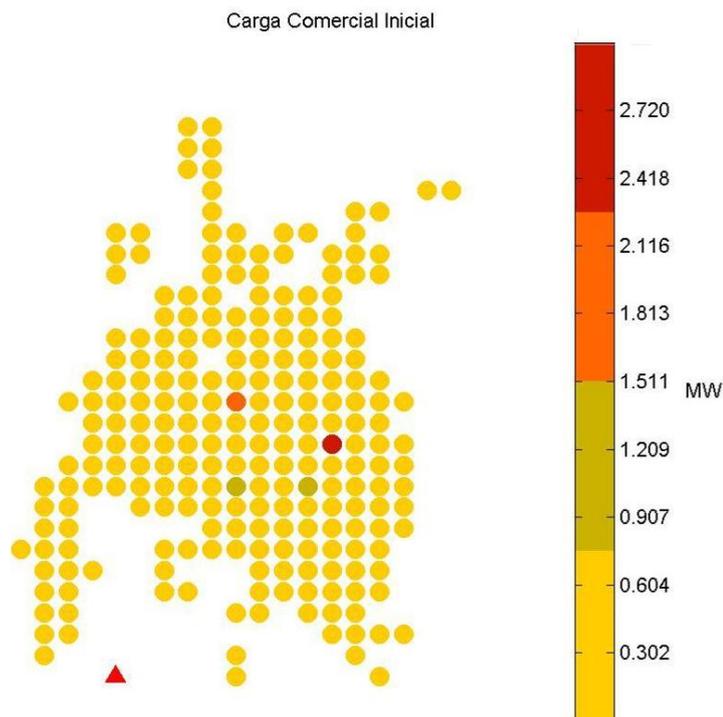


Figura 6.2 – Localização da nova instalação do poder público, representado por um triângulo vermelho.

6.2 ANÁLISES DE CENÁRIOS

Para testar o novo método proposto para o estudo de cenários foram escolhidos dois cenários, mostrados nas Figuras 6.1 e 6.2.

O primeiro cenário a considerar é uma nova carga industrial, que tem a característica de repelir e atrair novos consumidores comerciais e residências dentro de seu entorno. Esta carga ocasionará uma transformação do uso do solo existente na área de influência desta.

O segundo cenário é uma carga existente que muda para outra subárea, esta tem a característica de atrair novos consumidores. Para modelar esta carga será modelada como uma grande carga comercial que atrairá novas cargas comerciais.

Nas seguintes seções será analisada cada cenário, mostrando os dados requeridos, aplicação do algoritmo e os mapas de saída para cada cenário.

6.2.1 Cenário de uma Nova Carga Industrial

A nova carga industrial será alocada em uma subárea sem desenvolvimento e gerará novos consumidores comerciais e residências dentro de seu entorno. A poluição e os altos níveis de ruído gerado por esta nova carga farão com que algumas cargas vizinhas se trasladem a outra subárea. Isto resultará em uma transformação do uso do solo existente na área de influência da nova carga.

6.2.1.1 Preparação dos Dados

Nesta parte devem-se organizar os dados disponíveis com o objetivo de obter informações importantes que possam ajudar a verificar o método proposto para estudo deste cenário.

Como foram mostrados, no Capítulo 3, na seção 3.4.1, os dados disponíveis são organizados em duas bases de dados: espacial e demanda. Todos os dados disponíveis para cada subárea mostrados na figura 4.2 são considerados como entrada para este algoritmo.

Em Willis (2002), se analisa a alocação de uma carga industrial dentro de uma área disponível. Esta área se encontra fora da cidade e não tem serviços necessários para abastecer as atividades desta carga. Deste modo, são criadas novas cargas no entorno desta carga industrial. Ao final dessa análise, foi mostrada a quantidade de consumidores residenciais e comerciais criados para abastecer esta carga.

Para o cenário de uma nova carga industrial, se considera uma carga que tem as mesmas características que foram mostradas no trabalho de Willis (2002), no entanto, não será utilizada a relação de potência e número de consumidores, empregada nesse trabalho, pois esta não se ajusta a realidade da área de estudo desta aplicação. Deste modo, será necessário calcular essa relação para saber quanta demanda futura se espera devido aos novos consumidores gerados por esta carga.

Para obtenção da relação de potência por número de consumidores, utiliza-se a base de dados de demanda comercial, na qual se tem o consumo de energia por usuário. Para converter os dados de energia em potência, utilizam-se as curvas de carga típica da área de serviço, as quais em conjunto com os dados de consumo de energia elétrica dos usuários, permitem calcular a curva de carga para todos os consumidores, usando como referência a curva de carga de um dia útil. As curvas de carga de sábado, domingo e feriados não foram consideradas, pois o interesse principal é a demanda máxima que possa ser registrada no ano.

Obtido o valor máximo de demanda e conhecendo o número de consumidores por ano, se realiza uma análise estatística para obter a relação desejada para a área de serviço.

Multiplicando o número de consumidores pela relação encontrada, se obtém uma demanda esperada a distribuir pela cidade. Ao realizar este procedimento se encontrou uma demanda residencial de 2,7 MW e uma demanda comercial de 0,5 MW. Estas demandas se propagarão em forma separada, desde a localização da nova carga industrial, até ser repartida em cada passo de tempo.

Por outro lado, considerando o nível de ruído e poluição, define-se um raio de influência igual a 5 Uds. Na qual, 1 Ud corresponde à dimensão de 1 subárea. Em todas as subáreas que se encontram localizadas dentro deste raio, se realiza uma mudança das probabilidades de desenvolvimento para cada classe de consumidor.

Também se considera que as cargas atuais localizadas dentro do raio de influência podem dar uma quantidade de sua carga, à demanda de propagação. Esta quantidade vai ser igual à mesma que pode receber uma subárea sem ou com carga que se encontra fora do raio de influência. Este valor foi determinado em 0,025 MW, sendo que este corresponde ao valor médio da classe residencial que precisará esta carga. Para a análise das cargas comerciais, se utilizou 0,040 MW, sendo que este corresponde ao valor médio da classe comercial necessária. Estes valores foram calculados depois de fazer uma análise estatística na base de demanda, considerando a classe de residências e comércios requeridos para a nova carga industrial, de acordo com realidade da área de estudo.

Ao final cada subárea da área de serviço tem a informação como se mostra na Figura 6.3.

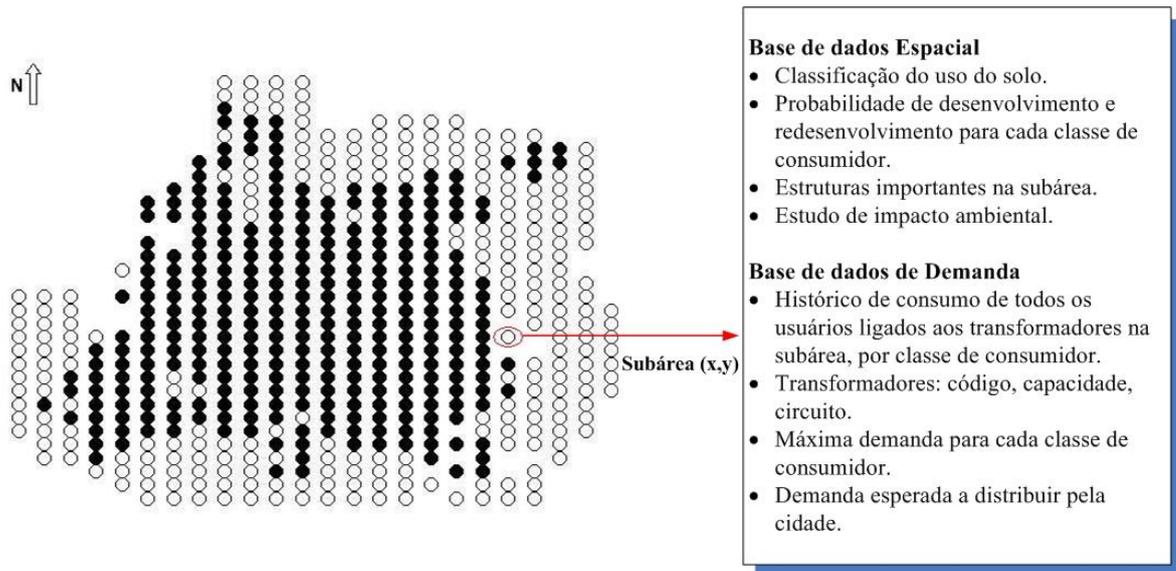


Figura 6.3 – Elementos de uma subárea na base de dados para o estudo de cenário de uma nova carga industrial.

6.2.1.2 Caracterização da Área de Serviço

Como já foi explicado nas seções do Capítulo 5, o novo método é formado por duas classes de agentes. As informações recebidas pelos agentes são descritas a seguir:

- **Agente Reativo.** Este receberá todas as informações da subárea já detalhadas na seção anterior. Quando este agente for alcançado pela onda de propagação do agente proativo, este agente informará ao agente proativo sua localização, sua probabilidade de desenvolvimento ou redesenvolvimento e também sua demanda atual no tempo t . No caso deste agente encontrar-se localizado dentro do raio de influência de um agente proativo, deverá dar uma quantidade de demanda que será adicionada a demanda de propagação;
- **Agente Proativo.** Este receberá os valores da previsão da demanda a propagar e do raio de influência; demanda a repartir cada vez que a onda de propagação alcance um agente reativo; tempo de horizonte de estudo e localização da nova carga industrial.

6.2.1.3 Distribuição Espaço-Temporal das Novas Cargas

O método implementado termina quando o agente proativo atinge o critério de parada, isto é, repartir a demanda de propagação dentro do horizonte de estudo. Ao final do método geram-se como saída mapas que mostram a previsão de carga futura para este cenário.

Como foi explicado na Seção 4.5, do Capítulo 4, as previsões de crescimento se realizam para as cargas residenciais e comerciais, pois estas são a maioria em uma cidade.

A seguir se mostrará três ondas de propagação, em um passo de tempo, para uma melhor compressão da forma de como se realiza a distribuição espaço-temporal das novas cargas pelo método proposto.

Na primeira onda de propagação é gerada uma janela de 3x3 considerando como centro desta janela a posição da carga industrial. Logo, organizam-se as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos desta janela em vetores separados. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Este processo é mostrado na seguinte Figura 6.4.

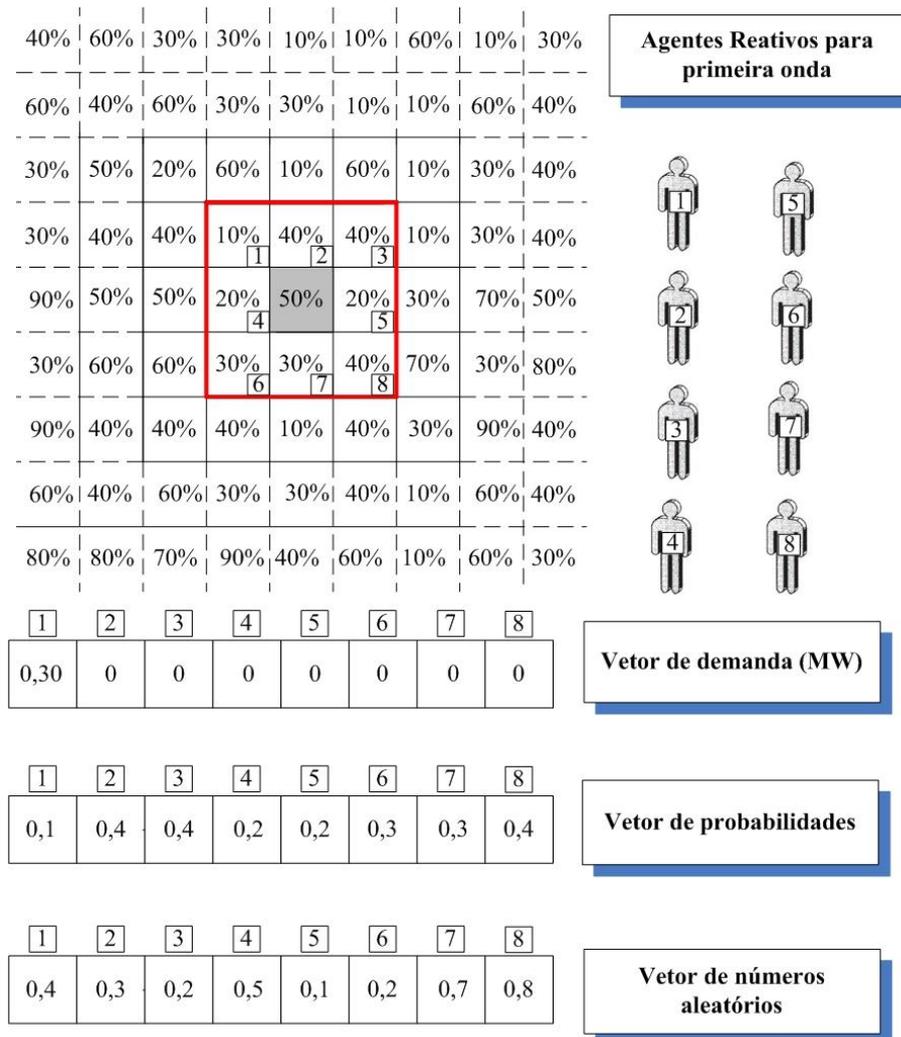


Figura 6.4 – Primeira janela e vetores gerados para a onda 1 para o cenário o primeiro cenário.

A seguir, analisam-se cada agente reativo dentro da janela, em um primeiro momento deve-se reconhecer se é um agente reativo sem carga ou com carga.

Em caso de ser um agente reativo com carga (e como o raio de influência foi definido com um valor a 5 Uds) este agente estará localizado dentro do raio de influência do agente proativo e perderá uma quantidade de demanda que será adicionada à demanda de propagação. Se for um agente reativo sem carga, compara-se a probabilidade de desenvolvimento deste com o número aleatório corresponde criado, se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade de demanda e mudam-se as probabilidades para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas na seção 5.2.2. Este processo é mostrado na Figura 6.5.

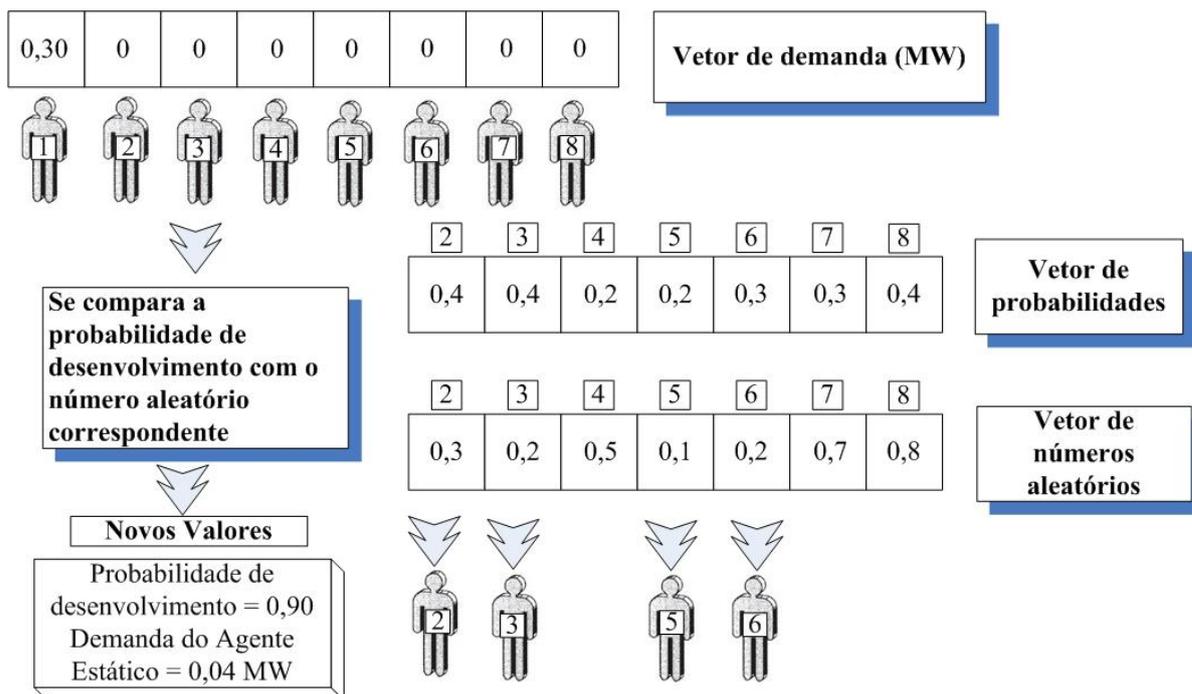


Figura 6.5 – Análise da primeira onda de propagação para o primeiro cenário.

Na figura 6.5 pode-se observar que o agente reativo número 1 é escolhido pelo algoritmo para entregar uma quantidade de sua carga à demanda de propagação, e que depois de comparar as probabilidades de desenvolvimento com os números aleatórios gerados dos outros agentes, tem-se os de números 2, 3, 5 e 6 com novos valores. Estes agentes ganham uma probabilidade de desenvolvimento alta para o seguinte passo de tempo, estes agentes encontram-se em um período de assentamento dos usuários como foi explicado na seção 2.2.1 do Capítulo 2.

O agente proativo ainda não atingiu o critério de parada, portanto precisará uma nova onda de propagação. Antes de passar à onda 2 será necessário zerar os elementos da onda 1, para que estes elementos não sejam considerados na nova janela, como se mostra na Figura 6.6.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	10%	30%
60%	40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	40%
30%	50%	20%	60%	10%	60%	10%	30%	40%
30%	40%	40%	0	0	0	10%	30%	40%
90%	50%	50%	0	50%	0	30%	70%	50%
30%	60%	60%	0	0	0	70%	30%	80%
90%	40%	40%	40%	10%	40%	30%	90%	40%
60%	40%	60%	30%	30%	40%	10%	60%	40%
80%	80%	70%	90%	40%	60%	10%	60%	30%

Figura 6.6 – Nova janela gerada para a Onda 2 para o primeiro cenário.

O algoritmo para a segunda onda de propagação gera uma janela de 5x5, considerando como centro desta janela a posição da carga industrial. Logo, se organizam as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos com probabilidade de desenvolvimento maior de zero. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Observe-se que só são considerados os agentes reativos que tem uma probabilidade de desenvolvimento maior a zero, deste modo o algoritmo analisará agentes reativos que não foram considerados na onda 1, como se mostra na Figura 6.7.

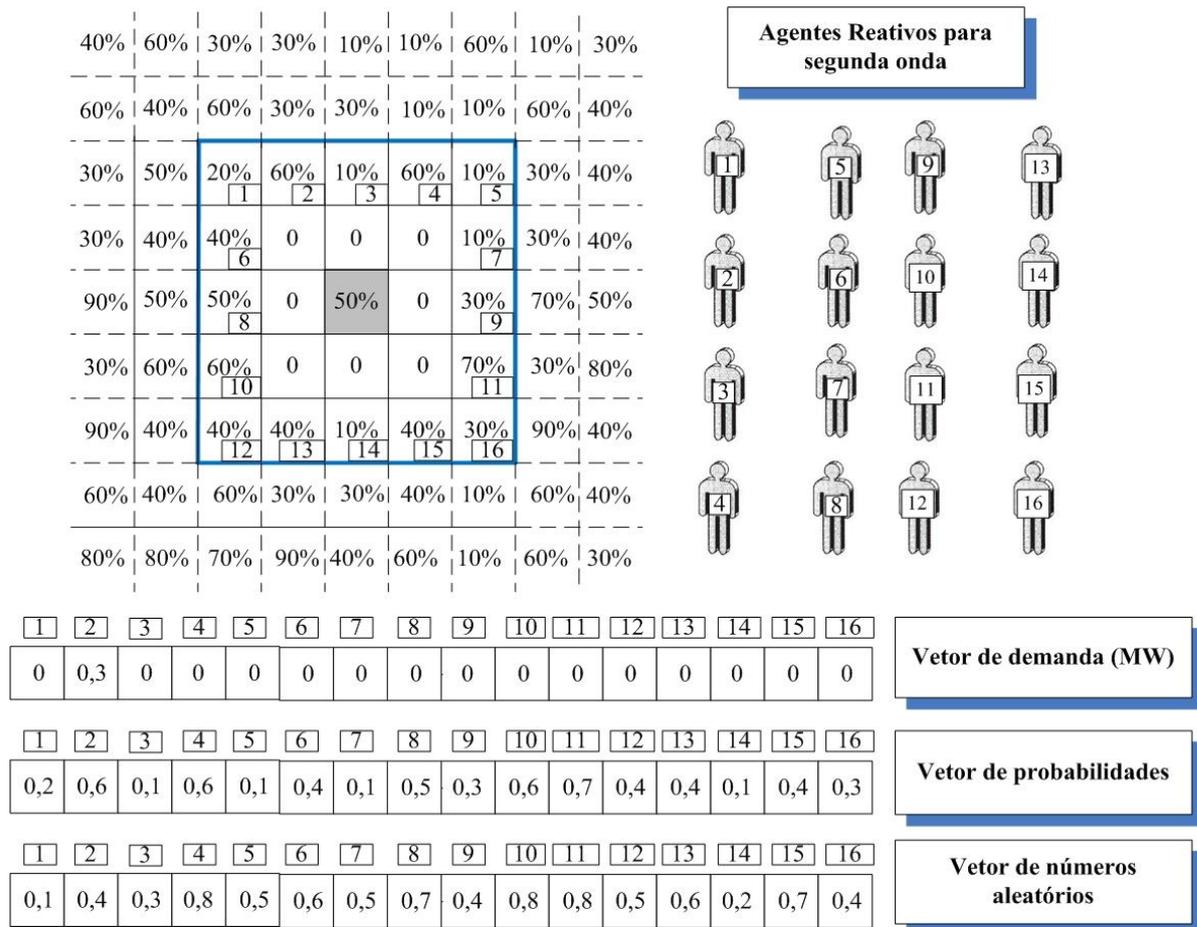


Figura 6.7 – Segunda janela e vetores gerados para a Onda 2 para o primeiro cenário.

Logo, analisam-se cada agente reativo dentro da janela, em um primeiro momento deve-se reconhecer, se é um agente reativo sem carga ou com carga. Em caso de ser um agente reativo com carga e encontrar-se dentro do raio de influência do agente proativo, perdera uma quantidade de demanda que será adicionada à demanda de propagação. Em caso de ser um agente reativo sem carga, comparar a probabilidade de desenvolvimento deste agente com o número aleatório corresponde criado, se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade de demanda e se mudará as probabilidades para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas na seção 5.2.2. Este processo se mostra na Figura 6.8.

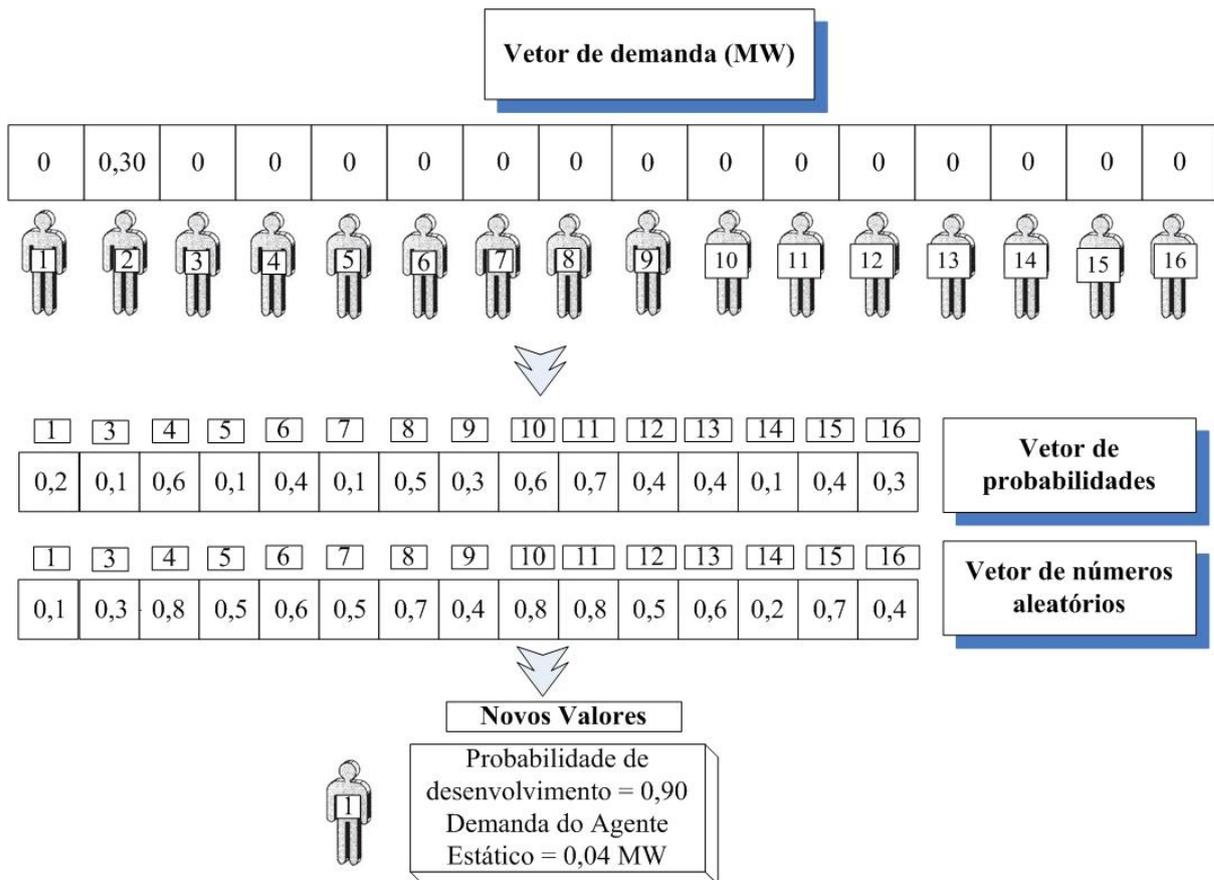


Figura 6.8 – Análise da segunda onda de propagação para o primeiro cenário.

Observe-se que na Figura 6.8 que o agente reativo número 2 é considerado para entregar uma quantidade de sua carga, à demanda de propagação e que depois de comparar as probabilidades de desenvolvimento com os números aleatórios gerados para os outros agentes, se tem ao agente número 1 com novos valores. O agente reativo número 1 ganha uma probabilidade de desenvolvimento alta para o seguinte passo de tempo. Este agente encontra-se em um período de assentamento dos usuários.

O agente proativo ainda não atingiu o critério de parada, portanto precisará uma nova onda de propagação. Antes de passar à onda 3 será necessário zerar os elementos da onda 2, para que estes elementos não sejam considerados na nova janela, como se mostra na Figura 6.9.

40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	10%	30%
60%	40%	60%	30%	30%	10%	10%	60%	40%
30%	50%	0	0	0	0	0	30%	40%
30%	40%	0	0	0	0	0	30%	40%
90%	50%	0	0	50%	0	0	70%	50%
30%	60%	0	0	0	0	0	30%	80%
90%	40%	0	0	0	0	0	90%	40%
60%	40%	60%	30%	30%	40%	10%	60%	40%
80%	80%	70%	90%	40%	60%	10%	60%	30%

Figura 6.9 – Nova janela gerada para a Onda 3 para o primeiro cenário.

O algoritmo para a terceira onda de propagação gera uma janela de 7x7, considerando como centro desta janela a posição da carga industrial. Logo, se organizam as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos com probabilidade de desenvolvimento maior de zero. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Observe-se que só são considerados os agentes reativos que tem uma probabilidade de desenvolvimento maior a zero, deste modo o algoritmo analisará agentes reativos que não foram considerados nas ondas 1 e 2, como se mostra na Figura 6.10.

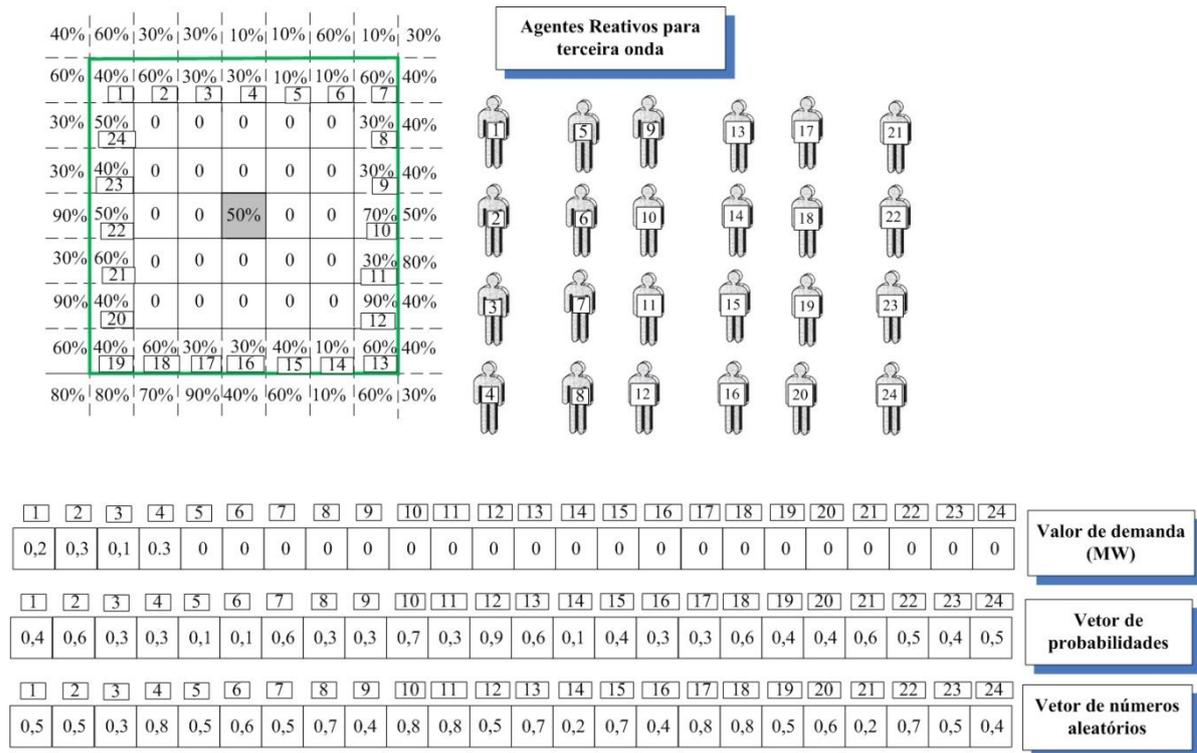


Figura 6.10 – Terceira janela e vetores gerados para a Onda3 para o primeiro cenário.

Logo, analisam-se cada agente reativo dentro da janela e em um primeiro momento deve-se reconhecer se é um agente reativo sem carga ou com carga. Em caso de ser um agente reativo com carga e este encontrar-se dentro do raio de influência do agente proativo, perderá uma quantidade de demanda que será adicionada à demanda de propagação. Em caso de ser um agente reativo sem carga, será comparada a probabilidade de desenvolvimento deste agente com o número aleatório correspondente criado. Se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade de demanda e as probabilidades serão mudadas para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas na seção 5.2.2. Este processo se mostra na Figura 6.11.

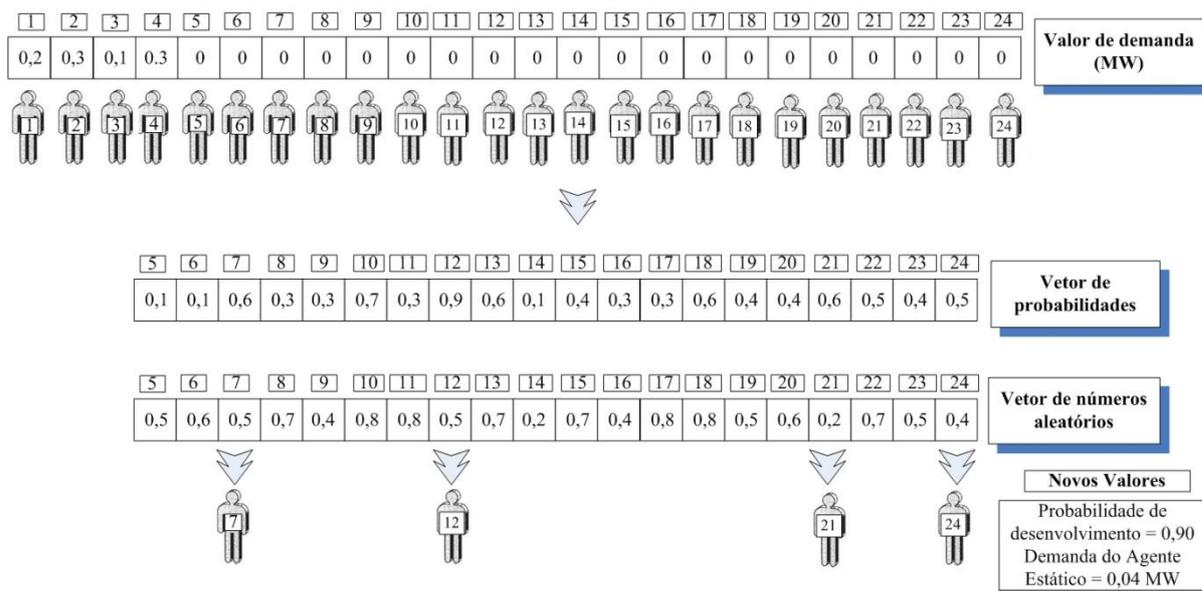


Figura 6.11 – Análise da terceira onda de propagação para o primeiro cenário.

Observe-se que na Figura 6.11 os agentes reativos com número 1, 2, 3 e 4 entregarão uma quantidade de sua demanda à demanda de propagação, e que depois de comparar as probabilidades de desenvolvimento com os números aleatórios gerados dos outros agentes, obtêm-se os agentes com número 7, 12, 21 e 24 com novos valores. Estes agentes reativos ganham uma probabilidade de desenvolvimento alta, para o seguinte passo de tempo.

O agente proativo não atingiu o critério de parada e precisará gerar novas ondas de propagação até atingir este critério.

Ao final do método, quando o agente proativo atinge o critério de parada, são gerados mapas para a cada classe de consumidores. Considerar que nas figuras 6.12 – 6.19, a escala representa os níveis de demanda para cada subzona, as subzonas sem carga não são representadas.

Para realizar uma comparação das saídas do algoritmo com a carga inicial presente na área de serviço, nas figuras 6.12 e 6.16 apresentam-se as cargas residenciais e comerciais, respectivamente ao início das simulações.

Nas figuras 6.13 e 6.14 apresentam-se os resultados obtidos para uma previsão de 5 e 10 anos respectivamente. Nestas figuras se pode observar como algumas subáreas alocadas na previsão de 5 anos novamente são identificadas na previsão de 10 anos, reproduzindo o

crescimento da curva em S para as cargas em um sistema de distribuição, como foi mencionado na seção 2.2.1 do Capítulo 2.

Na Figura 6.15 apresentam-se os resultados obtidos para a classe residencial utilizando o novo modelo de sistema multiagente para uma previsão de 20 anos. Nesta figura, pode-se observar que houve um crescimento no entorno da nova carga, para assim atender as necessidades desta nova carga. Também se pode observar que o centro de atividades e o norte da cidade não sofrem mudança alguma devido a esta carga, o que era de se esperar, pelo fato de que a influência desta não abrange toda área de serviço.

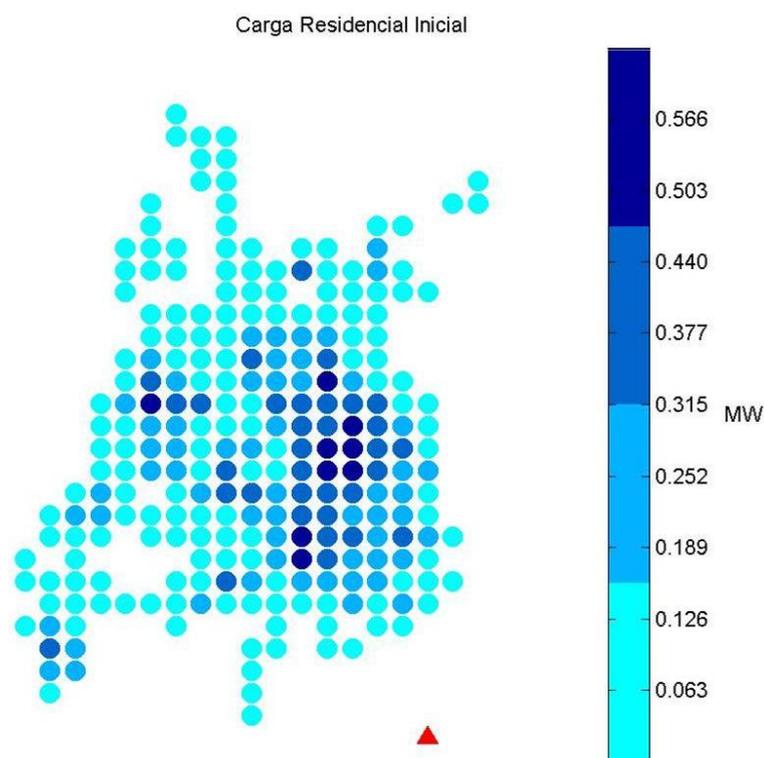


Figura 6.12 – Carga ao início da simulação para o primeiro cenário.

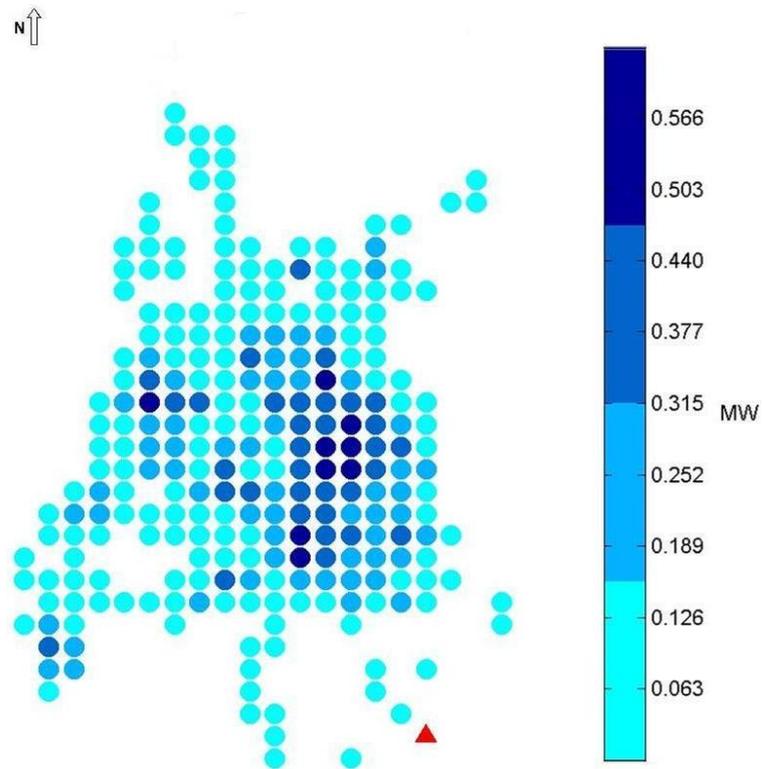


Figura 6.13 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 5 anos para o primeiro cenário.

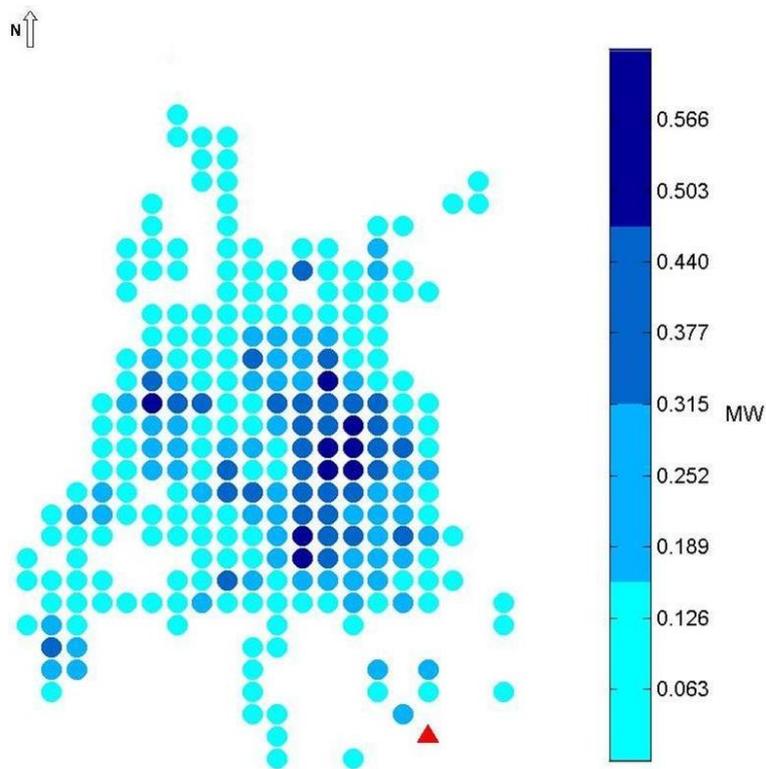


Figura 6.14 – Resultados da carga residencial para um horizonte de 10 anos para o primeiro cenário.

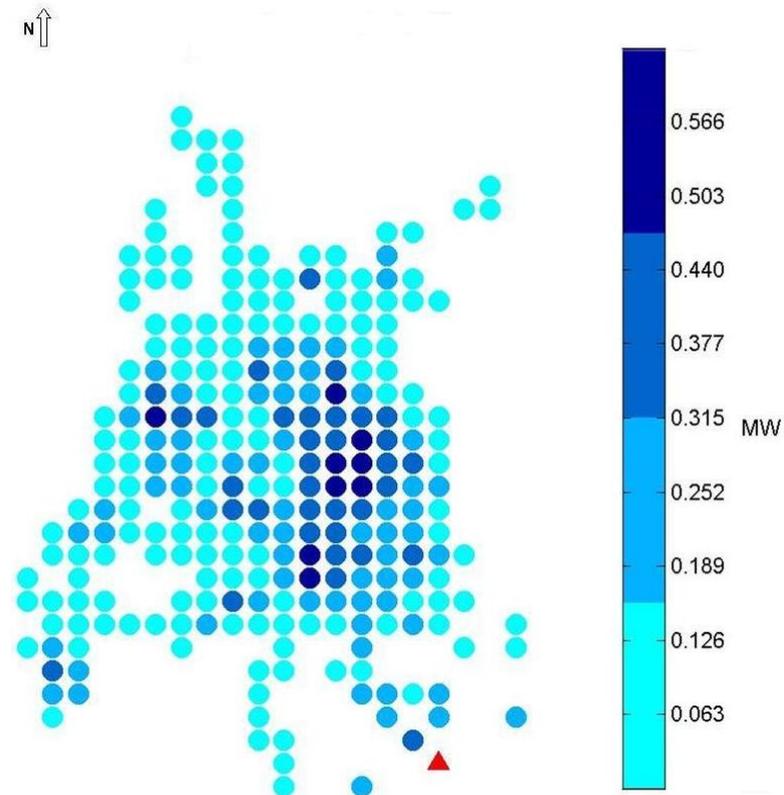


Figura 6.15 – Resultado do primeiro cenário para a carga residencial aplicando o método para estudo de cenários para um horizonte de 20 anos.

A figura 6.17 ilustra a distribuição espaço-temporal da classe comercial para uma previsão de 5 anos e a Figura 6.18 ilustra a distribuição espaço-temporal da classe comercial para uma previsão de 10 anos. Estas figuras mostram como algumas subáreas comerciais são desenvolvidas nas áreas onde cargas residenciais na previsão de 5 anos foram desenvolvidas.

Na Figura 6.19 apresentam-se os resultados obtidos para a classe comercial. Podem-se observar como algumas zonas comerciais são desenvolvidas nas áreas onde a zona residencial foi desenvolvida. Pode-se notar que se tiveram mudanças de cargas existentes para outras subáreas, aumentando assim a demanda destas. Também se pode observar que só no entorno desta carga ocorrem mudanças, o que era de se esperar, pelo fato de que a influência desta não abrange toda área de serviço.

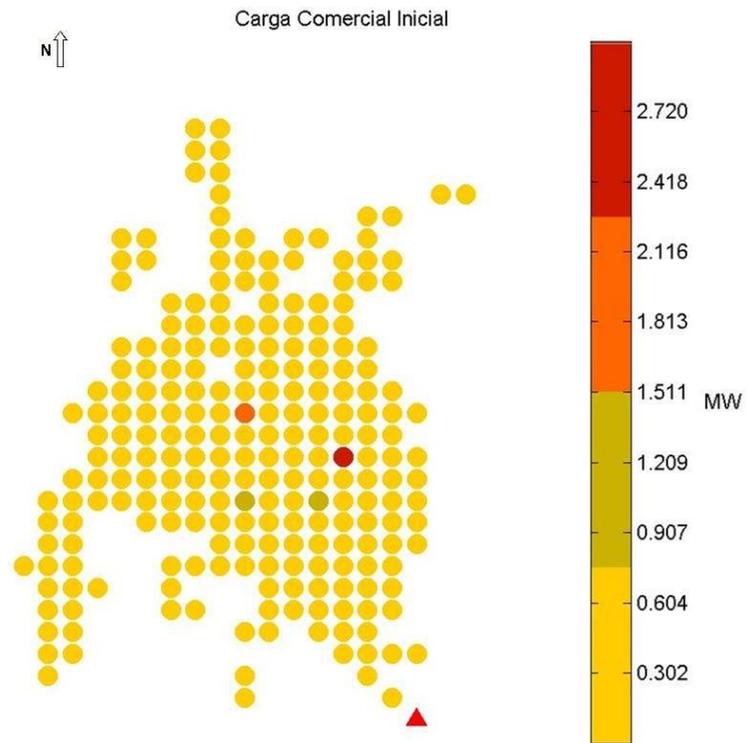


Figura 6.16 – Carga comercial ao início da simulação para o primeiro cenário.

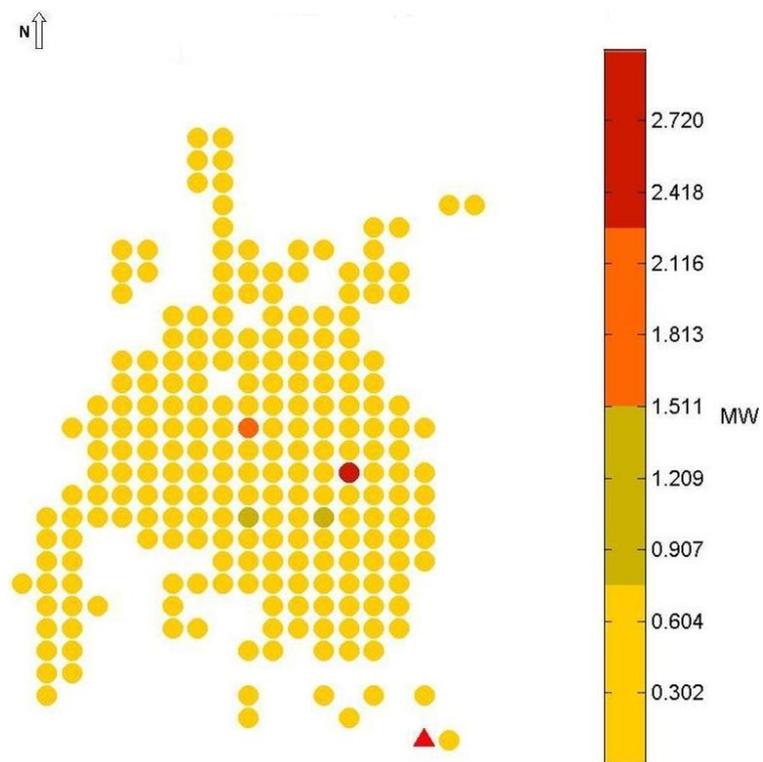


Figura 6.17 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos para o primeiro cenário.

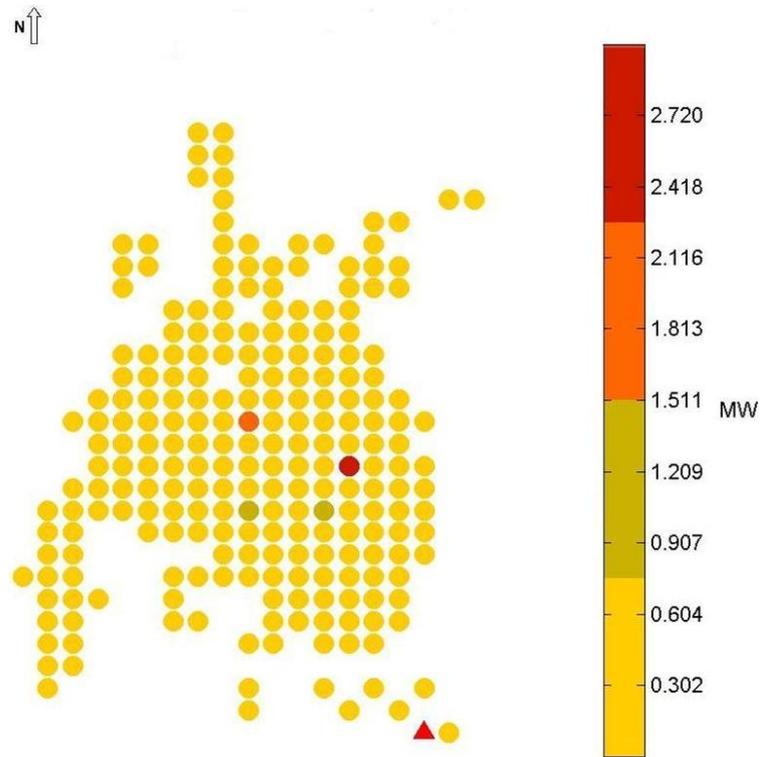


Figura 6.18 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos para o primeiro cenário.

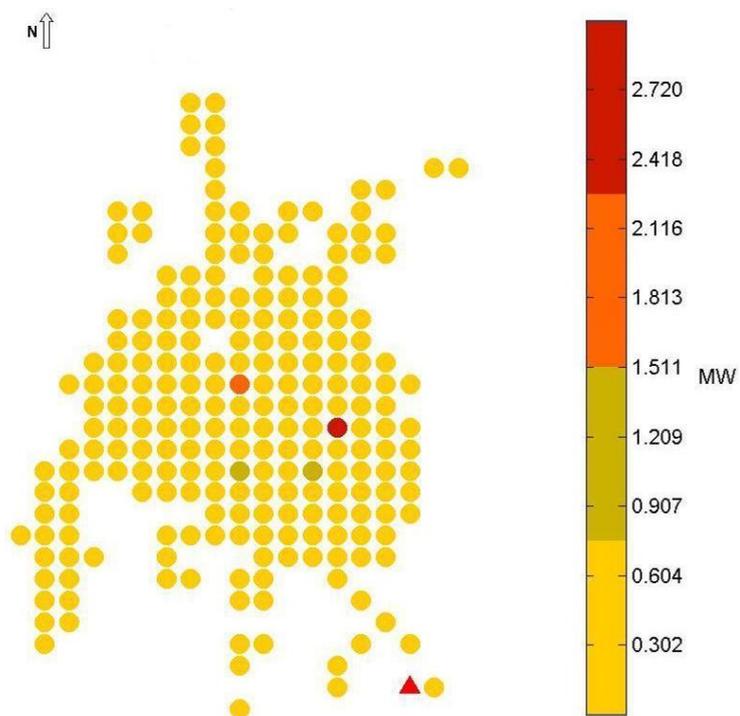


Figura 6.19 – Resultado do primeiro cenário para a carga comercial aplicando o método para estudo de cenários para um horizonte de 20 anos.

6.2.2 Cenário de Mudança de uma Carga Existente

Para este cenário considera-se a construção de novas instalações para abrigar todos os órgãos do poder público. Esta nova carga será alocada no sudoeste da cidade e será modelada como uma grande carga comercial que atrairá novas cargas comerciais. Esta nova localização resultará em uma mudança na nova vizinhança e na vizinhança anterior.

6.2.2.1 Preparação dos Dados

Todos os dados disponíveis para cada subárea mostrados na figura 4.2 são considerados como entrada para este algoritmo.

Para este cenário será necessário encontrar a posição de todas as cargas de serviços públicos, na área de estudo e sua respectiva demanda.

Para converter os dados de energia a potência existe muitas metodologias, neste trabalho utiliza-se o procedimento descrito em Francisquini (2006). Deste modo, considera-se como curva representativa uma grande carga comercial em “p.u.”. Para cada consumidor obtém-se a potência base que é o consumo mensal dividido por 720 horas equivalente a um mês. Logo se multiplica a potencia base pelo valor de “p.u.” para obter a estimativa de potência. Ao final se soma todas as cargas do serviço público e se extrai o valor máximo. Este valor será considerado com uma demanda a propagar em cada passo de tempo.

As posições das cargas do serviço público podem ser obtidas da base de dados de demanda, da qual se podem identificar os usuários em cada subárea.

Por outro lado, considera-se que tem um raio de influência igual a 3 Uds. Na qual, 1 Ud corresponde à dimensão de 1 subárea. Esta carga não apresenta um processo de repulsão porque os níveis de ruído e poluição encontram-se dentro dos padrões. Assim, esta carga apresentará uma característica para o surgimento de novas cargas. Para modelar esta

característica se incrementará as probabilidades de desenvolvimento das subáreas que se encontram localizadas dentro do raio de influência.

Também se deve definir a quantidade de demanda que cada subárea pode aumentar. Esta foi determinada por experimentação em 0,2 MW, sendo que esse valor médio da maioria das zonas comerciais com carga na base de dados, que corresponde a área de estudo.

6.2.2.2 Caracterização da Área de Serviço

Como já foi explicado, o novo método é formado por duas classes de agentes. As informações recebidas por cada agente são descritas a seguir:

- Agente Reativo. Este receberá todas as informações da subárea já detalhadas na seção anterior. Quando a onda de propagação do agente proativo alcançar o agente reativo, este informará ao agente proativo sua localização, sua probabilidade de desenvolvimento ou redesenvolvimento e também sua demanda atual no tempo t ;
- Agente Proativo. Este receberá os valores da previsão da demanda a propagar e do raio de influência; demanda a repartir, cada vez que a onda de propagação alcance um agente reativo; tempo de horizonte de estudo e localização da nova carga.

6.2.2.3 Distribuição Espaço-Temporal das Novas Cargas

O método implementado termina quando o agente proativo atinge o critério de parada, que é repartir a demanda de propagação dentro do horizonte de estudo. Ao final do método geram-se como saída mapas que mostram a previsão de carga futura para este cenário.

O interesse para este cenário está em realizar as previsões de crescimento das cargas comerciais, pois se considera que está em estudo uma grande carga comercial que atrairá cargas comerciais no entorno desta e não se realizará mudanças nas cargas residências (isto

porque o aparecimento desta carga não necessitará da construção de novas vivendas ou moradias).

A seguir se mostrará duas ondas de propagação, em um passo de tempo, para uma melhor compreensão da forma de como se realiza a distribuição espaço-temporal das novas cargas pelo método proposto para este cenário.

O algoritmo para a primeira onda de propagação gera uma janela de 3x3, considerando como centro desta janela a posição da nova carga. Logo, se organizam as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos, desta janela, em vetores separados. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Este processo é mostrado na seguinte Figura 6.20.

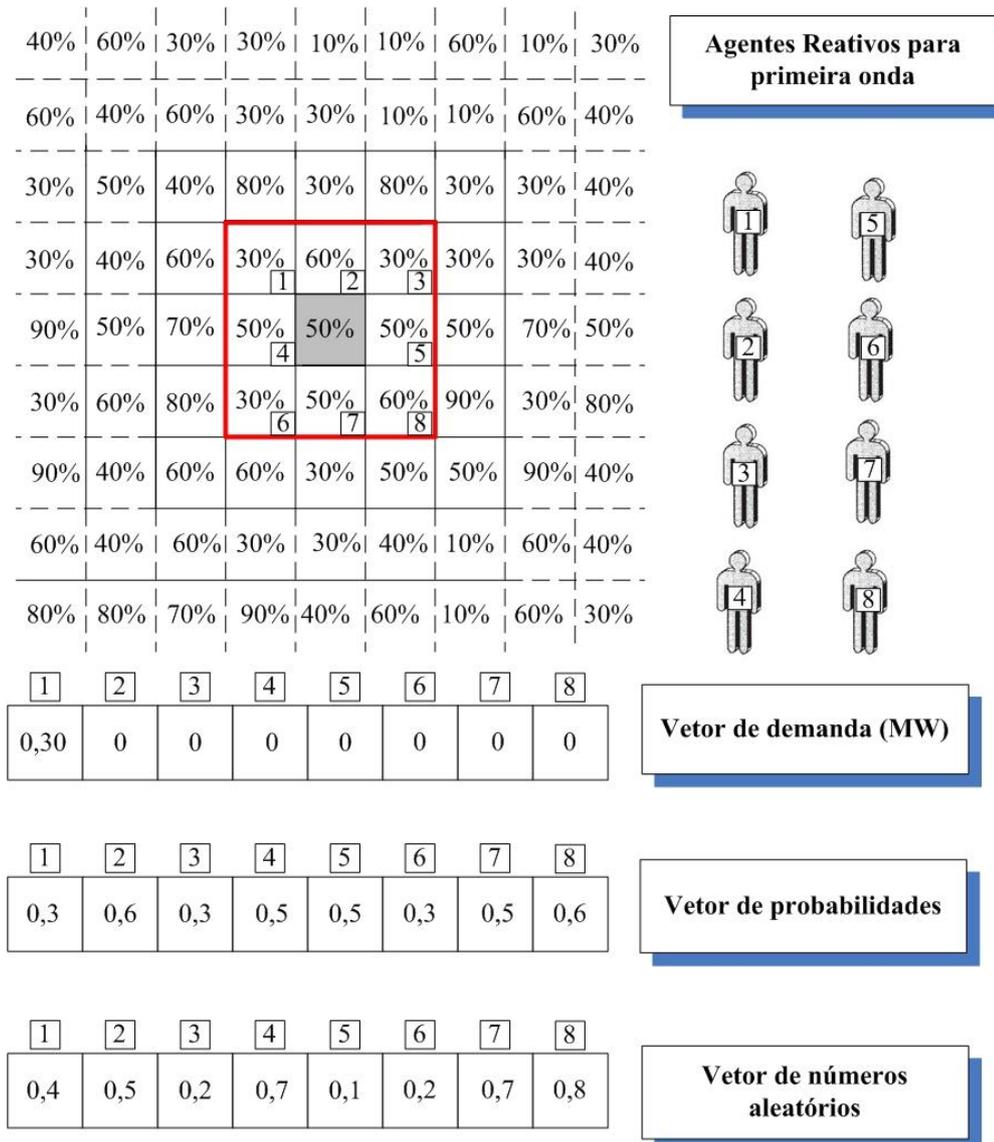


Figura 6.20 – Primeira janela e vetores gerados para a Onda 1 para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.

A seguir, analisam-se cada agente reativo dentro da janela. Compara-se a probabilidade de desenvolvimento deste agente com o número aleatório corresponde criado, se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade de demanda e mudam-se as probabilidades para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas na seção 5.2.2. Este processo é mostrado na Figura 6.21.

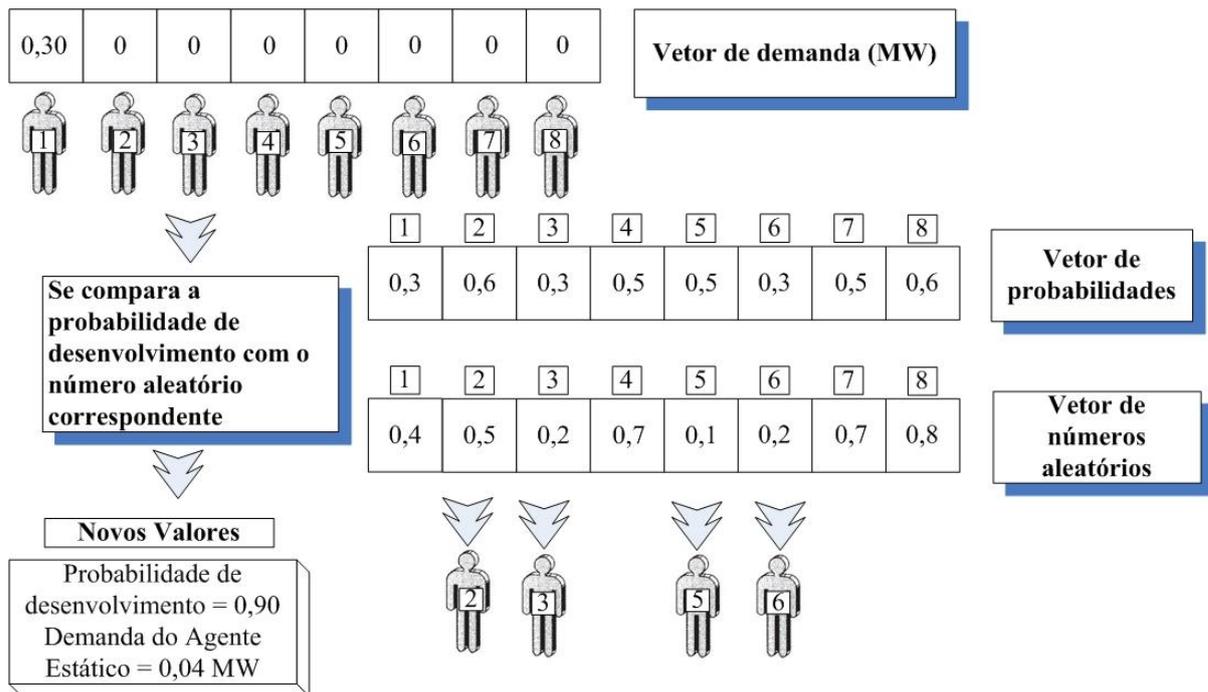


Figura 6.21 – Análise da primeira onda de propagação para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.

Na figura 6.21 pode-se observar que depois de comparar as probabilidades de desenvolvimento com os números aleatórios gerados de todos os agentes reativos, se tem os agentes com número 2, 3, 5 e 6 com novos valores. Estes agentes ganham uma probabilidade de desenvolvimento alta para o seguinte passo de tempo.

O agente proativo ainda não atingiu o critério de parada, portanto precisará uma nova onda de propagação. Antes de passar à onda 2 será necessário zerar os elementos da onda 1, para que estes elementos não sejam considerados na nova janela.

O algoritmo para a segunda onda de propagação gera uma janela de 5x5, considerando como centro desta janela a posição da carga. Logo, se organizam as probabilidades de desenvolvimento e demanda dos agentes reativos com probabilidade de desenvolvimento maior que zero. Cria-se um vetor com números aleatórios com o mesmo comprimento que os vetores anteriores. Observa-se que só são considerados os agentes reativos que tem uma probabilidade de desenvolvimento maior que zero, deste modo, o algoritmo analisará agentes reativos que não foram considerados na onda 1. Como mostra a Figura 6.22.

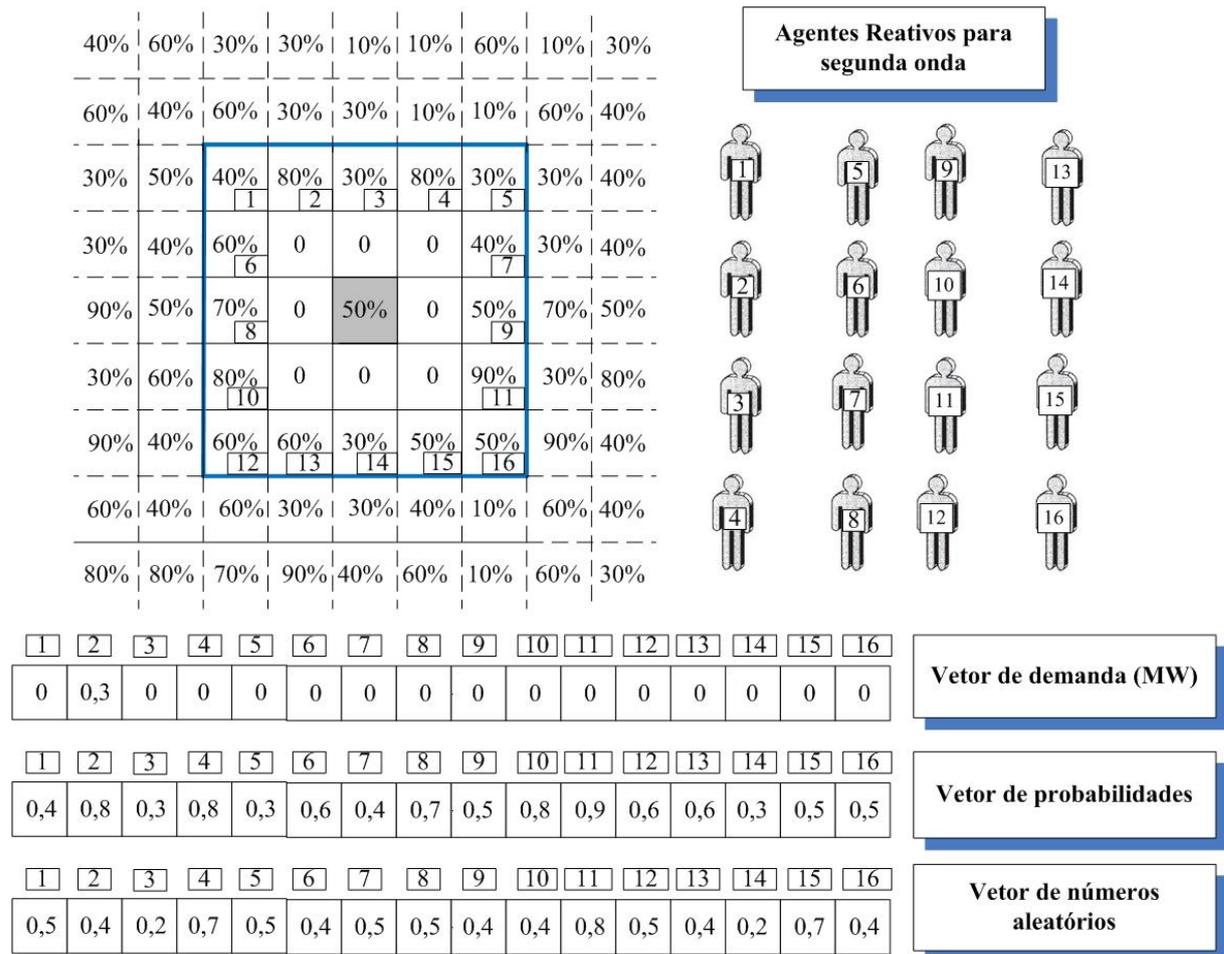


Figura 6.22 – Segunda janela e vetores gerados para a Onda 2 para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.

Logo, analisam-se cada agente reativo dentro da janela e compara-se a probabilidade de desenvolvimento deste agente com o número aleatório corresponde criado. Se a probabilidade de desenvolvimento é maior que o número aleatório deixa-se uma quantidade de demanda e se mudará as probabilidades para o seguinte passo de tempo considerando as regras mencionadas. Este processo se mostra na Figura 6.23.

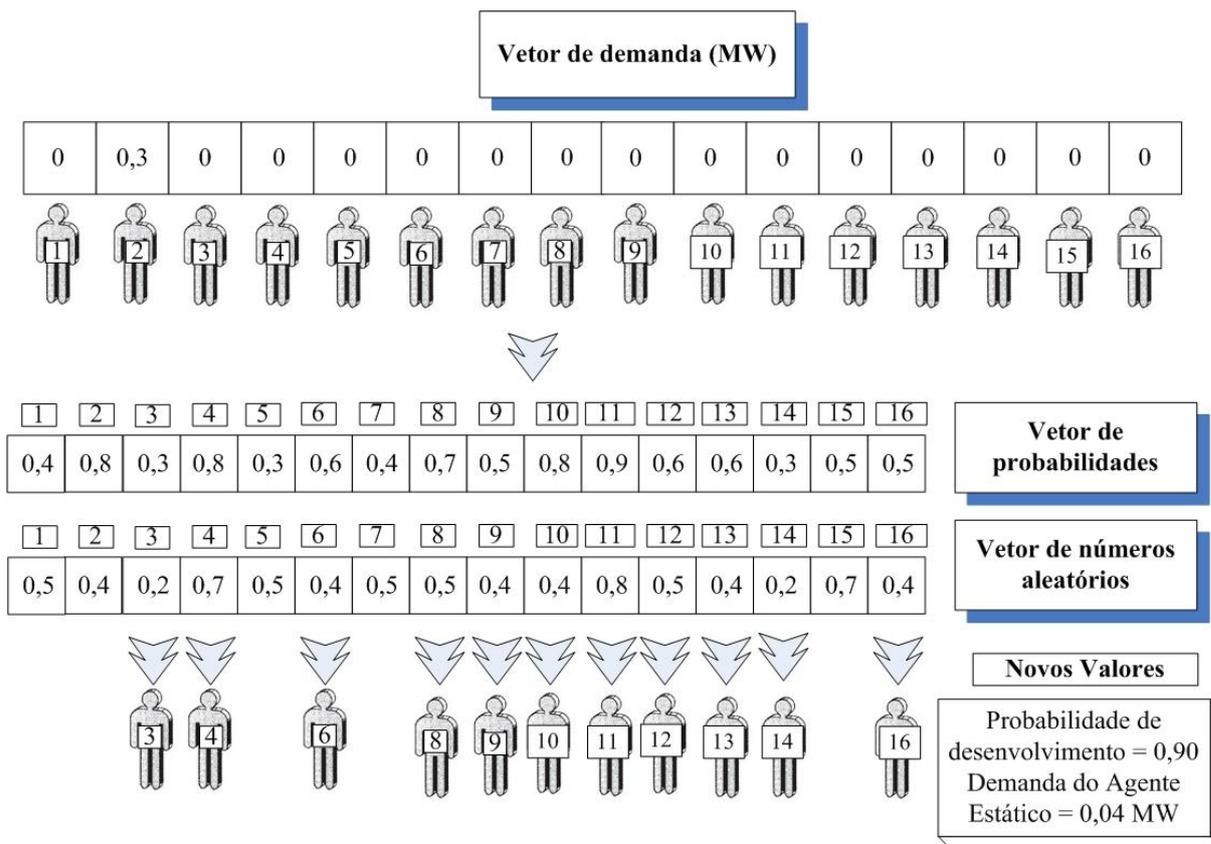


Figura 6.23 – Análise da segunda onda de propagação para o segundo cenário de mudança de uma carga existente.

Observe-se na Figura 6.23 que depois de comparar as probabilidades de desenvolvimento com os números aleatórios gerados, os agentes reativos com número 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 16 ganham uma probabilidade de desenvolvimento alta para o seguinte passo de tempo. Estes agentes se encontram em um período de assentamento dos usuários.

O agente proativo não atingiu o critério de parada e precisará gerar novas ondas de propagação até atingir este critério.

Ao final do método, quando o agente atinge o critério de parada, são gerados mapas para a cada classe de consumidores. Considera-se que nas figuras, a escala representa os níveis de demanda para cada subzona. As subzonas sem carga não são representadas.

Para realizar uma comparação das saídas do algoritmo com a carga inicial presente na área de serviço apresenta-se, na figura 6.24, as cargas comerciais, no início das simulações.

As figuras 6.25 e 6.26 apresentam-se os resultados obtidos para uma previsão de 5 e 10 anos respectivamente. Nestas figuras se pode observar como algumas subáreas alocadas na previsão de 5 anos e novamente são identificadas na previsão de 10 anos, reproduzindo o crescimento da curva em *S* para as cargas em um sistema de distribuição, como foi dito anteriormente.

Na Figura 6.27 se apresenta os resultados obtidos para a classe comercial utilizando o modelo de sistema multiagente para este cenário para uma previsão de 20 anos. Nesta Figura, pode-se observar que houve um crescimento no entorno da nova carga, para assim atender as necessidades desta nova carga. Também se pode observar que o centro de atividades e norte da cidade não sofrem mudança alguma devido a esta carga, o que era previsto devido à influência da carga não abranger toda área de serviço.

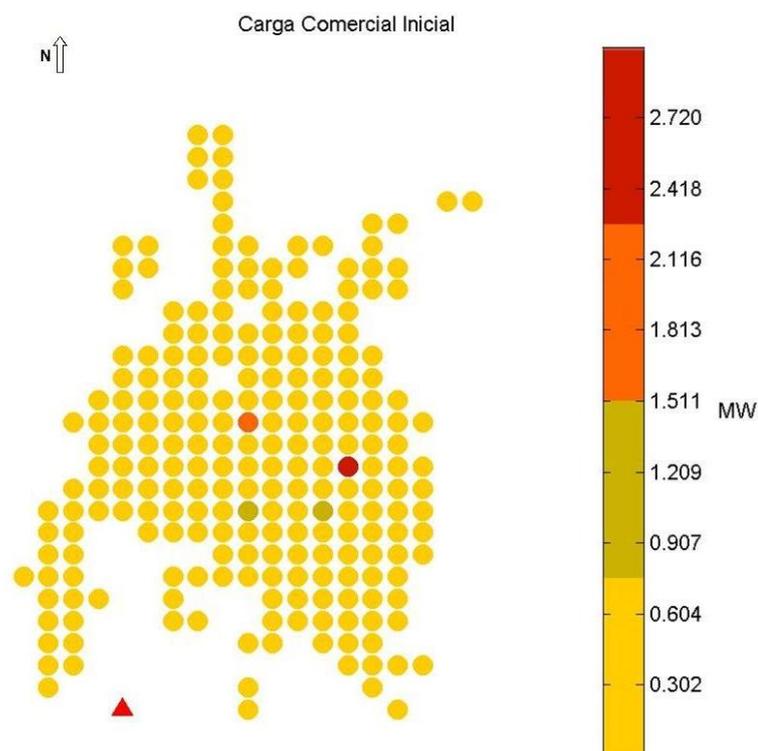


Figura 6.24 – Carga comercial ao início da simulação para o segundo cenário.

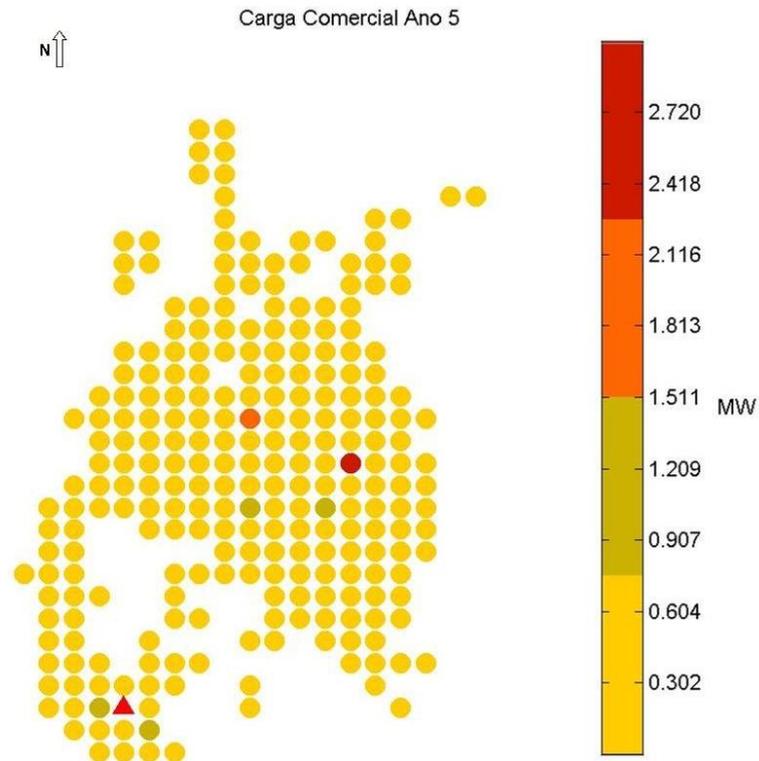


Figura 6.25 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 5 anos para o segundo cenário.

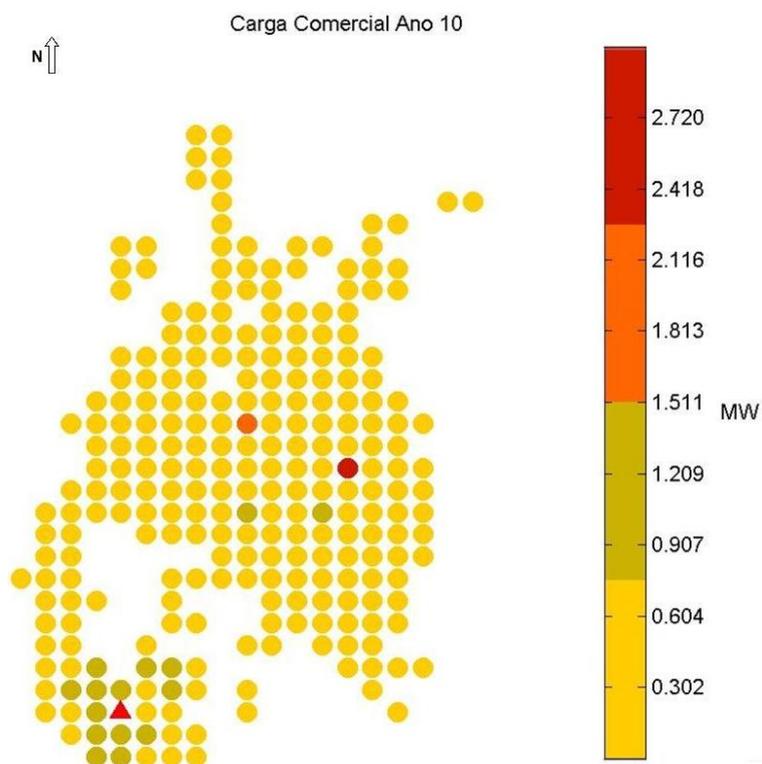


Figura 6.26 – Resultados da carga comercial para um horizonte de 10 anos para o segundo cenário.

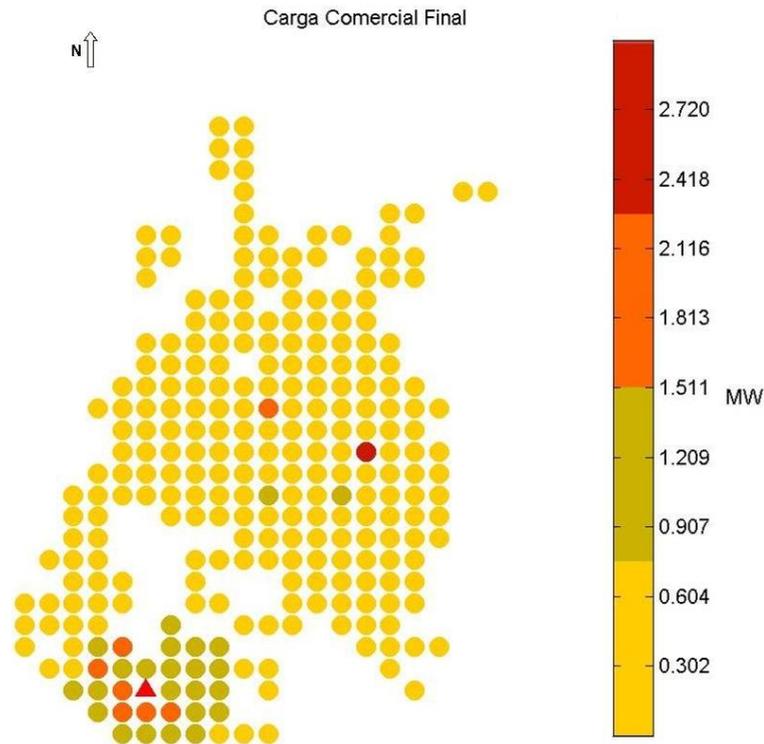


Figura 6.27- Resultado para a carga comercial aplicando a metodologia de sistema multiagente para o segundo cenário para um horizonte de 20 anos.

6.3 CONCLUSÕES SOBRE O MÉTODO PROPOSTO PARA ESTUDOS DE CENÁRIO NA PREVISÃO ESPACIAL

Com a apresentação do método para estudo de cenários, se dá por cumprido o principal objetivo que é modelar os efeitos dinâmicos da cidade, permitindo simular as influências de cargas especiais nas vizinhanças. Além disso, o método proposto considera a disponibilidade atual de dados nas empresas do setor, usando só o banco de dados comercial da empresa de serviço elétrico e o conjunto de dados georreferenciados dos elementos da rede.

Considerando a simplicidade do método para estudo de cenários, o tempo computacional é baixo para qualquer simulação, não necessitando mais de 13 segundos para fazer os cálculos e gerar os mapas que identificam o crescimento esperado de demanda na zona de serviço, num computador com processador Intel core 2 duo e com 3,5 GB de RAM utilizando MATLAB versão R2007a.

Este método para estudo de cenários apresenta a mesma característica que o método anterior para representar a quantidade de demanda esperada para cada subárea com um número real, isto é, uma importante contribuição para a melhor qualidade de informação ao planejamento da expansão das redes elétricas.

O sistema multiagente desenvolvido para realizar o estudo de cenários pode ser utilizado pelas empresas de distribuição de energia elétrica, como uma ferramenta para o apoio das áreas técnicas e de mercado, pois a partir dos resultados fornecidos pelo método, pode ser definido o montante de compra de energia e em quais pontos básicos. Isto possibilita aos planejadores definir a expansão de alimentadores, a expansão das subestações, a localização de novas subestações e o volume de obras para atender o incremento de carga.

Capítulo 7 - Conclusões Finais

Neste trabalho foi apresentado um método para ser aplicado como suporte das empresas de distribuição de energia elétrica para o planejamento de expansão das redes elétricas no médio e longo prazo, e especificamente dentro deste, a previsão espacial de demanda.

O foco central deste trabalho foi propor uma metodologia de previsão espacial de demanda elétrica para sistemas de distribuição que considere os efeitos dinâmicos da cidade e que permita simular as influências de cargas especiais nas vizinhanças.

Para cumprir o objetivo foram apresentados dois métodos que utilizam os sistemas multiagentes, a fim de considerar o crescimento dinâmico urbano.

Os métodos desenvolvidos cumprem o principal objetivo que é modelar os efeitos dinâmicos da cidade e realizam estudo de cenários de cargas especiais. O primeiro método foi apresentado para obter a previsão espacial de toda área de serviço sendo este utilizado para

estudar um cenário de referência e o segundo método desenvolvido realiza outra classe de estudos de cenários, nos quais se considerem a influência de cargas especiais.

Os métodos apresentados consideram a disponibilidade atual de dados nas empresas do setor, usando só o banco de dados comercial da empresa de serviço elétrico e o conjunto de dados georreferenciados dos elementos da rede.

Os sistemas multiagentes desenvolvidos neste trabalho apresentam um caráter estocástico, que é uma característica da demanda elétrica em um sistema e dos usuários em um sistema de distribuição. No primeiro método se utilizou operador genético de torneio, para aproveitar as características de aleatoriedade controlada e sobrevivência estatística do mais forte. Em cada torneio é gerado um número aleatório e se tem como ganhador aquele cuja probabilidade de desenvolvimento se encontra mais perto pela direita do número aleatório gerado. No segundo método se utiliza a aleatoriedade controlada, considerando-se a probabilidade de desenvolvimento como fator de controle.

Um dos problemas das metodologias de previsão espacial é que não é fácil fazer comparações com dados de validação, portanto é difícil comparar com outros métodos.

Um elemento que poderia ser usado como verificador, seria uma base de dados técnicos de todos os elementos da rede, na qual esteja incluído um item relacionado com o ano de instalação do elemento. Deste modo, realizando regressões, seria possível recriar pontos históricos na distribuição da demanda na rede.

Devido a não contar com dados de avaliações os métodos são comparados com a metodologia manual apresentada em Willis (2002). Esta metodologia utiliza o conhecimento e as decisões do planejador para determinar o crescimento da demanda. Ao comparar os resultados com aqueles de uma simulação realizada pelo departamento de planejamento da empresa elétrica que utiliza a metodologia manual, pode-se verificar a confiabilidade das respostas, mostrando um erro que varia entre 5 a 10% em diferentes simulações.

7.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A metodologia realiza importantes contribuições aos trabalhos prévios. Uma contribuição importante é poder fazer simulações de subáreas da área de serviço, modelando a influência de cargas especiais nas vizinhanças. Existem cargas que apresentam uma preponderância dentro de um raio de influência, deste modo, para esta classe de cargas não é necessário realizar simulações em toda a área de serviço. O método proposto permite realizar estudos de cenários considerando esta classe de cargas e considerando a dinâmica urbana da cidade.

Os sistemas multiagente desenvolvidos, além de modelar a dinâmica urbana, podem ser utilizados para estudo de cenários. O primeiro método modela um cenário de referência e o segundo estuda outra classe de cenários, na qual se considere a influência de cargas, no entorno destas.

Outra contribuição é mostrar a quantidade de demanda esperada para cada subárea com um número real, que é um dado de muita utilidade para a área de planejamento possibilitando aos planejadores definir a expansão de alimentadores, a expansão de subestações e o volume de obras para atender o incremento de carga.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Os sistemas multiagentes detalhados neste trabalho consideram cenários, nos quais se têm uma nova carga por cada cenário, mas não foram considerados cenários que apresentem mais de uma nova carga. Um exemplo destes cenários pode ser a instalação de duas empresas, alocadas em subáreas diferentes na cidade. No entanto, o raio de influência destas pode-se superpor em uma subárea do entorno de ambas as cargas. Esta classe de cenário mostrará a mudança do uso do solo que acontece em uma subárea influenciada por mais de uma carga.

Por outro lado, é necessário fazer estudos com outras metodologias de modelagem espacial e simulações do uso de solo. Na área de urbanismo, estudos do uso solo utilizam

muitas ferramentas entre estas o uso de fractais vem ganhando importância (BATTY, 2007), na realização de simulações espaços-temporais.

7.3 PUBLICAÇÕES

O primeiro método proposto de previsão espacial de demanda de toda área de serviço mostrado neste trabalho gerou um artigo que foi aceito para o congresso XVIII Congresso Brasileiro de Automática (CONGRESO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 2010), com título: Sistema Multi-Agente para a previsão espacial de demanda elétrica.

Partes dos resultados do segundo método mostrado neste trabalho foram colocadas em um artigo submetido para o congresso IEEE/PES T&D 2010 Latin America, no qual foi aceito o resumo e se está elaborando a versão final para ser apresentado neste congresso, com título: Spatial load forecasting using a demand propagation approach.

Por outro lado, com novas simulações se está elaborando uma futura publicação em um congresso e/ou revista internacional.

REFERÊNCIAS

ABU EL-MAGD, M. A.; SINHA, N.K. Short term load demand modeling and forecasting: a review. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, New York, v. 12, n. 33, p. 370-382, 1982.

ALFARES, H. K.; NAZEERUDDIN, M. Electric load forecasting: literature survey and classification of methods. **International Journal of Systems Science**, Hants, v. 33, n. 1, p. 23-24, 2002.

ALLEN, P. M. **Cities and regions as self-organizing systems: models of complexity**. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1997.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENGENHARIA ELÉTRICA - ANEEL – PRODIST. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 01 fev. 2009.

ARANDA, G.; BOROBIA, A.; VÁZQUEZ, L. **Evolución del consumo de la energía eléctrica: Simulación con agentes de fenómenos sociales**. 2007. 79 f. Trabalho de

Conclusão (Graduação)– Facultad de Informática de la Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2007. Disponível em: <<http://eprints.ucm.es/8863/>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

AURELIO, B. F. **Miniaurélio eletrônico versão 5.12**. Curitiba: Positivo, 2004. Disponível em: <<http://www.aureliopositivo.com.br/>>. Acesso em: 25 jan. 2010.

BACKLUND, Y.; BUBENKO, J. A. Distribution system design using computer graphics technique. Power Industry Computer Applications Conference, PICA-79. **IEEE Conference Proceedings**,[s.n], p. 382-388, 1979.

BATTY, M. **Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals**. Massachusetts: The MIT Press, 2007.

BERIZZI, A. The Italian 2003 blackout. **Power Engineering Society General Meeting IEEE**, Denver, Colorado, v. 2, p. 1673 -1679, 2004.

BOSSE, T.; GERRITSEN, C.; HOOGENDOORN, M. Comparison of agent-based and population-based simulations of displacement of crime. In: IEEE/WIC/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT AND AGENT TECHNOLOGY, 2008, University of Technology, Sidney, Australia. **WI-IAT Workshops...** [s.l.: s.n.], 2008. p. 469-476.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. **Modelo institucional do setor elétrico**. Brasília: Ministério de minas e energia, 2003. Disponível em: <http://ucel.eln.gov.br/gse_doc/Modelo_Energia.pdf>. Acesso em: 12 maio 2009.

CARRENO, E. M. **Previsão espacial de demanda em sistemas de distribuição com uma base reduzida de dados**. 2008. 106 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee>>. Acesso em: 01 jun. 2008.

CARRENO, E. M.; PADILHA-FELTRIN, A. Evolutionary heuristic to determine future land use. In: IEEE PES GENERAL MEETING, 2008, Pittsburgh. **Conference...** Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1-6.

CARRENO, E. M.; PADILHA-FELTRIN, A. Spatial electric load forecasting using a local movement approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEM APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, 15., 2009, Curitiba. **Conference...** Curitiba: IEEE, 2009. p. 1-6.

CARRENO, E. M.; ROCHA, R. M.; PADILHA-FELTRIN, A. A Cellular automaton approach to spatial electric load forecasting. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, n. 99, p. 1-9, 2010.

CHOW, M.; ZHU, J.; TRAM, H. Application of fuzzy multi-objective decision making in spatial load forecasting. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 13, n. 3, p. 1185-1190, 1998.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco bay area. **Environment and Planning: Planning and Design**, London, v. 24, p. 247-261, 1996

CONG, L.; ZHANG, J.; ZHANG, G.; JIN, C., ZHANG, J. Spatial load forecasting based on generalized support vector machines and cellular automaton theory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE POWER GENERATION AND SUPPLY SUPERGEN, 9., 2009, Nijjing. **Conference proceedings...** Nijjing: IEEE, 2009. p. 1-6.

DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS – DESA. **World urbanization prospects the 2007 revision highlights**. New York: The United Nations Secretariat, 2008. Disponível em:
<http://secint24.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007WUP_Highlights_web.pdf.>. Acesso em: 08 June 2010.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI. **Research into load forecasting and distribution planning**. Palo Alto: CA, 1978. 65 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Mercado de energia elétrica 2006 - 2015**. Rio Janeiro: EPE, 2005. 450 p.

EPSTEIN, J. M.; AXTELL, R. **Growing artificial societies: social science from the bottom-up**. Cambridge: The MIT press, 1996. 208 p.

FERBER, J. **Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence**. New York: Addison-Wesley, 1999. 509 p.

FRANCISQUINI, A. A. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição**. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: <<http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee>>. Acesso em: 15 fev. 2010.

GARDNER, M. The fantastic combinations of john conway's new solitaire game of life. **Scientific American**, New York, v. 223, n. 4, p. 120-123, 1970.

GILBERT, N. **Holism, individualism and emergent properties an approach from the perspective of simulation**. Guildfor: University of surrey at Guildfor Social and Computer Sciences Research Group, 1996. Disponível em:
<http://www.soc.surrey.ac.uk/staff/ngilbert/ngpub/paper118_NG.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2010.

GILBERT, N.; CONTE, R. **Artificial societies: the computer simulation of social life**. London: London University College of London, 1995. 257 p.

GREGG, J. Spatial load forecasting for system planning. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1978, Chicago. **Proceedings...** Chicago: Univ. of Illinois, 1978.

IPPOLITO, L.; SIANO, P. **An agent based system for electrical components protection**. Italia: European Power and Energy Systems, 2004. Disponível em:
<<http://www.actapress.com/PaperInfo.aspx?PaperID=17984>>. Acesso em: 22 abr. 2010.

JENNINGS, N. R.; SYCARA, K.; WOOLDRIDGE, M. **A roadmap of agent research and development**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 7-38.

KHALESIAN, M.; DELAVAR, M. R. A Multi-Agent based traffic network micro-simulation using spatio-temporal GiS. In: **The international archives of the photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Beijing: Univ. of Tehran, 2008. v. 37, pt. B2, p. 31-36.

LARSSON, S.; EK, E. The black-out in southern sweden and eastern denmark september 23, 2003. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2004, Denver, Colorado. **Conference proceedings...** Denver: IEEE, 2004. p. 1668-1672.

LAZZARI, A. Land use data improves load forecast. **Electrical World**, North Canton, v. 159, n. 25, p.38-40, 1962.

MATTHEWMAN, P. D.; NICHOLSON, H. Techniques for load prediction in electricity supply industry. **Proceedings of the IEEE**, New York , v. 115, n. 10, p. 1451-1457, 1968.

MENGE, E. E. Electrical loads can be forecasted for distribution planning. In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1977, Chicago. **Proceedings...** Chicago: [s.n.], 1977. p. 1155-1162.

MIRANDA, V.; MONTEIRO, C. Fuzzy inference in spatial load forecasting. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2000, Singapore. **Proceedings...** Singapore: [s.n.], 2000. p. 1063-1068.

MOGHRAM, I; RAHMAN, S. Analysis and evaluation of five short term load forecasting techniques. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 4, n. 11, p. 1484-1491, 1989.

MO-YUEN, C.; HAHN, T. Application of fuzzy logic technology for spatial load forecasting. **Transmission and Distribution Conference, Proceedings IEEE**, New York, v. 1, n. 14, p. 608-614, 1996a.

MO-YUEN, C.; HAHN, T. Methodology of urban re-development considerations in spatial load forecasting. **Transmission and Distribution Conference, Proceedings IEEE**, New York, v. 1, n. 14, p. 452-457, 1996b.

NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY CORPORATION - NERC. **Technical analysis of the august 14, 2003, blackout**. New Jersey: NERC, 2004. Disponível em: <<http://www.nerc.com>>. Acesso em: 02 fev. 2010.

OBJECT MANAGEMENT GROUP - OMG. **MASIF - RTF results**. Needham: OMG, 1998. Disponível em: <<http://www.agent.ai/doc/upload/200302/omg98.pdf>> Acesso em: 02 fev. 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Informativo ONS - n. 06 - novembro/2009**. Rio de Janeiro: ONS, 2009. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 26 maio 2010.

PARLOS, A. G.; OUFI, E.; MUTHUSAMI, J.; PATTON, A. D. Development of an intelligent long term electric load forecasting system. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE ISAP, 1996, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE, 1996. p. 288-292.

PORTER, A. L; ROPER, A. T.; MASON, T. W.; ROSSINI, F. A.; BANKS, J. **Forecasting and management of technology**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 448 p.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I. Human agents between local and global forces in a self-organizing city. In: SCHWEITZER, F. (Ed.). **Self-organization of complex structures: from individual to collective dynamics**. Amsterdam: CRC, 1997. p. 537-546.

PRACA, I.; RAMOS, C.; VALE, Z.; CORDEIRO, M. MASCEM: a multiagent system that simulates competitive electricity markets. **Intelligent Systems IEEE**, New York, v. 18, n. 6, p. 54-60, 2003.

PRITCHETT, A.; LEE, S. M.; ABKIN, M.; GILGUR, R.; BEA, K.; CORKER, K.; VERMA, S.; JADHAV, A.; REYNOLDS, T.; GOSLING, G. Examining air transportation safety issues through agent-based simulation incorporating human performance models. In: **IEEE/AIAA DIGITAL AVIONICS SYSTEMS**, 21., 2002, California. **Conference proceedings...** California: IEEE, 2002. p. 3-7.

RUSSEL, S.; NORVING, P. **Artificial intelligence: a modern approach (AIMA)**. 3. ed. Norvig: Prentice Hall, 2003. 1152 p.

SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS - SEADE. **Perfil Municipal de Presidente Prudente**. São Paulo: SEADE, 2010. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfil.php>>. Acesso em: 28 maio 2010.

TOFFOLI, T.; MARGOLUS, N. **Cellular automata machine: a new environment for modeling**. Cambridge: The MIT Press, 1987. 259 p.

VAN WORMER, F. C. Some aspects of distribution load area geometry. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 76, n. 2, p. 125, 1955.

VASQUEZ-AMEZ, R. L.; JARDINI, J. A.; CASOLARI, R.; MAGRINI, L. C.; SEMOLINI, R.; PASCON, J. R. A methodology for electrical energy forecast and its spatial allocation over developing boroughs. In: **TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION**, 2008, Chicago. **Proceedings...** Chicago: IEEE, 2008. p. 1-6.

VON NEUMANN, J. **Theory of self-reproducing automata**. Champain: University of Illinois Press, 1966. 25 p.

WALL, D. L.; THOMPSON, G. L.; NORTHCOTE-GREEN, J. E. D. An optimization model for planning radial distribution networks. **Power Apparatus and Systems. IEEE Transactions on Power Systems**, p. 1061-1068, 1979.

WEDDE, H. F.; LEHNHOFF, S.; HANDSCHIN, E.; KRAUSE, O. Real-time multi-agent support for decentralized management of electric power. In: **REAL-TIME SYSTEMS**, 18., 2006. Dresden. **Conference proceedings...** Dresden: IEEE, 2006, p. 1-9.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. Cambridge: MIT Press, 2000. 591 p.

WILLIS, H. L. Urban model application to electric demand forecasting. In. ANNUAL PITTSBURGH CONFERENCE MODELING AND SIMULATION, 8., 1977, Pittsburg. **Proceedings...** Pittsburg: Instrument Society of America, 1977.

WILLIS, H. L.; GREGG, J.; CHAMBERS, Y. Small area electric load forecasting by dual spatial frequency modeling. In: JOINT AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE, 1977, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 1977.

WILLIS, H. L.; GREGG, J.; CHAMBERS, Y. Spatial load forecasting for system planning . In: AMERICAN POWER CONFERENCE, 1978, Chicago. **Proceedings...** Chicago: [s.n.], 1978. p. 1249-1257.

WILLIS, H. L.; NORTHCOTE-GREEN, J. E. D. Spatial electric load forecasting: a tutorial review. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 71, n. 2, p. 232-253, 1983.

WILLIS, H. L.; PARKS, T. W. Fast algorithms for small area electric load forecasting. **IEEE transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. 102, n. 10, p. 3425-3432, 1983.

WILLIS, H. L.; POWER, R. W.; TRAM, H. N. Short range load forecasting for distribution system planning: an improved method for extrapolating feeder load growth. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 3, p. 1306-1312, 1992.

WILLIS, H. L.; ENGEL, M. V.; BURI, M. J. Spatial load forecasting. **Computer Applications in Power IEEE**, New York, v. 8, n. 2, p. 40-43, 1995.

WILLIS, H. L. **Spatial electric load forecasting**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2002. 748 p.

WOLFRAM, S. **Cellular automata and complexity: collected papers**. Readings: Addison – Wesley, 1994. 608 p.

WOOLDRIDGE, M. **Multiagent systems**. Chichester: John Wiley and Sons, 2002. 348 p.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. Intelligent agents: theory and practice. **The knowledge Engineering Review**, Cambridge, v. 10, n. 2 , p. 115-152, 1995.

WU, H. C.; TSA, C. S.; LU, C. N. Load forecast in a competitive retail market. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE, 16., 1999, New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 1999. v. 1, p. 160-164.

YANG, L.; LIN, J.; WANG, J.; CHEN, G.; HUANG, X.; CHENG, J. Power cellular automata and space-time character forecasting of power load. In: ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES - DRPT, 3., 2008, Najing. **Conference ...** Najing: IEEE, 2008. p. 1192-1197.

YANG, X.; YUAN, J.; ZHANG, T.; MAO, H. Application of uncertainty reasoning based on cloud theory in spatial load forecasting. In: WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 6., 2006, Dalian. **Conference proceedings...** Dalian: IEEE, 2006. p. 21-23.

ZHOU, Q.; FU, J.; LIU, X.; YANG, T.; SUN, C.; LI, J. Rough sets and cellular automata applied to spatial load forecasting, high voltage engineering and application. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, 2008, Chongqing. **Conference proceedings...** Congqing: IEEE, 2008. p. 754-758.