



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Amintas Ferreira Fraga Neto

**UM PROCESSO PARA DETERMINAÇÃO DE FATOR DE
CIRCUITO: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE PETROLINA-
PE**

Juazeiro – BA
2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Amintas Ferreira Fraga Neto

**UM PROCESSO PARA DETERMINAÇÃO DE FATOR DE
CIRCUITO: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE PETROLINA-
PE**

Trabalho apresentado à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Tecnológico, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César Rodrigues de Lima Júnior

Juazeiro-Ba
2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

FOLHA DE APROVAÇÃO
Para TFC

Amintas Ferreira Fraga Neto

**UM PROCESSO PARA DETERMINAÇÃO DE FATOR DE
CIRCUITO: ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE PETROLINA-
PE**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de Produção, pela Universidade
Federal do Vale do São Francisco.

Paulo Cesar Rodrigues de Lima Junior, Dr – UNIVASF

Thiago Magalhães Amaral, MSc - UNIVASF

Hesler Piedade Caffé Filho, Esp - FASJ

Aprovado pelo Colegiado de Engenharia de Produção em __ / __ / __

Maria Zislaine de O. Fraga, Roberto Bossi Fraga e eu, Amintas Ferreira Fraga Neto, como uma única pessoa, dedicamos esse trabalho a Alvaro de Oliveira e Olga Bossi Fraga, por terem reafirmado os valores e o significado do termo família.

Agradecimentos

A graduação permite um desenvolvimento pessoal que vai além da técnica científica. Em meu caso, só descobri que tinha crescido quando reafirmei minha fé em um Deus maravilhoso, que me fala diretamente e realiza milagres todos os dias. Agradeço a Deus pela presença.

Agradecer aos meus pais seria como agradecer a mim mesmo. Nenhuma das conquistas de até então não foi totalmente compartilhada com eles. Eles que, por vezes, constituíram o motivo integral da perseverança.

Agradeço a Alvaro de Oliveira e Olga Bossi Fraga mais que a confiança, atenção e o respeito. Agradeço por serem uma enorme referência de honestidade, bom caráter e, principalmente, que vale apenas tentar acertar sempre, mesmo torcendo pelo Fluminense!

Aos meus irmãos Roberta, Arthur e Helen. À Roberta pela saudade dela e do meu sobrinho Victor. A Arthur e Helen, por já terem chegado onde quero estar aos meus 40 ou 50 anos. Mas continuo achando que sou melhor que o Tôco em jogos de corrida.

A todos do colégio Aquarela, nas pessoas da Prof. Márcia Adriana, Ana Cristina e do Prof. Alex. A todos que ajudaram nessa caminhada longa do ensino médio. A Carlito e Neuma.

Aos amigos que criei por verdadeiros laços gratuitos, lembrados nas pessoas de Alisson Thiago, Jorge Duarte e Erick Santana. Aos amigos de sempre, que mantiveram sempre o mesmo olhar daquela despedida a 5 anos atrás, nas pessoas de Geovane e Dema. Aos que sempre acreditaram.

Em especial, agradeço ao professor Paulo Cesar, responsável por muito do que hoje sei sobre ética e profissionalismo. Ao amigo Paulo Cesar, pelos bons conselhos e ditos populares. Ao colega Paulo Cesar por me fazer entender que engenharia tem tudo a ver comigo e que a recíproca depende de esforço.

Por fim, agradeço a compreensão de Imna Mirella. Agradeço o carinho e a beleza de tratar-se de um lindo presente de Deus.

Minha história...

“Era quatro e meia, passava um pouquinho, um fosco clarinho rasgava o varjão. Era o trem noturno que vinha pontando e logo parando na velha estação. Meu corpo tremia meus olhos molhavam, o meu pai do lado e a mala no chão. Beije o seu rosto e disse na hora: o mundo lá fora me espera paizão!”

Mala Amarela – Turquinho violeiro e Fabiano

“Vai e grite ao mundo que você está certo, você aprendeu tudo enquanto estava mudo, agora é necessário gritar, cantar e demonstrar os teoremas da vida e os macetes do xadrez. (...) Quando algum profeta vier lhe contar, que o nosso Sol tá prestes a se apagar, mesmo que pareça que não há mais lugar... Vocês ainda têm a velocidade da luz pra alcançar.”

Raul Seixas

Resumo

Sistemas logísticos evoluem concomitantemente ao desenvolvimento tecnológico de tratamento da informação. Essa evolução projeta tais sistemas rumo à redução de custos e melhoria no padrão de qualidade dos serviços oferecidos. Nesse contexto, as técnicas de redução de custos priorizam áreas que apresentam maiores custos envolvidos. Em logística, a atividade de distribuição física consome cerca de 60% dos custos totais de operação e, nessa área, os maiores desperdícios identificados relacionam-se com a má utilização de veículos e pessoas devido à realização de roteiros de entregas ineficientes. Atualmente existem pacotes computacionais que geram boas soluções para o problema de roteirização de veículos, com o inconveniente de serem pacotes de aplicativos caros e que exigem conhecimentos específicos para operá-los. O grande desafio para empresas de médio e pequeno porte é encontrar metodologias alternativas para o problema de roteirização de veículos. Alguns métodos alternativos, como o Método da Varredura ou o Método das Economias, utilizam heurísticas de fácil aplicação e programação computacional e apresentam resultados bastante satisfatórios, no entanto, as soluções de tais sistemas, geralmente, relacionam-se a distâncias euclidianas entre os pontos, sendo necessária a conversão para distâncias mínimas pelas vias de tráfego (distâncias em rede). Essa conversão pode ser feita pela utilização de um fator chamado Fator de Circuito – FC que depende das condições de tráfego das vias urbanas das cidades, da geografia, da urbanização, do porte e pode divergir de uma cidade para outra. Nesse trabalho de fim de curso foi definido um processo para determinação do FC e aplicado o processo para encontrar o FC para a cidade de Petrolina, segmentado em faixas de aplicação como um número real multiplicador “k” ou como uma equação resultante de regressão linear. Utilizou-se, para tanto, ferramentas SIG para criação de rede lógica representando a malha viária da cidade e para a geração de distâncias e pontos aleatórios. Os dados gerados foram tratados com auxílio de pacotes estatísticos e planilhas eletrônicas que possibilitaram ainda a análise de erros da metodologia proposta.

Palavras-chave: roteirização de veículos, fator de circuito, Petrolina.

Abstract

Logistics systems evolve as fast as the technological development of information processing. This evolution designs these systems towards costs reduction and improvement in the quality of offered services. In this context, the cost reduction techniques act primarily in the areas most sensitive to improvements, ie, those with higher costs involved. In logistics, physical distribution represents about 60% of the total costs of operation and, in this area, the biggest waste identified is related to the misuse of vehicles and people due to the implementation of inefficient delivery routes. Currently, there are software packages that generate good solutions to the problem of vehicle routing, with the drawback of being expensive and requiring special expertise to operate them. The challenge for midsize and small companies, who can not afford the costs of current routing systems, is to find alternative methods for vehicle routing problem. Some alternative methods such as Scanning Method or the Savings Method, use heuristics and user-friendly computer program and show satisfactory results, however, solutions of such systems generally relate to Euclidean distances between points, being required conversion to minimum distances for traffic routes (network distances). This conversion can be done by using a factor called Factor Circuit - CF. In this work, It was defined a process for obtaining the CF related to midsized cities and applied this process to calculate the CF for the city of Petrolina, segmented into ranges of application as a real multiplier number "k" or as a result of linear regression equation. We used, to do so, GIS tools for creation of a logical network representing the roads of the city and for the generation of random points and distances. The data was processed with the aid of statistical packages and spreadsheets that still allowed the error analysis of the proposed methodology

Keywords: vehicles routing, circuit factor, Petrolina.

Lista de Ilustrações

Figura 1: Diagramação da distância euclidiana e distância em rede, ajustada pelo fator de circuito FC.	21
Figura 2: Agrupamento adequado de destinos de entrega.	32
Figura 3: Segmentação de destinos de entrega por dia de visita em Petrolina-PE...	33
Figura 4: Exemplo de roteiro sobreposto (a) e recomendado (b) tendendo ao formato de lágrima.....	34
Figura 5: Ilustração do conceito de ganho com a integração de dois clientes em roteiro compartilhado.....	36
Figura 6: Exemplo de SIG: recursos visuais atrelados a banco de dados.	42
Figura 7: Representação de um diagrama de caixa (<i>box plot</i>).	Erro! Indicador não definido.
Figura 8: Interface do ArcGIS®: Mapa plano da cidade de Petrolina atrelado a banco de dados.....	49
Figura 9: Construção da rede lógica a partir do mapa plano da cidade de Petrolina.	50
Figura 10: Determinação da menor distância em rede entre dois pontos quaisquer.	51
Figura 11: 100 pontos sorteados aleatoriamente na rede lógica da cidade de Petrolina.	52
Figura 12: Exemplo de matriz de distâncias.....	55
Figura 13: Exemplos de Matrizes OD. (a) Distâncias euclidianas, (b) Distâncias em rede e (c) Razão entre as respectivas distâncias em rede e euclidianas.	58
Figura 14: Comparação entre distância em rede calculada no software (b) e distância em rede aproximada pelo Fator de Circuito $k = 1,272$ (c).	59

Figura 15: Distribuição espacial dos 10 pontos sorteados aleatoriamente na rede...	67
Figura 16: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas dos 10 pontos sorteados na rede.	68
Figura 17: Gráfico <i>Box Plot</i> para os resultados da razão entre as distâncias em rede e euclidianas calculadas entre os 10 pontos sorteados.	69
Figura 18: Distribuição espacial dos 50 pontos sorteados aleatoriamente na rede...	72
Figura 19: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 50 pontos sorteados na rede.	73
Figura 20: Gráfico <i>Box Plot</i> para as razões entre distâncias calculadas para 50 pontos sorteados.	74
Figura 21: Histograma para as razões de distâncias de 50 pontos sorteados na rede.	75
Figura 22: Distribuição espacial dos 100 pontos sorteados aleatoriamente na rede.	78
Figura 23: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 100 pontos sorteados na rede.	79
Figura 24: Gráfico <i>Box Plot</i> para as razões entre distâncias calculadas para 100 pontos sorteados.	80
Figura 25: Distribuição espacial dos 500 pontos sorteados aleatoriamente na rede.	83
Figura 26: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 500 pontos sorteados na rede.	84
Figura 27: Gráfico <i>Box Plot</i> para as razões entre distâncias calculadas para 500 pontos sorteados.	85
Figura 28 Distribuição espacial dos 1000 pontos sorteados aleatoriamente na rede.	89

Figura 29: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 1.000 pontos sorteados na rede.	90
Figura 30: Gráfico <i>Box Plot</i> para as razões entre distâncias calculadas para 1000 pontos sorteados.	91
Figura 31: Diagramação do “k” e da equação de regressão com destaque para o ponto onde as retas se cruzam.	95
Figura 32: Intervalo de valores para definição do FC.	97
Figura 33: Intervalo simplificado para definição do FC.	97
Figura 34: Processo para determinação do FC.	99

Lista de Tabelas

Tabela 1: Elementos básicos de sistemas de distribuição física.	30
Tabela 2: Vantagens e Desvantagens dos métodos de Construção de Roteiros.....	37
Tabela 3: Distâncias rodoviárias entre as Capitais Nordestinas e Petrolina PE.....	43
Tabela 4: Algumas empresas, ligadas à logística de distribuição, localizadas na RIDE Juazeiro - Petrolina.	44
Tabela 5: Pares de distâncias hipotéticas para ilustrar a regressão linear.....	61
Tabela 6: Parâmetros para solução das <i>equações normais</i>	61
Tabela 7: Comparativo entre a distância em rede fornecida pelo <i>software</i> e a distância aproximada pela equação de regressão.	62
Tabela 8: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias em rede e euclidianas calculadas entre os 10 pontos sorteados.	70
Tabela 9: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 10 pontos sorteados.	70
Tabela 10: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 10 pontos sorteados).	71
Tabela 11: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 50 pontos sorteados.	75
Tabela 12: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 50 pontos sorteados.	76
Tabela 13: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 50 pontos).	77

Tabela 14: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 100 pontos sorteados.	80
Tabela 15: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 100 pontos sorteados.	81
Tabela 16: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 100 pontos).	82
Tabela 17: Comparação entre as médias das razões entre as distâncias em rede e euclidianas para 500 pontos sorteados.	84
Tabela 18: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 500 pontos sorteados.	86
Tabela 19: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 500 pontos sorteados.	86
Tabela 20: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 500 pontos).	87
Tabela 21: Comparação entre a variação percentual dos dados de entrada para equação linear e os resultados gerados.	88
Tabela 22: Comparação entre as médias das razões entre as distâncias em rede e euclidianas para 1000 pontos sorteados.	90
Tabela 23: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 1000 pontos sorteados.	91
Tabela 24: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 1000 pontos sorteados.	92

Tabela 25: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 1000 pontos).	93
Tabela 26: Erros médios (em metros) para as aproximações de distâncias para 50, 100, 500 e 1000 pontos sorteados.	96

Sumário

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação	18
1.2 Definição do Problema	19
1.3 Justificativa.....	21
1.4 Objetivos	23
1.4.1 Objetivo Principal	23
1.4.2 Objetivos Específicos.....	23
1.5 Estrutura do Trabalho.....	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 Introdução	25
2.2 Comércio e Logística.....	25
2.3 Logística e Distribuição Física de Produtos	27
2.4 Roteirização	30
2.4.1 Métodos de Roteirização e Programação	35

2.5 Fator de Circuito.....	37
2.6 Sistemas de Informações Geográficas - SIG	39
2.7 A Cidade em Estudo	43
2.8 Conclusão do capítulo.....	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 Finalidade da Pesquisa.....	46
3.2 Tipo e Natureza da Pesquisa	46
3.3 Objetivos da Pesquisa.....	47
3.4 Delineamento da Pesquisa	48
3.4.1 <i>Software</i> Utilizado	48
3.4.2 Construção da Rede Lógica da Cidade de Petrolina	49
3.4.3 Sorteio Aleatório de Pontos na Rede	51
3.4.4 Distância Euclidiana e em Rede	52
3.4.5 Matrizes de Distâncias	54
3.4.6 Tratamento Estatístico	56
3.4.7 Determinação do FC	57
3.5 Conclusão do Capítulo	63
4 ANÁLISE DE RESULTADOS	65
4.1 Tratamento e Análise de Dados	65
4.2 Fator de Circuito para 10 Pontos Sorteado	66
4.2.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 10 Pontos Sorteado	66
4.2.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 10 Pontos Sorteado	70
4.3 Fator de Circuito para 50 Pontos Sorteado	72

4.3.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 50 Pontos Sorteados	72
4.3.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 50 Pontos Sorteados	75
4.4 Fator de Circuito para 100 Pontos Sorteados	77
4.4.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 100 Pontos Sorteados	77
4.4.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 100 Pontos Sorteados	81
4.5 Fator de Circuito para 500 Pontos Sorteados	83
4.5.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 500 Pontos Sorteados	83
4.5.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 500 Pontos Sorteados	86
4.6 Fator de Circuito para 1000 Pontos Sorteados	88
4.6.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 1000 Pontos Sorteados	88
4.6.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 1000 Pontos Sorteados	92
4.7 Comparando Resultados.....	93
4.7.1 Análise de erros médios.....	93
4.7.2 Definindo o Fator de Circuito - FC.....	96
4.8 Processo para Determinação do Fator de Circuito	98
4.9 Conclusão do Capítulo	101
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
5.1 Conclusões	102
5.2 Recomendações	104

REFERÊNCIAS.....	105
------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A competitividade empresarial exige alta eficiência das empresas para manterem-se no mercado. Sob a ótica de ambientes industriais, o desenvolvimento de novas tecnologias em processos produtivos corrobora com a busca pela alta eficiência, reduzindo os custos de produção. Diante disso, a diferenciação entre as empresas tende a realizar-se nas atividades de apoio ao processo produtivo, dentre elas a logística, a contabilidade e o marketing.

A priori, a competitividade restringia-se à concorrência entre empresas, no entanto, hoje, configura-se em nível de cadeia produtiva, onde a cadeia mais eficiente é capaz de atender aos clientes com maior padrão de qualidade e custos reduzidos. O conceito de cadeia produtiva abordado por Prochnik (2002) demonstra a importância da cooperação entre os agentes produtivos, definindo-as como resultantes da crescente divisão do trabalho e maior interdependência entre os agentes econômicos, criadas pelo processo de desintegração vertical e especialização técnica e social, além das pressões competitivas por maior integração e coordenação entre as atividades. O nível de colaboração entre os componentes da cadeia foi elevado e o foco dos integrantes passa a ser o aumento da qualidade do pacote de serviços oferecido aos consumidores (BOTELHO, 2003).

Enquanto, para alguns, o ambiente de competição é visto como entrave ao crescimento, para outros é observado como oportunidade de ganhar mercados. Nesse sentido, empresas que observam as oportunidades de melhorias no pacote de serviços oferecido ao consumidor, geralmente, estão também atentas à inovação de produtos ou processos. Estendendo o conceito de inovação à busca por alternativas mais eficientes em atender as demandas de mercado, sejam por redução de custos, tempo ou racionalização do uso de recursos naturais ou ainda todas essas possibilidades reunidas, traça-se um cenário ideal à elaboração do presente trabalho.

No cenário evolutivo dos sistemas de produção, as atividades de apoio, dentre elas a logística, surgem como fronteira à redução de custos e agregação de

valor a produtos. A esse exemplo destaca-se a distribuição física de mercadorias que, dentre outros, agrega valor de lugar a produtos e, conseqüentemente, viabiliza a ampliação de mercados e o acirramento da competitividade empresarial. A esse respeito, Caixeta-Filho e Martins (2006) comentam que nenhuma área urbana poderia existir sem um massivo, confiável e sustentável fluxo de mercadorias direcionado a elas e dentro delas, exigindo assim uma consideração especial nas políticas urbanas, no planejamento dos transportes urbanos e na configuração espacial das cidades.

A distribuição urbana supre a necessidade de interligação de pontos de concentração de recursos com os mais variados locais por onde o usuário transita, colocando os produtos e serviços a seu alcance, no momento em que necessita de seus benefícios; por sua vez, produtos e serviços devem apresentar excelentes condições de utilização (GURGEL, 2000).

Dada a importância dos sistemas logísticos e a necessidade de redução dos custos das operações de transportes, descobrir os melhores roteiros aos veículos ao longo de uma rede de rodovias, ferrovias e hidrovias ou rotas de navegação aérea a fim de minimizar os tempos e as distâncias constituem problemas muito frequentes de tomada de decisão (BALLOU, 2006). A atividade de roteirização de veículos de entrega em empresas de distribuição de médio e pequeno porte, quando não negligenciada, é feita de maneira incipiente às tecnologias disponíveis, assim como ao nível de exigência dos mercados (ALVARENGA e NOVAES, 2000). A grande dificuldade da utilização dessas tecnologias está no preço dos pacotes de programas de roteirização, além do domínio da tecnologia, que costuma ser também oneroso. Dessa forma, a busca por metodologias alternativas de roteirização de veículos é uma proposta desafiadora para os profissionais da área de transportes.

1.2 Definição do Problema

Como parte integrante das cadeias produtivas, a atividade de distribuição física de mercadorias representa a maior parte dos custos das empresas de distribuição. De acordo com Fleury (2002), os custos de transporte chegam a representar, em média, 60% dos custos logísticos, nesse sentido, a roteirização adequada de veículos significa minoração desses custos. Segundo Botelho (2003), o

processo de roteirização de veículos está associado aos problemas de rede de transporte, que visam otimizar os esforços operacionais e reduzir custos.

O projeto de um sistema de distribuição física de produtos demanda uma série de informações que vão desde a morfologia dos produtos a serem transportados, passando pela quantidade de recursos disponíveis, até à escolha do modal de transportes ou veículo de entrega. No entanto, a operacionalização do sistema já projetado e implantado demanda informações atualizadas sobre quantidades de entrega, rastreamento de produtos, roteirização de veículos, dentre outras (ALVARENGA e NOVAES, 2000).

O número de atacadistas e/ou distribuidores é crescente, o porte dessas empresas é variado e, para grande parte delas, arcar com custos de aquisição e operação de *softwares* de roteirização é bastante oneroso, além disso, esses produtos exigem conhecimento específico para operá-los (RAZZOLINI FILHO, 2009). Assim, intenta-se estabelecer metodologias alternativas para roteirização e determinação das características da malha viária das cidades.

Algumas dessas metodologias oferecem resultados próximos aos oferecidos por pacotes computacionais específicos com a vantagem de serem mais simples, fáceis de implantar e operar e, principalmente, mais baratas. Como a atividade de roteirização de veículos de entrega depende, sumariamente, das condições das vias de transportes, maior conhecimento a respeito das características físicas das vias, principalmente tratando-se de grandes centros urbanos, pode possibilitar a redução dos custos de distribuição de produtos.

Nesse contexto introduz-se o conceito de Fator de Circuito - FC ou coeficiente de correção de distâncias, como indicativo de características físicas de malhas viárias, que pode ser representado por um número ou equação capaz de aproximar distâncias euclidianas¹ a distâncias em rede². A Figura 1 apresenta a diagramação da relação entre a distância em rede e a distância em linha reta (euclidiana) entre dois pontos localizados numa malha viária de cidade.

¹ Distância euclidiana refere-se à distância em linha reta entre pontos, como definido no método cartesiano.

² Distância em rede está relacionada com o deslocamento total de determinado veículo, pelas vias de tráfego, ao deslocar-se de determinado ponto a outro. Essa distância é sempre igual ou superior à distância euclidiana.

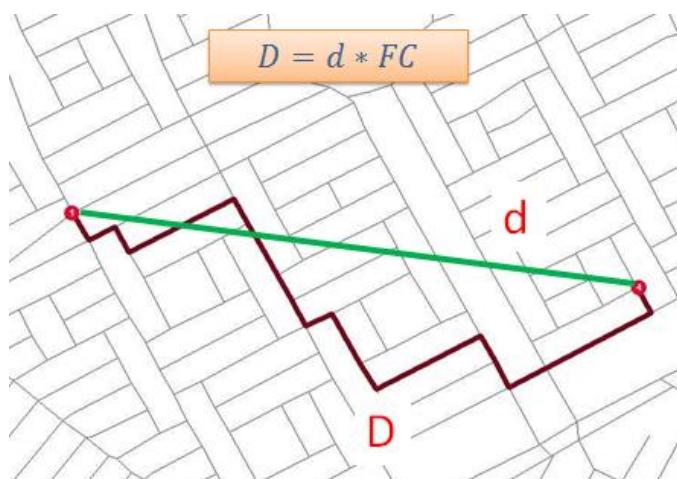


Figura 1: Diagramação da distância euclidiana e distância em rede, ajustada pelo fator de circuito FC.

A imagem ilustra que a distância em rede (D), ou distância viária, pode ser decomposta por uma série de pequenas distâncias que formam triângulos, tendo como hipotenusa parte da distância euclidiana entre os pontos. Dessa forma, concebe-se, matematicamente, que a distância entre dois pontos em rede (D) é sempre maior ou igual à distância entre os mesmos pontos em linha reta, de fato, da geometria básica, a menor distância entre dois pontos é sempre uma reta.

A relação entre essas distâncias é que pode variar de acordo com o perfil da malha viária das cidades. Dessa forma, a proposta desse Trabalho de Finalização de Curso é apresentar um processo para determinação do FC em cidades e, além disso, utilizar a metodologia para determinar o FC para a cidade de Petrolina-PE.

1.3 Justificativa

A evolução tecnológica caminha em busca da descoberta de novos materiais e processos capazes de reduzirem custos de produção. Observando a competição entre cadeias produtivas pelo poder de compra dos consumidores, a utilização de novas tecnologias, sejam elas em nível de produto ou processo, pode significar o diferencial competitivo para o sucesso das empresas, principalmente quando essas tecnologias representam soluções baratas a problemas complexos.

Em logística de distribuição, a roteirização adequada de veículos de entrega representa redução de ineficiências e impacta significativamente nos custos logísticos totais. O inconveniente é que a roteirização sistemática de veículos,

atualmente, depende de altos investimentos em *softwares*, treinamento e contratação de mão-de-obra especializada. Nesse sentido, metodologias de roteirização, que utilizem como insumo informações sobre malha viária de cidades, por exemplo, surgem como alternativa às atualmente disponíveis.

A determinação do FC representa maior conhecimento sobre o perfil da rede rodoviária de cidades, auxiliando nos processos de decisão de localização de facilidades, capacidade de veículos de entrega e definição de estrutura logística para empresas de distribuição. A utilização do FC aliada a um mapa plano representa uma forma barata de se aproximar distâncias reais percorridas por veículos em redes rodoviárias. O conhecimento prévio dessa variável pode auxiliar na maximização do tempo de uso de caminhões e veículos de transporte rodoviário.

Em logística de distribuição utilizam-se valores generalizados para o Fator de Circuito entre 1,30 e 1,35 (NOVAES, 2004). A determinação de um Fator de Circuito de 1,30, por exemplo, significa que, em uma rede rodoviária, uma distância de 10 km em linha reta corresponde a 13 km percorridos pelas vias urbanas. Tais informações são especialmente utilizadas em casos de dimensionamento de frota e localização de facilidades, quando se deseja aproximar distâncias em rede por distâncias euclidianas fornecidas em coordenadas cartesianas ou coordenadas geográficas (Latitude e Longitude). Os valores para o fator de circuito, disponíveis na literatura especializada, são generalizados e estimados por meio de análises estatísticas relacionando distâncias reais às distâncias em rede. A consequência direta da generalização do FC é a menor exatidão no cálculo da aproximação das distâncias que, por tratar-se de um modelo de estimação, possui riscos de incorrer em grande erro na utilização prática da distância aproximada.

Em termos de contribuição científica, a definição de uma proposta para determinação do FC abre precedente para utilização do modelo para outras cidades, estudos posteriores ou melhoramento do modelo proposto.

Diante do exposto, justifica-se esse estudo com base na necessidade da definição de uma metodologia para o cálculo do FC específico, já que é dependente de fatores como planejamento urbano das cidades, densidade de rede rodoviária, percentual de vias de mão única que, sobretudo, podem divergir de uma cidade para outra.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Principal

Determinar um processo para definição do Fator de Circuito FC e aplicação do modelo em Estudo de Caso na cidade de Petrolina-PE.

1.4.2 Objetivos Específicos

O objetivo principal foi desmembrado nos seguintes objetivos específicos:

- Destacar a importância do Fator de Circuito FC em termos de logística de distribuição e como seu uso pode ser útil na definição do perfil da rede rodoviária de cidades;
- Determinar um processo para definição do FC;
- Validar o processo por meio de análises estatísticas;

1.5 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho está dividido em capítulos que segmentam os conteúdos explorados. O capítulo primeiro trata as principais características do trabalho, da definição do problema de pesquisa, justificativa, além dos objetivos e aspirações do trabalho.

O capítulo segundo apresenta as principais definições e conceitos científicos explorados nesse trabalho, sob a forma de um resumo teórico dos conteúdos estudados. Nele apresentam-se conceitos de logística empresarial, distribuição física, roteirização de veículos de entrega, fator de circuito e definições estatísticas utilizadas.

O terceiro capítulo explora a metodologia adotada para realização desse trabalho científico, detalhando os procedimentos de geração e análise de dados,

com a discriminação das etapas seguidas para alcançar o objetivo geral e os específicos.

O quarto capítulo explora os resultados obtidos na pesquisa pela análise de dados e determinação do fator de circuito para a cidade de Petrolina – PE, uma aplicação do processo proposto para determinação do Fator de Circuito em estudo de caso.

No capítulo quinto são apresentadas as conclusões do trabalho, além de sugestões e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

Esse capítulo apresenta as principais observações relativas ao tema proposto, realizadas na atividade de revisão da literatura especializada. São abordados conceitos como: evolução do comércio ao longo do tempo, a logística e sua importância para as atividades comerciais, logística de distribuição, distribuição física de produtos, roteirização de veículos, sistemas de informações geográficas e fator de circuito.

2.2 Comércio e Logística

Novais (2004) apresenta uma perspectiva histórica do surgimento do comércio moderno desde suas raízes. Inicialmente, antes mesmo do surgimento das moedas, ou, pelo menos, da credibilidade financeira das mesmas, as mercadorias circulavam entre as pessoas por meio da troca ou escambo. Mesmo o ouro, que servia de moeda, não era acessível à maioria das regiões.

Com o fortalecimento das moedas como entidades financeiras, além do surgimento das cidades, a busca pelo conforto da vida em sociedade e o desenvolvimento de leis e regras de conduta, foi possível o surgimento da figura do comerciante. A evolução nos meios de comercialização passou pelo surgimento dos armazéns gerais, descritos por Novais (2004) como estabelecimentos voltados a comercialização de produtos variados, incluindo gêneros alimentícios, ferramentas e roupas. Nos armazéns gerais predominava a comercialização em dinheiro e não havia grande variedade de produtos como opções de marca ou modelo.

O aumento da exigência dos consumidores quanto ao consumo de marcas e modelos diferentes abriu espaço para a comercialização por catálogos, ainda predominante em alguns canais de distribuição. Esse tipo de comércio passou a ser viável após a consolidação dos serviços de correios atendendo a grande parte das regiões dos países. As compras por catálogo não supriam totalmente as

necessidades da população, principalmente, no que tange a experiência pessoal dos consumidores. Surgem então as redes especializadas do varejo, representadas por estabelecimentos direcionados à comercialização de produtos ou família de produtos específicos, a exemplo de lojas de sapatos ou artigos específicos. Posteriormente surgem os supermercados, cujo objetivo básico era o de ampliar a comodidade dos consumidores ao adquirir uma série de produtos em um mesmo local.

Daí por diante, o atendimento às exigências dos consumidores impulsionou as principais alterações na estrutura comercial. Atendendo a essa demanda, surgem os *shoppings centers* e as lojas de descontos. Os *shoppings*, suprimindo a necessidade de consumidores mais exigentes e concentrando a oferta de vários produtos e serviços. Por outro lado, as lojas de descontos, menos preocupadas com instalações ou acabamento do prédio, no entanto oferecendo famílias de produtos a preços baixos e apostando nas vendas em grandes volumes.

Esse cenário evolutivo demonstra como a concorrência empresarial influenciou nas modificações estruturais do comércio. A princípio, quando a variedade de produtos era baixa, assim como o número de concorrentes, as empresas sobreviviam em meio a ineficiências de várias espécies, sendo elas nos processos produtivos, no marketing dos produtos ou distribuição. Com a internacionalização dos mercados e o aumento da concorrência entre empresas e, principalmente, entre cadeias produtivas, as ineficiências passaram a ser penalizadas com o risco das empresas perecerem em meio ao ambiente competitivo. Nesse cenário, houve uma pressão à maximização no uso dos recursos produtivos e redução dos custos de produção globais. Foi incorporada à rotina da manufatura a racionalização dos recursos, ilustrada pelo surgimento de filosofias e técnicas produtivas como o *Just-in-time-JIT*, o Sistema Toyota de Produção, as ferramentas da qualidade, além dos sistemas *Enterprise Resource Planning* – ERP (Sistemas Integrados de Gestão) e *Material Requirement Planning* – MRP (planejamento das necessidades de materiais), dentre outros.

A evolução nos sistemas de manufatura não foi acompanhada à mesma medida pela evolução dos sistemas logísticos de suprimento interno e distribuição física. A esse respeito Caixeta-Filho e Martins (2006) revelam que a logística é tida como última fronteira para redução de custos nas empresas. Novaes (2004) complementa que, ao nível atual dos sistemas produtivos, reduções nos custos de produção não são tão sensíveis quanto reduções nos custos logísticos dos produtos.

2.3 Logística e Distribuição Física de Produtos

Ballou (2007) associa, à logística empresarial, o estudo e administração dos fluxos de bens e serviços e da informação associada que os põe em movimento. Bowersox e Closs (2007) afirmam que a logística envolve a integração de informações, transporte, estoque, armazenamento, manuseio de materiais e embalagem, configurando esforço integrado com o objetivo de ajudar a criar valor para o cliente pelo menor custo total possível. Novaes (2004) alerta que a logística tem papel importante na disseminação de informações em uma organização podendo ajudar positivamente caso bem equacionada, ou prejudicar os esforços mercadológicos caso negligenciada ou mal formulada. A logística, portanto, formaliza-se como atividade de apoio ao processo produtivo cujas atividades básicas são condizentes às exigências mercadológicas atuais. Além disso, em comum, os autores salientam a importância da logística no fluxo de informações da empresa e vice versa, ajustando o conceito de logística, outrora relacionado exclusivamente à movimentação e transporte de produtos. De fato, o objetivo básico da logística de agregar o máximo de valor ao cliente, utilizando para isso a menor quantidade possível de recursos da organização, pressupõe a união de esforços de vários setores da empresa. O fluxo de informação entre os setores revela o grau de integração entre os mesmos e pode ser utilizado como indicador do desenvolvimento dos sistemas logísticos.

Sistemas logísticos envolvem, portanto, administração/movimentação de materiais (suprimento interno), distribuição física de produtos, ambas relacionadas ao transporte, além do fluxo de informações relacionadas a essas atividades (DIAS, 1993). Apesar de conceitualmente interligados, tais subsistemas são passíveis de análise em separado.

O subsistema transporte, mais especificamente a distribuição física, é o ramo da logística empresarial que trata da movimentação, estocagem e processamento de pedidos dos produtos finais da firma. Em termos de custos, costuma ser a atividade mais importante para a maioria das empresas, pois absorve cerca de dois terços dos custos logísticos (BALLOU, 2007). Gurgel (2000) acrescenta que as despesas de distribuição podem variar entre 3,5 e 5,5% da receita líquida de uma empresa. Trata-se, portanto, de verbas vultosas, que podem significar 50% do lucro operacional de

uma empresa. O objetivo da administração dos centros de distribuição será sempre duplo e antagônico, como elevar a qualidade dos serviços prestados aos clientes e simultaneamente reduzir os custos dessa operação de distribuição.

Alvarenga e Novaes (2000) revelam que a distribuição física de produtos passou a ocupar um papel de destaque nos problemas logísticos das empresas, devido ao custo crescente do dinheiro (custo financeiro), que força as empresas a reduzir os estoques e agilizar o manuseio, transporte e distribuição dos seus produtos. Além disso, de acordo com Caixeta-Filho e Martins (2006), os transportes têm a função básica de proporcionar a elevação na disponibilidade de bens ao permitirem acesso a produtos que, de outra maneira, não estariam disponíveis para a sociedade.

O subsistema distribuição física contribui para o alcance dos objetivos gerais dos sistemas logísticos, em termos de geração de valor ao cliente, uma vez que permite às sociedades acesso a produtos produzidos fora de seus ambientes, tem o importante papel potencial de romper monopólios, provocados pelo isolamento geográfico, na produção e comercialização de mercadorias (CAIXETA-FILHO e MARTINS, 2006).

Em termos de operações, a distribuição física preocupa-se com bens acabados ou semiacabados cuja empresa não tem mais pretensões de processamentos posteriores, ou seja, que a companhia oferece para venda (BALLOU, 2007). Novaes (2004) relaciona a distribuição física aos processos operacionais de controle que permitem transferir os produtos desde o ponto de fabricação, até o ponto em que a mercadoria é realmente entregue ao consumidor.

Alvarenga e Novaes (2000) revelam que, no caso brasileiro, são comuns problemas de distribuição física envolvendo desde o planejamento e projeto dos respectivos sistemas (frota, depósito, coleta, transferência, distribuição etc.), até sua operação e controle.

As expedições das fábricas tendem a evoluir para Centros de Distribuição - CD, expedindo mercadorias provenientes de várias fábricas de uma corporação, produtos comprados de terceiros e mesmo mercadorias importadas (GURGEL, 2000).

Os critérios utilizados para definir a localização das fábricas não são os mesmos levados em consideração na localização dos centros de distribuição (GURGEL, 2000). As fábricas tendem a localizarem-se próximas às regiões

fornecedoras das matérias primas, reduzindo os custos de transporte desses insumos, em compensação os centros de distribuição tendem a serem instalados próximos aos grandes centros consumidores, facilitando as operações logísticas de consolidação de cargas, reduzindo o tempo de resposta ao cliente e, consequentemente, reduzindo os custos da atividade de transporte.

Novaes (2004) destaca alguns componentes físicos e informacionais que devem ser largamente considerados em projetos de sistemas genéricos de distribuição física, sendo eles:

- Instalações físicas (centros de distribuição, armazéns);
- Estoques de produtos;
- Veículos;
- Informações diversas;
- Hardware e Software diversos;
- Custos;
- Pessoal.

Uma gama de situações práticas pode envolver o emprego de tais componentes. Alguns exemplos de tipos de distribuição física: o abastecimento de lojas de eletrodomésticos a partir da fábrica ou centro de distribuição, distribuição de bebidas e alimentos, entregas domiciliares de gás e/ou água, jornais, etc.

Existem duas configurações básicas que ilustram os sistemas de distribuição física, sendo elas a distribuição “um para um” e a distribuição “um para muitos”. Novaes (2004) destaca:

Distribuição “um para um” é aquela em que o veículo é totalmente carregado no depósito da fábrica ou num CD do varejista (lotação completa) e transporta a carga para outro ponto de destino, podendo ser outro CD, uma loja, ou outra instalação qualquer.

Distribuição “um para muitos”, ou compartilhada trata-se da situação em que o veículo é carregado no CD do varejista, com mercadorias destinadas a diversas lojas ou clientes, e executando um roteiro de entregas predeterminado.

Em ambos os casos, uma série de fatores influenciam o dimensionamento e a dinâmica de sistemas de distribuição física. Nos casos mais comuns de distribuição o veículo cumpre um roteiro de entrega visitando vários clientes (loais de entrega) numa viagem (ALVARENGA e NOVAES, 2000). A Tabela 1 apresenta alguns dos fatores preponderantes em sistemas de distribuição “um para um” e “um para muitos”.

Tabela 1: Elementos básicos de sistemas de distribuição física.

Distribuição “um para um”	Distribuição “um para muitos”
Distância entre o ponto de origem e o ponto de destino	Divisão da região a ser atendida em zonas ou bolsões de entrega, sendo cada bolsão alocado normalmente a um veículo
Velocidade operacional	Distância entre o CD e o bolsão de entrega
Tempo de carga e descarga	Velocidades operacionais médias (V_1 : no percurso entre o depósito e o bolsão; V_2 : no percurso dentro do bolsão)
Tempo porta a porta	Tempo de parada em cada cliente
Quantidade ou volume do carregamento (medida em toneladas, metros cúbicos, paletes, etc.)	Tempo de ciclo (necessário para completar um roteiro e retornar ao depósito)
Disponibilidade de carga de retorno	Frequência das visitas às lojas ou clientes (diária, dia sim dia não, semanal etc.)
Densidade de carga	Quantidade de mercadoria (medida em toneladas, metros cúbicos, caixas) a ser entregue em cada loja
Dimensões e morfologia das unidades transportadas	Densidade de carga
Valor unitário	Dimensões e morfologia das unidades transportadas
Acondicionamento (carga solta, paletizada, a granel etc.)	Valor unitário
Grau de fragilidade	Acondicionamento (carga solta, paletizada, a granel etc.)
Grau de periculosidade	Grau de fragilidade
Compatibilidade entre produtos de natureza diversa	Grau de periculosidade
Custo Global	Compatibilidade entre produtos de natureza diversa
	Custo Global

Fonte: Adaptado de Novaes (2004).

2.4 Roteirização

O transporte é um dos elementos mais visíveis das operações logísticas (BOWERSOX e CLOSS, 2007). Além disso, a decisão operacional mais importante relacionada ao transporte na cadeia de suprimentos diz respeito a rotas e cronogramas de entregas (CHOPRA e MEINDL, 2003). O tempo em que as mercadorias passam em trânsito tem reflexos sobre o número de fretes que podem ser feitos por veículo num determinado período de tempo e nos custos integrais do transporte para todos os embarques (BALLOU, 2006).

Os objetivos mais comuns durante o desenvolvimento de rotas e cronogramas para os veículos são uma combinação de minimização de custos por meio da diminuição do número de veículos necessários e da distância total percorrida por veículo e tempo total de viagem, além da eliminação de falhas nos serviços que podem provocar atrasos nas entregas (CHOPRA e MEINDL, 2003).

Novais (2004) descreve o problema real de roteirização sob a definição de três elementos-chave, são eles: *decisões*, *objetivos* e *restrições*. As decisões que envolvem grande parte das informações necessárias ao processo de roteirização, preocupando-se com a alocação de clientes em roteiros, deliberações sobre veículos de entrega, motoristas, etc. Os objetivos estão relacionados ao nível de serviço prestado, além da minimização dos custos das operações. Além das restrições, que se apresentam geralmente diferenciadas em cada sistema de distribuição e devem, portanto, ser avaliadas uma a uma. Por exemplo, os recursos disponíveis (mão de obra, equipamentos, informações), limites de tempo (janelas de tempo ou jornadas de trabalho) e ainda as restrições de trânsito (velocidades máximas, horários de carga/descarga, tamanho máximo de veículos, etc.).

Embora sejam muitas as variações dos problemas de roteirização, é possível reduzi-los a alguns modelos básicos. Balou (2006) resume nos seguintes modelos:

- *Um ponto de origem e um ponto de destino*: como, por exemplo, o abastecimento de um centro de distribuição com produtos de uma fábrica;
- *Pontos de origem e destinos múltiplos*: comum em situações onde existam pontos múltiplos de fontes em condições de servir pontos múltiplos de destinos. Esse tipo de problema geralmente ocorre quando há mais de um vendedor, fábrica ou armazém para servir a mais de um cliente com o mesmo produto;
- *Pontos de origem e destino coincidentes*: Nesse tipo de problema, a viagem não é considerada completa até o retorno do veículo ao ponto de partida. Alguns exemplos desse tipo de problema são a entrega de bebidas em bares e restaurantes ou roteiros de transporte escolar.

Esse último tipo de problema, que envolve pontos de origem e destino coincidentes, é conhecido como “*o problema do caixeiro-viajante*” e numerosos métodos foram propostos para resolvê-lo no entanto, não é fácil encontrar o melhor roteiro para determinado problema quando há muitos pontos ou quando uma

solução rápida é necessária. O tempo de processamento nos computadores mais rápidos para os métodos de otimização tem sido, até o momento, insuficientes para resolver muitos desses problemas práticos. Soluções alternativas, baseadas em procedimentos cognitivos e/ou heurísticos têm apresentado bons resultados para tais problemas. Alguns desses princípios e procedimentos são listados abaixo (BALLOU, 2006):

- *Carregar caminhões com volumes destinados a paradas próximas entre si:* Essa medida visa minimizar o tráfego entre os pontos de parada e, conseqüentemente, o tempo total em trânsito nesse roteiro (Figura 2);

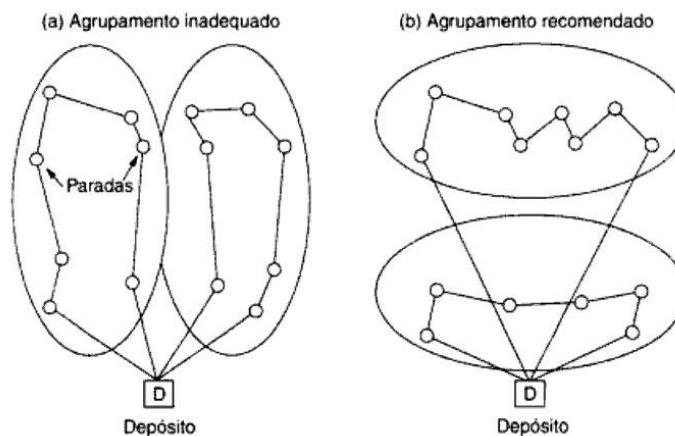


Figura 2: Agrupamento adequado de destinos de entrega.

Fonte: Balou (2006).

- *Paradas em dias diferentes devem ser combinadas para produzir agrupamentos concentrados:* Os segmentos diários programados devem evitar a superposição dos agrupamentos de paradas. Isso ajuda a minimizar o tempo total em trânsito nesse roteiro, como mostra a Figura 3, onde cada cor representa um dia da semana para entregas.

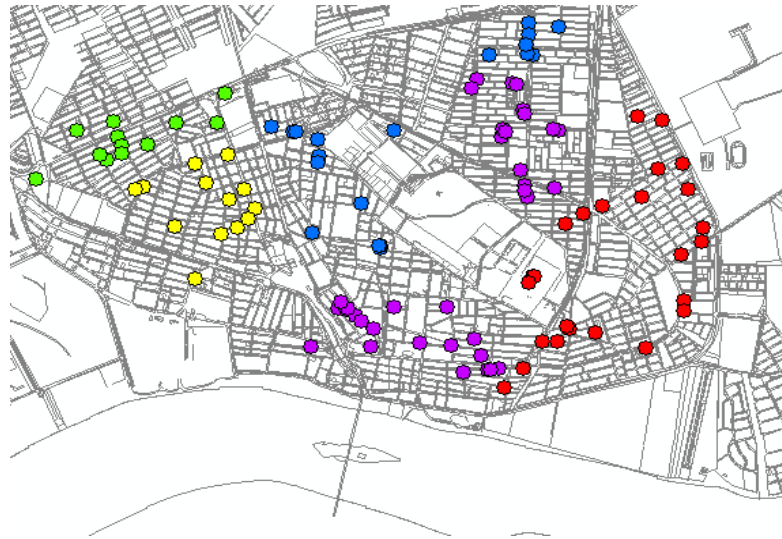


Figura 3: Segmentação de destinos de entrega por dia de visita em Petrolina-PE.

- *Começar os roteiros a partir da parada mais distante do depósito:* Roteiros eficientes são desenvolvidos pela elaboração de agrupamento de paradas mais distante do depósito, também pelo fato de paradas mais próximas ao depósito serem mais facilmente agrupadas por também apresentarem, distâncias menores entre si.
- *O sequenciamento das paradas num roteiro de caminhões deve ter a forma de lágrima:* As paradas devem ser sequenciadas de maneira a não ocorrer nenhuma superposição entre elas (Figura 4).

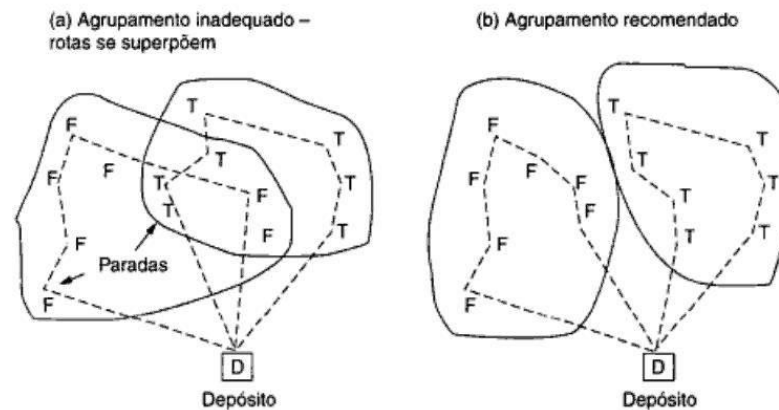


Figura 4: Exemplo de roteiro sobreposto (a) e recomendado (b) tendendo ao formato de lágrima.

Fonte: Balou (2006).

- *Os roteiros mais eficientes são aqueles que fazem uso dos maiores veículos disponíveis (desde que bem utilizada a capacidade do veículo):* No roteiro ideal, a utilização de um veículo com capacidade suficiente para abastecer todas as paradas de um roteiro minimizaria sempre a distância ou tempo total percorrido para servir todas as paradas.
- *A coleta deve ser combinada nas rotas de entrega em vez de reservada para o final dos roteiros:* As coletas deveriam ser feitas, tanto quanto possível, ao longo do andamento das entregas a fim de minimizar o número de superposições dos roteiros.
- *Uma parada removível de um agrupamento de rota é uma boa candidata a um meio alternativo de entrega:* Paradas isoladas dos agrupamentos dos pontos de entrega, especialmente aquelas de baixo volume, enquadram-se como clientes especiais e, geralmente, veículos de menor porte são capazes de atendê-los a custos menores – merecem, portanto, tratamento especial.
- *As pequenas janelas de tempo de paradas devem ser evitadas:* Janelas de tempo podem prejudicar drasticamente roteiros definidos segundo os preceitos acima listados e devem, portanto, ser negociadas com os clientes no sentido da máxima redução das janelas.

2.4.1 Métodos de Roteirização e Programação

Elaborar boas soluções para o problema da roteirização e programação de veículos torna-se cada vez mais difícil à medida que novas restrições são impostas (BALLOU, 2006). Algumas considerações práticas que acabam pesando sobre o projetos de roteiros são: Janelas de tempo, caminhões múltiplos com diferentes capacidades de peso e cubagem, tempo máximo de permanência ao volante de cada roteiro, velocidades máximas diferentes zonas, etc.

De posse de informações que compõem o quadro de restrições nos processos de roteirização como: capacidade de peso e volume dos caminhões, janelas de tempo para entrega, tamanho máximo do veículo de entrega no bolsão, etc., lança-se mão de métodos de criação de roteiros que aceitem tais restrições à medida que são inseridas. Balou (2006) e Novais (2004) apresentam dois métodos de criação de roteiros, dentre diversos métodos que envolvem modelos matemáticos relativamente complexos, são eles:

- Método da *varredura*;
- Método das *Economias* ou Método de *Clarke & Wright*;

O Método da varredura³, de acordo com Balou (2006), é simples a ponto de prestar-se a ser calculado a mão e quando operacionalizado em computador oferece resultados rápidos. O autor acrescenta ainda que, para uma variedade de problemas, seu índice médio de erro projetado é de 10%, valor aceitável levando-se em conta a velocidade de solução do método. No entanto, Novais (2004) alerta que o método deve ser utilizado com certo cuidado de forma a evitar distorções nos resultados.

O método das economias ou método de Clarke & Wright⁴ baseia-se no conceito de ganho. Uma situação muito ruim de entrega seria, por hipótese, aquela em que o veículo sai do CD carregado com a mercadoria destinada a um único

³ Mais informações em: BALLOU, R. H. Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física. 1ª. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

⁴ Mais informações em: NOVAES, A. G. Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

cliente. Nesse caso, a distância percorrida na entrega seria o somatório da distância no percurso de ida (CD – cliente) e no percurso de volta (cliente – CD). É claro que essa situação demandaria um número excessivo de veículos e, provavelmente, os veículos seriam subutilizados quanto à capacidade de peso e volume. Novais (2004) introduz o conceito de ganho ilustrado na situação, com atendimento de dois clientes i e j , onde o cliente j seja atendido logo após o cliente i . Seguindo essa ideia, o veículo faria o novo percurso do CD ao cliente i , logo após o cliente j e, por fim, o retorno ao CD, com uma economia de percurso ilustrada na Figura 5.

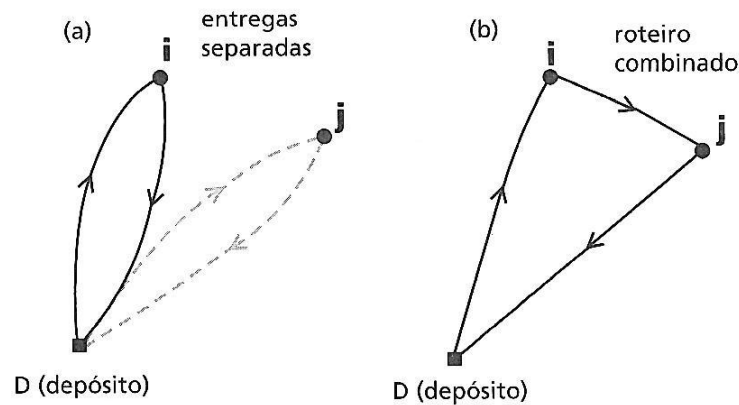


Figura 5: Ilustração do conceito de ganho com a integração de dois clientes em roteiro compartilhado.

Fonte: Novaes (2004).

Para atender os clientes na situação (a) a distância total (L) percorrida para as entregas dos clientes i e j seria:

$$L = 2 \times d_{D,i} + 2 \times d_{D,j}$$

Já na situação (b), onde os roteiros i e j foram combinados, o percurso total seria (L'):

$$L' = d_{D,i} + d_{i,j} + d_{D,j}$$

O ganho (g) em distância, nesse caso, seria:

$$g_{i,j} = L - L' = d_{D,i} + d_{D,j} - d_{i,j}$$

Com:

$d_{D,i}$ = distância do depósito ao cliente i

$d_{i,j}$ = distância do cliente i ao cliente j

$d_{D,j}$ = distância do depósito ao cliente j

O procedimento do método das economias baseia-se em combinar roteiros com maiores ganhos possíveis, sempre respeitando limites de peso e volume do veículo ao serem combinados dois ou mais roteiros.

A Tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens do método da varredura e do método das economias.

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens dos métodos de Construção de Roteiros.

	Varredura	Economias
Índice médio de erro projetado	10%	2%
	Vantagens	Desvantagens
Varredura	1. Tem potencial para decisões muito boas quando não existem restrições de tempo; 2. Rápida execução; 3. Simples; 4. Pode ser Operacionalizado manualmente.	1. Erro relativamente elevado; 2. Questões de tempo como a duração total da viagem e atribuição de janelas de tempo não são adequadamente tratadas.
Economias	1. Flexível para resolver uma ampla coleção de restrições práticas; 2. Relativamente rápido em termos computacionais; 3. Capaz de gerar soluções quase ótimas	1. Implementação mais complexa que o método da varredura; 2. Difícil de operar manualmente.

Fonte: Adaptado de Balou (2006) e Novaes (2004).

2.5 Fator de Circuito

Dada a importância dos sistemas logísticos integrados na dinâmica comercial, uma das áreas mais sensíveis desses sistemas, em termos de custos, trata-se do transporte e movimentação de mercadorias. Ainda, como abordado anteriormente, a atividade de roteirização de veículos representa um passo essencial em direção à eficiência e redução de custos com transporte e distribuição de mercadorias.

Nesse contexto, introduz-se o conceito de Fator de Circuito – FC ou coeficiente de correção de distâncias, importante para o equacionamento de

elementos como aqueles relacionados ao sistema de distribuição “um para muitos”, onde a distância percorrida em trechos urbanos costuma ser maior.

De acordo com Novaes (2004), o valor do Fator de Circuito, por ele designado como “ k ”, é determinado tomando-se uma amostra contendo uma série razoável de pares de pontos, cujas distâncias euclidianas e em rede devem ser calculadas. Através de procedimentos estatísticos, como a regressão, determina-se o valor de k . Acrescenta ainda que em artigos técnicos é comum atribuir para k o valor de 1,35, no entanto, o valor correto depende muito das condições da malha viária e de outros fatores. O autor recomenda ainda a determinação do valor do coeficiente para cada aplicação.

Há bastantes diferenças entre os fatores de circuito para as diferentes regiões do mundo, sendo necessária a determinação do coeficiente de correção de distâncias para cada região (BALLOU, RAHARDJA e SAKAI, 2001).

Quanto ao uso do Fator de Circuito em sistemas logísticos, Alvarenga e Novaes (2000) apresentam uma forma de aproximar a distância percorrida e o tempo de ciclo em sistemas de distribuição “um para muitos”. Para estimar a distância total percorrida dentro da zona de entrega utilizam:

$$dz = \alpha * k * \sqrt{A * q}$$

Onde:

dz = distância total percorrida dentro da zona (km);

A = área da zona em km²;

q = número de pontos visitados na zona;

α = coeficiente empírico (ajustado empiricamente por pesquisadores diversos);

k = coeficiente de correção que transforma a distância em linha reta (euclidiana) em distância real – Fator de Circuito.

Novaes (2004) utiliza metodologia semelhante para a aproximação da distância percorrida dentro do bolsão de entrega. Em um estudo realizado pelo autor, obteve-se um valor de “ k ” igual a 1,45 na cidade de São Paulo, numa área de 18,44 km².

Da mesma forma que as condições da malha viária são determinantes no cálculo do Fator de Circuito, por analogia, esse coeficiente guarda algumas

propriedades do sistema viário das cidades, podendo ser útil na identificação de alguns fatores como: a quantidade de opções de percursos entre pontos distintos da cidade (geralmente sendo inversamente proporcional ao valor do Fator de Circuito); além da diferença entre o Fator de Circuito calculado levando em consideração a restrição de vias de mão única ou não, que pode auxiliar na escolha do veículo de entrega em sistemas logísticos, considerando que regiões onde essa diferença é elevada possuem, geralmente, grande quantidade de vias de mão única. Nessas condições, veículos de menor capacidade, por serem mais ágeis, demonstram-se vantajosos⁵ em casos de entregas do tipo *delivery*.

O Fator de Circuito reflete condições da infraestrutura pública, que, principalmente no setor de transportes, pode ser utilizada como instrumento estratégico para atrair indústrias de outros países. Além disso, de acordo com Caixeta-Filho e Martins (2006), a eficiência do sistema logístico tornou-se condição básica para competitividade de todos os setores da economia. Os autores comentam ainda que a densidade de tráfego rodoviário, entre países tomando-se por base que o fluxo de mercadorias é, em grande parte, reflexo das possibilidades de produção de riquezas, pode servir de indicadores de desenvolvimento local.

2.6 Sistemas de Informações Geográficas - SIG

Sistemas de Informações Geográficas – SIG apresentam várias definições que variam de acordo com as áreas do conhecimento onde se aplicam. Miranda (2005) apresenta uma proposta de integração das definições comuns para SIG sob a forma de um sistema de computador que coleciona, edita, integra e analisa informação relacionada à superfície da terra. Esse conceito demonstra a estreita ligação entre SIG e sistemas computacionais, os quais constituem importantes ferramentas, tanto para a entrada ou coleta de informações, processamento e análise, assim como as saídas, sob a forma de mapas, banco de dados, programas específicos, etc.

⁵ Esse tipo de análise serve apenas como indicador de tendência. Exigindo análise rigorosa de outros fatores para o correto dimensionamento de frota.

Quanto às informações relacionadas à superfície da Terra, tal restrição auxilia na distinção entre SIG e outros sistemas de informação generalistas, definindo o escopo de estudo (MIRANDA, 2005).

Deluqui (2003) complementa que o SIG é uma tecnologia que oferece ferramenta operacional para auxiliar nos procedimentos de planejamento, gerência e de tomadas de decisão e que, por isso, vem sendo utilizado de forma cada vez mais promissora em diferentes áreas.

Sistemas de Informações Geográficas, no contexto brasileiro, surgiram a partir da necessidade de gerenciar dados espaciais, principalmente em órgãos do governo. A cobrança de impostos de propriedades rurais exemplifica a necessidade de monitoramento de informações geográficas, sem as quais, tarefas como essa se tornariam muito complexas, ainda mais se levando em conta a grande extensão do território nacional (MIRANDA, 2005). A evolução dos sistemas computacionais e do próprio conceito de Sistemas de Informações Geográficas ampliou o escopo de aplicação das ferramentas SIG, sendo hoje utilizadas, dentre outras áreas, no monitoramento e preservação ambiental, sistemas de transportes SIG-T e geoprocessamento. Oliveira (OLIVEIRA, 1997) segmenta as diversas aplicações dos SIG como segue:

- Ocupação Humana - redes de infraestrutura; planejamento e supervisão de limpeza urbana; cadastramento territorial urbano; mapeamento eleitoral; rede hospitalar; rede de ensino; controle epidemiológico; roteamento de veículos; planejamento urbano; sistema de informações turísticas; controle de tráfego aéreo; sistemas de cartografia náutica; serviços de atendimentos emergenciais.
- Uso da Terra - planejamento agropecuário; estocagem e escoamento da produção agrícola; classificação de solos; gerenciamento de bacias hidrográficas; planejamento de barragens; cadastramento de propriedades rurais; levantamento topográfico e planimétrico; mapeamento do uso da terra.
- Uso de Recursos Naturais - controle do extrativismo vegetal e mineral; classificação de poços petrolíferos; planejamento de gasodutos e oleodutos; distribuição de energia elétrica; identificação de mananciais; gerenciamento costeiro e marítimo.
- Meio ambiente - controle de queimadas; estudos de modificações climáticas;

- Acompanhamento de emissão e ação de poluentes; gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento.
- Atividades econômicas - planejamento de marketing; pesquisas socioeconômicas; distribuição de produtos e serviços; transporte de matéria-prima.

A grande variedade de aplicações possíveis para SIG justifica, em parte, a dificuldade em obter uma definição clara sobre o escopo dessa ferramenta. Outro ponto importante relaciona-se ao fato dos Sistemas de Informações Geográficas terem evoluído muito rapidamente nas últimas décadas, assim como suas aplicações.

Apesar da grande número de ferramentas e aplicações para o SIG, sua utilização nesse trabalho estará relacionada àquelas capazes de utilizar dados referentes às redes de transportes rodoviárias. A determinação do FC baseada em procedimentos estatísticos demanda informações que relacionem distâncias euclidianas e distâncias em rede. Além disso, a depender do procedimento utilizado, o número de informações necessárias pode ser bastante elevado. Nesse ponto, ferramentas como o SIG são de extrema importância, justificando a aplicação nesse tipo de estudo.

Sistemas de Informações Geográficas relacionados aos transportes oferecem, além de recursos visuais no tratamento de informações, o atrelamento de objetos a bancos de dados que guardam informações sobre tais objetos (Figura 6).

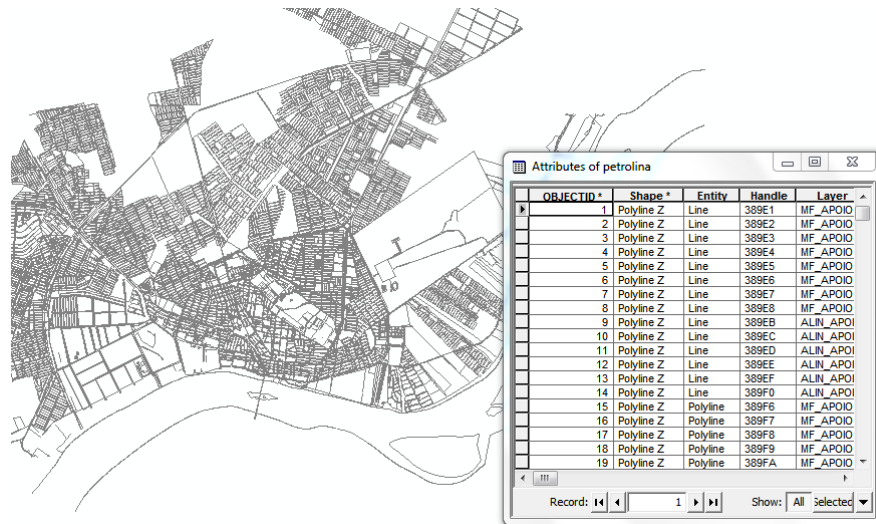


Figura 6: Exemplo de SIG: recursos visuais atrelados a banco de dados.

Fonte: Foto ArcGIS – ESRI®.

A Figura 6 exemplifica o uso de SIG em sistemas de transportes. Nela é apresentado um mapa urbano da cidade de Petrolina – PE composto de pequenos segmentos de reta que representam as vias de transporte rodoviário e, atrelado a ele, um banco de dados que guarda informações de cada um desses segmentos como: localização espacial, comprimento, altitude, etc.. Tais informações são essenciais para utilização/aplicação de algoritmos e heurísticas relacionados ao geoprocessamento como, por exemplo, a determinação de distâncias mínimas entre dois pontos quaisquer da rede.

Nesse trabalho foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento, com o objetivo de elaborar um perfil da rede rodoviária da cidade de Petrolina (mapa rodoviário ligado a banco de dados). Ainda, foram utilizadas ferramentas de SIG relacionadas ao transporte, onde o objetivo é determinar distâncias mínimas entre pontos localizados numa rede rodoviária, ou ainda, distâncias em linha reta para estes pontos. Tais ferramentas pressupõem a utilização de sistemas computacionais capazes de processar a grande quantidade de informações necessárias para o estudo.

2.7 A Cidade em Estudo

A cidade de Petrolina – PE localiza-se na região do Submédio São Francisco, interior do nordeste brasileiro a aproximadamente 9º de latitude Sul e 40º de longitude Oeste. Posicionamento geográfico e condições climáticas da região conferem baixos índices pluviométricos e temperaturas elevadas ao longo de todo o ano. A irrigação e exportação de culturas, principalmente frutas, tornou a cidade polo da frutivinicultura nacional, juntamente com a cidade de Juazeiro, município baiano vizinho. A economia é predominantemente agrícola, no entanto a cidade concentra o polo comercial da região do semiárido pernambucano (IBGE, 2010).

A cidade localiza-se na região Central do Nordeste brasileiro, é cortada pelas BR 407 e BR 128 com saídas para todas as capitais da Região. Além disso, o posicionamento geográfico da cidade a localiza a distâncias relativamente semelhantes entre as capitais dos estados do Nordeste, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Distâncias rodoviárias entre as Capitais Nordestinas e Petrolina PE.

<i>Cidade</i>	<i>Capital de:</i>	<i>Distância a Petrolina (km)</i>
Aracajú	Sergipe	460
Fortaleza	Ceará	830
João Pessoa	Paraíba	790
Maceió	Alagoas	700
Natal	Rio Grande do Norte	880
Recife	Pernambuco	710
Salvador	Bahia	520
São Luís	Maranhão	1050
Teresina	Piauí	620

A Tabela 3 demonstra que a cidade de Petrolina encontra-se a uma distância média de 760 km das nove capitais nordestinas e, excetuando-se São Luís capital do Maranhão, as distâncias entre as capitais são relativamente semelhantes. A BR 407 é uma rota alternativa à BR 101 para veículos que trafegam das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste em direção às capitais mais equatoriais do Nordeste. Esse posicionamento logístico estratégico é, em parte, responsável pela consolidação da Região Integrada de Desenvolvimento Econômico – RIDE, juntamente com a cidade baiana de Juazeiro.

Juazeiro e Petrolina concentram o polo econômico do semiárido Nordestino com mercado regional consumidor que supera 1.000.000 de habitantes (IBGE,

2010). Esse potencial mercado consumidor, a partir da década de 90, atraiu a instalação de indústrias, principalmente relacionadas ao agronegócio. Além disso, o número de empresas ligadas à logística de distribuição é crescente Tabela 4.

Tabela 4: Algumas empresas, ligadas à logística de distribuição, localizadas na RIDE Juazeiro - Petrolina⁶.

<i>Empresa</i>	<i>Localização</i>	<i>Ramo</i>
Alcance Atacado	Juazeiro	Alimentício
Compare	Petrolina	Alimentício
Globo Juazeiro	Juazeiro	Alimentício
Heltran	Petrolina	Encomendas
Joafra	Juazeiro	Transporte Urbano
Pajeú Nordeste	Petrolina	Alimentício
Remos	Petrolina	Transportadora
Rapidão Cometa	Petrolina	Transportadora
Revale	Juazeiro/Petrolina	Bebidas
Sucovale	Petrolina	Bebidas

A Tabela 4 apresenta alguns exemplos de empresas ligadas à logística de distribuição, sediadas ou com filiais na região de Juazeiro-Petrolina. A atuação dessas empresas ratifica a consolidação do mercado consumidor regional, além de revelar a necessidade comercial de informações a respeito da malha viária das cidades, uma vez que tais empresas lidam diretamente, em suas operações diárias, com essas variáveis.

2.8 Conclusão do capítulo

Esse capítulo permitiu maior entendimento sobre os conceitos teóricos que norteiam esse trabalho de fim de curso. Partiu-se de conceitos básicos de logística e de um levantamento histórico sobre comércio para destacar a importância das atividades de apoio ao processo produtivo, dentre elas a logística, na dinâmica comercial. Além disso, foi dada atenção especial a atividade de transporte de mercadorias, área bastante sensível quanto aos custos das operações logísticas, com destaque a roteirização e programação de veículos de entrega. Nesse ponto, foi

⁶ Não há, nessa lista, nenhum respeito à hierarquização por faturamento anual, localização ou quesitos do tipo. Essa lista contém empresas com representatividade local no ramo de transporte rodoviário e logística, organizadas em ordem alfabética.

apresentado o conceito de fator de circuito – FC para maior conhecimento de características da malha viária de cidades, ou como alternativa na atividade de roteirização de veículos e, conseqüentemente, redução dos custos logísticos totais em empresas de distribuição. As principais ferramentas necessárias a realização desse trabalho também foram discutidas, como Sistemas de Informações Geográficas e suas aplicações, além de comentários sobre as principais ferramentas matemáticas utilizadas.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo objetiva expor os procedimentos metodológicos aplicados na realização da pesquisa que baseia esse trabalho de fim de curso. O atendimento aos procedimentos aqui descritos, em condições adequadas, deve propiciar a reprodução dessa pesquisa em outras situações.

A fim de facilitar a identificação dos procedimentos adotados, objetivou-se classificar a pesquisa quanto à finalidade, à natureza e quanto aos objetivos, segundo as definições de (ANDRADE, 2009), (CERVO, 2002) e (GIL, 2002).

3.1 Finalidade da Pesquisa

Andrade (2009) distingue as várias finalidades de pesquisa em dois grupos: o primeiro reúne finalidades motivadas por razões de ordem intelectual e o segundo, por razões de ordem prática. No primeiro caso denomina-se pesquisa “pura” ou “fundamental”. No segundo caso, quando o objetivo é contribuir para solução de problemas de ordem prática, denomina-se pesquisa “aplicada”.

Tal distinção conceitual não implica que essas definições sejam mutuamente excludentes. Esse trabalho de fim de curso, por exemplo, fundamenta-se no objetivo pessoal de adquirir maior conhecimento sobre o tema em estudo, assumindo características de pesquisa “fundamental”. Além disso, procura contribuir para solução de problemas práticos, no caso, a determinação do Fator de Circuito para a Cidade de Petrolina, revelando características de pesquisa “aplicada” (CERVO, 2002).

3.2 Tipo e Natureza da Pesquisa

A definição de Andrade (2009) para a natureza da pesquisa fundamenta-se na distinção de objetivos de trabalhos científicos originais e resumos de assunto. Por trabalho científico original entende-se uma pesquisa realizada pela primeira vez, que

venha contribuir com novas conquistas e descobertas para evolução do conhecimento científico. Já os resumos de assunto caracterizam-se por dispensar a originalidade, mas não o rigor científico. Trata-se da pesquisa fundamentada em trabalhos mais avançados, publicados por autoridades no assunto. Em geral, os trabalhos acadêmicos, assim como esse trabalho de fim de curso, enquadram-se nesse último caso.

A pesquisa bibliográfica, orientada ao domínio do estado da arte do tema estudado, constitui parte da pesquisa exploratório desse estudo, além disso, caracteriza-se como o primeiro passo da pesquisa científica (ANDRADE, 2009).

Quanto ao procedimento, essa pesquisa é predominantemente experimental, manipulando variáveis a fins do estudo da relação entre causas e efeitos de determinado fenômeno. Cervo (2002) revela que esse tipo de pesquisa busca identificar de que modo ou por que causa o fenômeno é produzido. Uma característica básica desse procedimento científico é a necessidade de planejamento flexível para considerar os mais diferentes aspectos do problema (GIL, 2002).

3.3 Objetivos da Pesquisa

Andrade (2009) afirma que a pesquisa exploratória é o primeiro passo de todo trabalho científico. Dessa forma, a princípio, a pesquisa proposta assume caráter exploratório na medida em que objetiva maior familiaridade com o problema estudado, visando torná-lo mais explícito. No entanto, quando o objetivo desse trabalho centrar-se na definição da metodologia para determinação do Fator de Circuito, assumirá caráter explicativo utilizando como insumo a contribuição da pesquisa exploratória inicial. Dessa forma, objetiva-se minimizar a ocorrência de erros, já que o risco de cometê-los é elevado nesse tipo de pesquisa (GIL, 2002).

A validação do modelo de metodologia proposto dar-se-á por meio da investigação do estudo de caso para determinação do Fator de Circuito na cidade de Petrolina-PE.

3.4 Delineamento da Pesquisa

A sequência de procedimentos adotada na realização desse estudo é aqui discutida. O objetivo é expor o passo-a-passo seguido no laboratório para determinação do Fator de Circuito para a cidade de Petrolina.

3.4.1 *Software* Utilizado

A determinação do Fator de Circuito por meio de procedimentos estatísticos, como proposto nesse trabalho, depende da manipulação de alto volume de dados provenientes de Sistemas de Informações Geográficas, principalmente ligadas ao transporte – os chamados SIG-T. Dentre as principais ferramentas relacionadas aos SIG-T, utilizadas nesse trabalho, estão a identificação geográfica e determinação de distâncias relativas entre entidades de modelos gráficos que representam o perfil da rede rodoviária em estudo, nesse caso, o mapa rodoviário de Petrolina-PE

Optou-se por utilizar o *software* ArcGIS® 9, desenvolvido pela empresa *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). O ArcGIS® corresponde a um conjunto de *softwares* de ferramentas SIG que trabalha com base geográfica composta por entidades geométricas (pontos, linhas ou polígonos). Difere dos *softwares* de desenho assistido por computador (CAD), na medida em que um elemento gráfico como uma linha tem, por exemplo, além da representação visual, ligação a um banco de dados (Figura 7) capaz de guardar informações essenciais no uso de ferramentas SIG (como discutido no Capítulo 2).

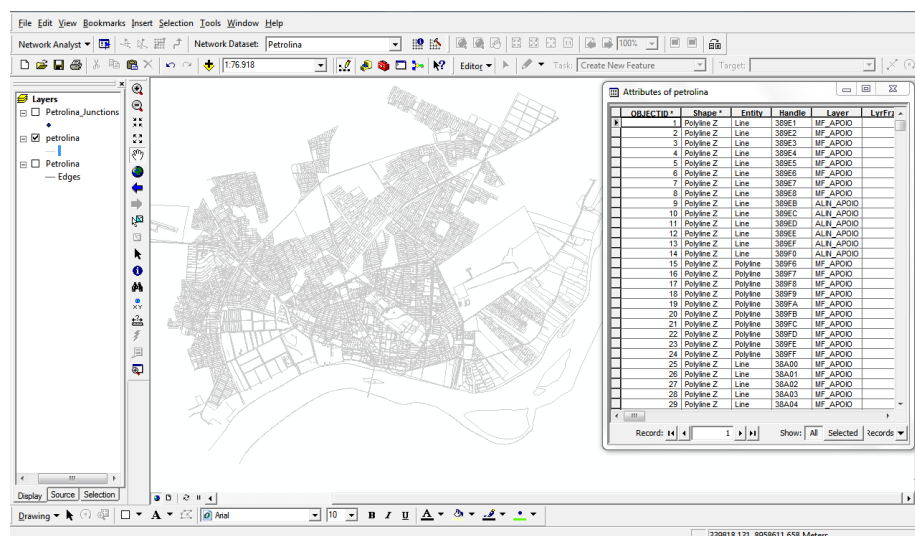


Figura 7: Interface do ArcGIS®: Mapa plano da cidade de Petrolina atrelado a banco de dados.

O *software* em questão oferece bons resultados na manipulação da base geográfica da malha viária de Petrolina, além disso, oferece ferramentas para o sorteio aleatório de pontos entre as entidades geométricas trabalhadas e na determinação de distâncias mínimas em rede e euclidianas entre essas entidades.

3.4.2 Construção da Rede Lógica da Cidade de Petrolina

Os Sistemas de Informações Geográficas, como abordado no capítulo 2, auxiliam na manipulação de informações de representações cartográficas, como mapas e plantas, seja por meio visual ou pelo trabalho com banco de dados. Para utilização de um mapa plano na determinação de distâncias entre pontos desse mapa, faz-se necessário que as entidades geométricas desenhadas contenham informações armazenadas a bancos de dados. Dessa forma, o primeiro passo desse trabalho foi a construção da chamada Rede Lógica da cidade de Petrolina, composta pela representação visual das vias urbanas da cidade, sendo cada entidade atrelada a um registro do banco de dados.

O insumo básico para a construção da rede foi um mapa plano da cidade, em formato CAD, adquirido junto à prefeitura da cidade. O mapa foi importado para o ArcGIS®, onde foi possível a construção da rede lógica. O processo de construção

da rede baseou-se na superposição de entidades, ou seja, cada linha do mapa importado foi reconstruída em novo formato.

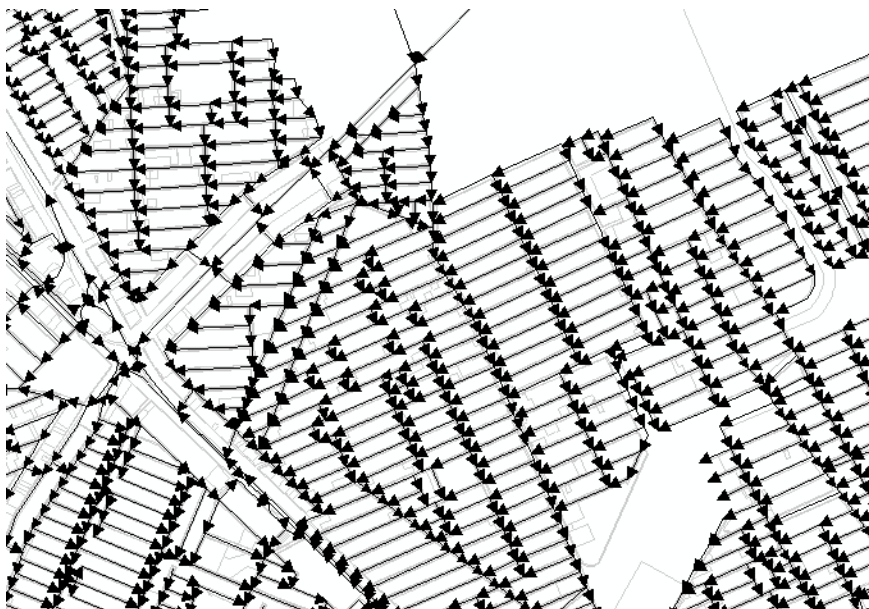


Figura 8: Construção da rede lógica a partir do mapa plano da cidade de Petrolina.

A Figura 8 ilustra o processo de construção da rede lógica que representa as vias rodoviárias da cidade de Petrolina. As setas compõem ruas, estradas e avenidas e foram criadas a partir do mapa plano da cidade contendo as quadras, praças e estradas. O processo de construção da rede lógica é manual e, quando um segmento de reta que representa uma via é criado no *software*, automaticamente é adicionado a um banco de dados um registro correspondente, capaz de guardar informações como: o nome da rua que representa, extensão, sentido de tráfego, velocidade de tráfego, conexão com outras entidades, etc..

A construção da rede lógica da cidade é um insumo básico para utilização das ferramentas dos Sistemas de Informações Geográficas. Além disso, a alimentação do banco de dados com informações consistentes é também muito importante. Em regiões do centro urbano, por exemplo, onde são comuns ruas e avenidas de sentido único de tráfego, tais informações devem ser cuidadosamente inseridas, garantindo assim o funcionamento consistente do *software*. No caso da definição do Fator de Circuito, a quantidade e a extensão das vias de sentido único podem influenciar de maneira relevante na relação entre as distâncias em rede e as distâncias euclidianas.

3.4.3 Sorteio Aleatório de Pontos na Rede

De posse da rede lógica construída, uma série de ferramentas SIG pode ser utilizada no *software*. Uma das mais simples, que, no entanto, exemplifica o poder dos *softwares* SIG em fornecer soluções aproximadas para problemas matemáticos complexos, é a determinação da menor distância em rede entre dois pontos, como ilustra a Figura 9.

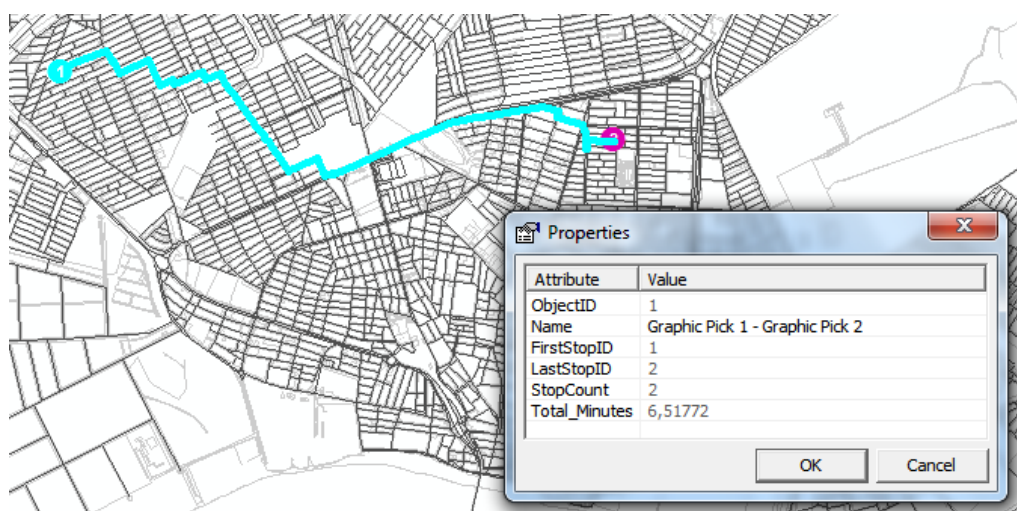


Figura 9: Determinação da menor distância em rede entre dois pontos quaisquer.

Outra ferramenta muito útil em análises que demandam quantidade elevada de informações estatisticamente confiáveis é a geração de pontos aleatórios na rede lógica. A escolha aleatória de pontos, com chances iguais de serem selecionados na rede lógica, garante que o valor ou equação encontrada para o Fator de Circuito represente toda a região geográfica em cujos pontos foram sorteados. Além disso, a utilização desse tipo de ferramenta facilita a manipulação de grande volume de dados, pois o número de pontos aleatórios sorteados pode variar desde algumas unidades até alguns milhares de pontos. A Figura 10 ilustra 100 pontos sorteados aleatoriamente sobre a área do mapa de Petrolina.



Figura 10: 100 pontos sorteados aleatoriamente na rede lógica da cidade de Petrolina.

Diante das possibilidades, foram realizados sorteios de quantidades diferentes de pontos para determinação do Fator de Circuito em cada situação, na tentativa de encontrar alguma relação entre o número de pontos sorteados e o valor ou equação encontrada para o fator de circuito. As quantidades de pontos sorteados foram: 10, 50, 100, 500 e 1000 pontos.

3.4.4 Distância Euclidiana e em Rede

De posse dos pontos sorteados aleatoriamente, o próximo passo foi determinar as distâncias euclidiana e em rede para posteriores análises. Ambas dependem de funções de fácil utilização do *software* empregado e representam os principais dados para determinação do Fator de Circuito. Para localizar os pontos sorteados diretamente na rede, o algoritmo do *software* projeta-os na entidade lógica da rede mais próxima do ponto (ver Figura 10).

As distâncias em rede, relativas entre os pontos, foram então determinadas e os valores encontrados foram exportados para arquivos de texto (.txt) para serem estatisticamente tratados utilizando planilhas eletrônicas e pacotes estatísticos.

Na determinação do Fator de Circuito, enquanto as distâncias em rede referem-se ao menor trajeto, pelas vias de tráfego, entre dois pontos, as distâncias

euclidianas referem-se à menor distância possível entre dois pontos. Em um plano, a distância euclidiana corresponde à distância em linha reta, no entanto, para distâncias maiores entre pontos localizados na superfície da Terra, devem-se considerar os efeitos da curvatura do planeta na determinação de distâncias mínimas. É fácil imaginar, por exemplo, que a distância entre Brasília e Londres não pode ser mensurada em linha reta. As fórmulas correspondentes para tais cálculos tratam da geometria espacial e são de difícil manipulação. Uma forma de calcular a distância entre dois pontos quaisquer da superfície da Terra, utilizando as referências de latitude e longitude, é a utilização da *fórmula do grande círculo* (equação abaixo) que leva em consideração a curvatura do planeta na determinação das distâncias.

$$\Delta\hat{\sigma} = \arctan\left(\frac{\sqrt{(\cos\phi_1 + \sin\Delta\lambda)^2 + (\cos\phi_2 \sin\phi_1 - \sin\phi_2 \cos\phi_1 \cos\Delta\lambda)^2}}{\sin\phi_2 \sin\phi_1 - \cos\phi_2 \cos\phi_1 \cos\Delta\lambda}\right)$$

Com:

$\Delta\hat{\sigma}$ – distância do grande círculo para dois pontos;

ϕ_1, λ_1 – as coordenadas de latitude e longitude do ponto 1;

ϕ_2, λ_2 – as coordenadas de latitude e longitude do ponto 2.

As variáveis de entrada para essa fórmula são apenas as coordenadas geográficas de latitude e longitude dos pontos cuja distância se deseja calcular. No entanto, pela quantidade de argumentos, percebe-se a dificuldade de operacionalizar um número grande de cálculos utilizando essa fórmula. Desse modo, os aplicativos que contém esse tipo de ferramenta, geralmente implementam heurísticas de aproximação para os cálculos de distâncias entre pontos, que são mais fáceis de calcular e apresentam resultados muito próximos aos obtidos utilizando a fórmula do grande círculo. Nesse trabalho, as distâncias em rede entre pontos foram obtidas por meio de ferramentas específicas do *software* utilizado.

As influências da curvatura da Terra na determinação de distâncias aumentam proporcionalmente a distância a ser mensurada, de modo que, para pequenas distâncias, inferiores a 20 km, as condições de relevo podem influenciar o cálculo da distância entre pontos de maneira mais relevante que a curvatura do planeta.

Quanto à determinação das distâncias euclidianas, o *software* utilizado não incorpora função específica para tanto, todavia, utilizou-se um procedimento indireto para esse cálculo. Através do *software*, foram geradas coordenadas cartesianas para cada ponto sorteado na rede (os mesmos cujas distâncias em rede foram determinadas). Tais coordenadas cartesianas derivam das coordenadas de latitude e longitude e do sistema de projeção utilizadas pelo *software* SIG, além disso, preservam a proporcionalidade de distâncias entre os pontos cujas coordenadas são convertidas em formato planisférico.

Dessa forma, foi acrescentada ao registro de cada ponto, no banco de dados, uma referência à sua coordenada X e outra à coordenada Y, formando o par (X, Y). O banco de dados foi então exportado para planilhas eletrônicas e, posteriormente, foram calculadas as distâncias euclidianas empregando a fórmula da distância mínima entre dois pontos em um plano, da geometria básica.

$$d_{a,b} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$$

Com

$d_{a,b}$ = distância mínima entre os pontos a e b

x_a, y_a = coordenadas do ponto a

x_b, y_b = coordenadas do ponto b

Seguidos tais procedimentos, todos os dados necessários para determinação do Fator de Circuito foram gerados: as distâncias em rede entre os pontos sorteados (determinadas no *software*) e as distâncias euclidianas, determinadas pela *fórmula da distância mínima entre pontos em um plano*.

3.4.5 Matrizes de Distâncias

A determinação do Fator de Circuito pela relação entre distâncias euclidiana e em rede pressupõe a organização dos dados gerados de maneira a facilitar a manipulação dos mesmos, principalmente quando o número de pontos sorteados na rede for elevado. O número de distâncias entre pontos cresce quadraticamente em relação ao número de pontos sorteados. Para 50 pontos, por exemplo, o número de

distâncias calculadas é de 2500. De maneira geral, para n pontos sorteados, a quantidade de distâncias calculadas é da ordem de n^2 .

O crescimento exponencial na quantidade de dados gerada pressupõe a necessidade de organizar os dados de maneira a facilitar a manipulação dos mesmos. Nesse ponto, lança-se mão da utilização de *matrizes de distâncias* ou *matrizes OD*, que contém na primeira linha e coluna a referência de cada ponto e as demais posições da matriz são preenchidas com a distância do ponto referido na linha ao ponto referido na coluna. Assim, na matriz, a posição M_{ij} é ocupada com o valor da distância do ponto i ao ponto j . A Figura 11 representa um exemplo de Matriz de distâncias, ou Matriz de Origens e Destinos, ou ainda, simplificada, Matriz OD.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
B	0,00	5,35	0,03	2,51	5,69	2,03	5,88	7,59	4,97	6,53	7,35
C	5,35	0,00	6,42	0,62	7,32	2,96	6,27	9,93	1,49	1,71	4,73
D	0,03	6,42	0,00	3,31	2,87	2,36	1,70	6,76	5,47	7,77	6,04
E	2,51	0,62	3,31	0,00	6,39	2,03	3,47	0,57	6,20	3,79	8,61
F	5,69	7,32	2,87	6,39	0,00	3,35	4,30	0,99	9,74	5,14	3,87
G	2,03	2,96	2,36	2,03	3,35	0,00	1,63	3,52	9,49	5,48	7,35
H	5,88	6,27	1,70	3,47	4,30	1,63	0,00	9,68	3,88	1,20	8,65
I	7,59	9,93	6,76	0,57	0,99	3,52	9,68	0,00	4,06	5,82	0,47
J	4,97	1,49	5,47	6,20	9,74	9,49	3,88	4,06	0,00	0,65	3,46
K	6,53	1,71	7,77	3,79	5,14	5,48	1,20	5,82	0,65	0,00	8,90
L	7,35	4,73	6,04	8,61	3,87	7,35	8,65	0,47	3,46	8,90	0,00

Figura 11: Exemplo de matriz de distâncias.

No caso da matriz conter a distância euclidiana entre os pontos (Figura 11), caracterizar-se-á como matriz simétrica com elementos da diagonal principal nulos, ou seja, pode ser desmembrada em duas matrizes triangulares, uma inferior e outra superior, que preservem a mesma relação numérica entre as respectivas linhas e colunas. De fato, a distância euclidiana entre os pontos D e K , por exemplo, é igual à distância euclidiana entre os pontos K e D .

No caso da Matriz OD conter distâncias em rede considerando os efeitos da mão de direção (vias de sentido único), a distância real de saída do ponto C e chegada ao ponto H pode ser diferente da distância de saída do ponto H e chegada ao ponto C , devido à impossibilidade de regresso em uma via de sentido único. Nesse tipo de caso, a Matriz OD não será simétrica.

A organização dos dados em matrizes facilita o tratamento das informações e o relacionamento entre distância euclidiana e em rede. Nesse sentido, uma terceira matriz pode ser criada contendo a razão entre as distâncias euclidianas e as distâncias em rede para cada ponto $M_{i,j}$. Essa matriz resultante é objeto do tratamento estatístico para definição do Fator de Circuito. Para a opção da determinação do Fator de Circuito sob a forma de um multiplicador “k” (número real), basta que se tome a média entre todos os elementos da matriz de razões entre distâncias euclidianas e em rede. Outra forma de aproximar distâncias reais pelas vias de tráfego às distâncias em linha reta é a determinação de uma equação que receba, como variável, a distância euclidiana entre os pontos e ofereça como resposta a distância em rede aproximada. Também nesse caso, a matriz de razões resultante é o insumo básico para o cálculo das regressões para determinação da equação desejada.

3.4.6 Tratamento Estatístico

De posse das informações de distâncias geradas no *software* e organizadas de forma conveniente, procede-se com o tratamento estatístico dos dados coletados auxiliado por planilhas eletrônicas. Uma série de estatísticas pode ser calculada, fornecendo insumos para escolha do melhor método de aproximação de distâncias euclidianas a distâncias em rede, seja ele por meio de um multiplicador geral, ou por uma equação de aproximação. Nos procedimentos estatísticos que necessitem da determinação de intervalo de confiança, serão sempre utilizados 95% ($\alpha=0,05$) de confiança para a média.

Dessa forma, para cada uma das quantidades de pontos definidas (10, 50, 100, 500 e 1000) foram determinadas as respectivas distâncias euclidianas entre os pontos, as distâncias em rede, além disso, as razões entre as distâncias. Com essas informações também foram determinadas as estatísticas: dispersão, desvio padrão e variância, assimetria, curtose e correlação.

3.4.7 Determinação do FC

Nesse trabalho o Fator de Circuito é caracterizado de duas formas. A primeira e mais simples é sob a forma de um número real que, multiplicado pela distância em linha reta, forneça um resultado aproximado da distância em rede. A outra maneira é a determinação de uma equação, de propósito semelhante, que receba como variável de entrada a distância euclidiana. A determinação do Fator de Circuito para cada situação tem metodologia distinta, como segue.

3.4.7.1 Fator de Circuito como um número real “k”

O Fator de Circuito sob a forma de um número real “k”, bastante empregado na literatura especializada devido à facilidade de utilização, pode ser obtido pela relação direta entre as distâncias euclidianas e em rede, entre os pontos, fornecidas pelo *software*. Para o caso de 10 pontos sorteados na rede, as 100 (ver seção 3.4.5) distâncias euclidianas calculadas foram divididas pelas respectivas distâncias em rede, gerando outra matriz contendo as razões entre as distâncias. A Figura 12 exemplifica a geração e operação com matrizes OD para determinação do Fator de Circuito sob a forma de um multiplicador.

	1	2	3	4	5
1	0,00	0,96	0,68	0,25	0,99
2	0,96	0,00	0,21	0,06	0,14
3	0,68	0,21	0,00	0,90	0,71
4	0,25	0,06	0,90	0,00	0,52
5	0,99	0,14	0,71	0,52	0,00

(a)

	1	2	3	4	5
1	0,00	1,25	0,85	0,30	1,38
2	1,15	0,00	0,30	0,07	0,17
3	0,87	0,26	0,00	0,99	0,77
4	0,33	0,07	1,27	0,00	0,67
5	1,33	0,19	0,91	0,68	0,00

(b)

	1	2	3	4	5
1	0,00	1,30	1,25	1,20	1,40
2	1,20	0,00	1,40	1,25	1,20
3	1,28	1,23	0,00	1,10	1,08
4	1,33	1,25	1,41	0,00	1,30
5	1,35	1,32	1,28	1,31	0,00

(c)

Figura 12: Exemplos de Matrizes OD. (a) Distâncias euclidianas, (b) Distâncias em rede e (c) Razão entre as respectivas distâncias em rede e euclidianas.

No exemplo da Figura 12, as matrizes OD são elaboradas para as distâncias relativas entre 5 pontos (linhas e colunas destacadas). Assumindo a hipótese de os 5⁷ pontos sorteados estarem uniformemente distribuídos na região onde se pretende calcular o Fator de Circuito, a média simples das razões entre as distâncias fornece uma boa aproximação para o FC. Nesse caso, aplicada a média simples para os 25 valores de razões encontrados (excetuando-se os 5 valores onde os pontos de origem e destino são coincidentes – diagonal principal da matriz) obtém-se: 1,272 que poderia ser assumido como o Fator de Circuito para esse caso.

A Figura 13 apresenta uma comparação entre as distâncias em rede fornecidas pelo *software* (b) e as distâncias em rede aproximadas com a utilização do Fator de Circuito multiplicador $k=1,272$ (c), dadas as distâncias euclidianas na matriz (a). Observa-se que, mesmo a título de exemplo e com número reduzido de pontos, os valores obtidos na matriz (c) aproximados, são próximos aos da matriz (b) reais.

7 Os cinco pontos citados servem apenas para ilustrar a determinação do Fator de Circuito sob a forma de um multiplicador. Estatisticamente, cinco pontos é um número reduzido que não inspira confiança na inferência das observações.

	1	2	3	4	5
1	0,00	0,96	0,68	0,25	0,99
2	0,96	0,00	0,21	0,06	0,14
3	0,68	0,21	0,00	0,90	0,71
4	0,25	0,06	0,90	0,00	0,52
5	0,99	0,14	0,71	0,52	0,00

(a)

	1	2	3	4	5
1	0,00	1,25	0,85	0,30	1,38
2	1,15	0,00	0,30	0,07	0,17
3	0,87	0,26	0,00	0,99	0,77
4	0,33	0,07	1,27	0,00	0,67
5	1,33	0,19	0,91	0,68	0,00

(b)

	1	2	3	4	5
1	0,00	1,22	0,87	0,32	1,25
2	1,22	0,00	0,27	0,08	0,18
3	0,87	0,27	0,00	1,15	0,91
4	0,32	0,08	1,15	0,00	0,66
5	1,25	0,18	0,91	0,66	0,00

(c)

Figura 13: Comparação entre distância em rede calculada no software (b) e distância em rede aproximada pelo Fator de Circuito $k = 1,272$ (c).

O exemplo anterior ilustra o processo de determinação do Fator de Circuito sob a forma de um multiplicador. Os procedimentos descritos no exemplo foram utilizados para determinar o Fator de Circuito para 10, 50, 100, 500 e 1000 pontos, diferenciando apenas na quantidade de dados trabalhada, devido ao crescimento exponencial do número de distâncias em relação ao número de pontos, já abordado na seção 3.4.5.

3.4.7.2 Fator de Circuito sob a forma de uma equação matemática

Outra forma de representação do Fator de Circuito é a definição de uma equação matemática que receba como variável a distância euclidiana e retorne um valor aproximado para distância em rede. Uma equação desse tipo pode ser obtida por meio da técnica da regressão matemática. As técnicas de regressão mais comuns são, a Simples e Linear e Simples e Não-Linear. A regressão simples e linear fornece como resposta uma equação de reta de manipulação relativamente simples. Em contrapartida, regressões simples não-lineares fornecem equações mais complexas como função exponencial ou equação parabólica, no entanto, podem representar a relação entre as variáveis em estudo de maneira mais fidedigna. A utilização de uma das técnicas depende da necessidade de precisão matemática requerida e ainda da disponibilidade de tempo e recursos de

processamento de dados para cálculos mais complexos. Em geral, quanto maior a precisão desejada, maior a complexidade dos cálculos realizados.

Na determinação do Fator de Circuito sob a forma de uma equação, optou-se por utilizar a regressão linear simples, pelo fato principal de fornecer uma equação de utilização mais fácil, condizente com a aplicabilidade prática e recorrente do Fator de Circuito.

As informações básicas para os cálculos da regressão matemática foram também retiradas das matrizes de distâncias euclidianas e em rede. E, nesse caso, quanto maior a quantidade de pares de pontos disponíveis, melhores são os resultados esperados na regressão.

A representação do Fator de Circuito sob a forma de uma equação resultante de uma regressão linear simples é da forma:

$$Y = aX + b$$

Com

Y = Variável que se deseja calcular (distância em rede);

X = Variável de entrada (distância euclidiana);

a = coeficiente angular da reta;

b = coeficiente linear da reta ajustada.

Uma das maneiras mais recorrentes para determinar os coeficientes numa regressão linear simples consiste no emprego das técnicas do *Método dos Mínimos Quadrados* - MMQ⁸. A determinação dos parâmetros pelo MMQ, que objetiva a minimização do erro quadrático médio entre a reta ajustada e o conjunto de pares de dados de entrada, pode ser determinada com auxílio das chamadas *equações normais*⁹:

$$\sum Y = nb + a \sum X \quad (I)$$

$$\sum XY = b \sum X + a \sum X^2 \quad (II)$$

⁸ Mais informações sobre o *Método dos Mínimos Quadrados* – MMQ em (MONTGOMERY, RUNGER e NORMA, 2004).

⁹ Para efeito de simplificação, o índice *i* foi omitido das equações normais, como apresentadas em (MOREIRA, 2008).

O exemplo abaixo demonstra a determinação da reta ajustada, que representa o Fator de Circuito. A título de ilustração, será utilizado um número reduzido de pares de pontos.

Para um conjunto de pares de distâncias em rede e euclidianas, coletadas no *software*, fornecido na Tabela 5:

Tabela 5: Pares de distâncias hipotéticas para ilustrar a regressão linear.

<i>Distância Euclidiana</i>	120	85	72	27	133
<i>Distância Em Rede</i>	154	98	96	35	174

Com os pares de dados fornecidos elabora-se outra tabela para determinar os parâmetros das *equações normais* (I) e (II):

Tabela 6: Parâmetros para solução das *equações normais*.

Cálculo das Somas			
X	Y	XY	X ²
120	154	18432	14400
85	98	8309	7225
72	96	6947	5184
270	35	948	729
133	174	23173	17689
437	557	57808	45227
$\sum X$	$\sum Y$	$\sum XY$	$\sum X^2$

Substituindo os dados da Tabela 6 nas equações (I) e (II) obtêm-se:

$$557 = 5b + 437a$$

$$57808 = 437b + 45227a$$

Resolvendo o sistema de equações lineares, os valores obtidos para os parâmetros a e b são:

$$b = -2,022$$

$$a = 1,298$$

A equação de reta que melhor representa a relação entre os cinco pares de dados fornecidos é:

$$Y = -2,022 + 1,298X \quad (\text{III})$$

A Tabela 7 apresenta uma comparação entre as distâncias em rede, fornecidas pelo *software* e as respectivas distâncias aproximadas, com auxílio da equação de regressão, recebendo como dados de entrada as distâncias euclidianas. Observa-se que, mesmo para um número reduzido de pares de pontos, os valores encontrados são próximos aos reais.

Tabela 7: Comparativo entre a distância em rede fornecida pelo *software* e a distância aproximada pela equação de regressão.

<i>Distância Euclidiana</i>	27	72	85	120	133
<i>Distância Em Rede</i>	35	96	98	154	174
<i>Distância Aproximada</i>	33,02	91,43	108,31	153,74	170,61

A equação (III) encontrada pode ser utilizada para determinar valores aproximados de distâncias em rede, dados outros valores de distâncias euclidianas. Caso, por exemplo, deseje-se aproximar a distância em rede, nas mesmas condições viárias do exemplo acima, dada uma distância euclidiana de 130, basta substituir esse último valor na variável X da equação (III). O valor aproximado para distância em rede, nesse caso, é 166,72.

Muito embora os procedimentos acima descritos sejam simples, com o crescimento no número de dados de entrada, fica cada vez mais difícil determinar as equações de regressão utilizando procedimento semelhante às tabelas do exemplo acima. O exemplo de regressão apresentado, utilizando o *Método dos Mínimos Quadrados*, utiliza apenas 5 pares de dados como entrada, todavia, na determinação do Fator de Circuito para 500 pontos sorteados na rede, o número de pares de dados a serem tratados é de 250.000, dificultando a determinação manual

das estatísticas de $\sum X$, $\sum Y$, $\sum XY$ e $\sum X^2$. Nesse ponto, lança-se mão de pacotes estatísticos que fornecem ferramentas de análises capazes de tratar grande quantidade de dados de entrada.

As estatísticas necessárias à determinação do Fator de Circuito propostas nesse trabalho são encontradas na maioria dos *softwares* estatísticos disponíveis. No entanto, alguns pacotes são restritos quanto à capacidade de dados de entrada, não suportando quantidades muito elevadas de dados, como no caso da determinação do Fator de Circuito com sorteio de 1000 pontos na rede, gerando 1.000.000 de pares de distâncias a serem analisadas.

Nesse trabalho optou-se por utilizar o SPSS 17.0 (*Statistical Package for the Social Sciences*), pacote de *software* estatístico bastante utilizado em Ciências Sociais que, entretanto, oferece ferramentas poderosas que podem ser empregadas em outras áreas do conhecimento. Segundo Maroco (2003), o SPSS é produzido e comercializado pela SPSS Inc., uma companhia norte-americana formada especificamente para produzir programas de análises estatísticas para ciências sociais. O autor complementa ainda que, apesar da vocação para que fora projetado, o *software* é utilizado com bastante sucesso nas ciências exatas. A opção pelo SPSS para as análises estatísticas propostas nesse trabalho deve-se ainda pela capacidade de tratamento de grande quantidade de dados e pela facilidade de geração das estatísticas propostas como: regressão, correlação, curtose, além de gráficos de dispersão e histogramas.

A opção pela utilização de um ou outro *software* estatístico, assim como o *software* SIG empregado, não revela dependência do estudo proposto a qualquer uma dessas ferramentas. Procedimentos alternativos de geração e análise de dados, desde que, preservem as especificações propostas na metodologia desse trabalho, devem produzir resultados semelhantes.

3.5 Conclusão do Capítulo

Esse capítulo apresentou os procedimentos metodológicos adotados na execução das principais etapas da pesquisa que fundamenta esse trabalho de fim de curso. Foram realizadas algumas abordagens a conceitos matemáticos e

estatísticos, sem a profundidade necessária para tornar o texto enfadonho e também motivado pela atenção aos objetivos desse trabalho.

Foi apresentado o *software* utilizado para geração e manipulação de dados nessa pesquisa, no entanto, os procedimentos aqui descritos foram feitos de forma a não caracterizar dependência a uma única ferramenta para realização de estudos semelhantes, sendo possível a utilização de outros *softwares* SIG, com funcionalidades semelhantes, para geração de dados. A descrição dos procedimentos de determinação do Fator de Circuito, seja por meio de uma equação ou por um número real, também permite a utilização de procedimentos alternativos, a depender das ferramentas disponíveis para replicação do estudo.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados alcançados nessa pesquisa, assim como, comentários relacionados. Apresenta-se também o Fator de Circuito para a cidade de Petrolina e considerações sobre sua utilização sob a forma de um número real multiplicador e/ou equação matemática.

4.1 Tratamento e Análise de Dados

Executados os procedimentos metodológicos para determinação das matrizes OD contendo dados referentes a distâncias euclidianas e em rede – principais insumos para as análises de resultados necessárias para definição do Fator de Circuito – procedeu-se com investigações baseadas em procedimentos estatísticos no tratamento dos dados gerados.

Uma das principais definições que se tem interesse na determinação do Fator de Circuito pela análise correlacionada entre distâncias euclidianas e em rede – e que se configura como fator preponderante ao resultado obtido na análise – é a quantidade de pontos adotada para geração das matrizes de distâncias e posteriores análises estatísticas. Apesar de não caracterizar um dos objetivos básicos dessa pesquisa, procurou-se identificar alguma relação entre a quantidade de pontos sorteada na rede e o valor obtido para o Fator de Circuito. As quantidades de pontos sorteadas ficaram dentro do intervalo de 10 a 1000 pontos, como definido na metodologia, seguindo a sequência¹⁰: 10, 50, 100, 500 e 1000 pontos.

A escolha do limite inferior desse intervalo (10 pontos) justifica-se pelo objetivo de definir uma quantidade mínima de pontos em que já fosse possível identificar relações entre distância euclidiana e em rede. Estatisticamente, trata-se de uma quantidade muito pequena de pontos, em vista o amplo espectro de possibilidades de sorteios aleatórios na área urbana da cidade de Petrolina (aproximadamente 50 km²), representada no mapa, inspirando pouca confiança para

¹⁰ A sequência foi definida por conveniência para representar o intervalo de valores para o número de pontos sorteados.

etapa de inferência estatística. Vale lembrar que, para 10 pontos sorteados, obtêm-se 100 valores de distância em rede e outros 100 valores de distâncias euclidianas para serem analisados. Quanto ao limite superior do intervalo (1.000 pontos), foi adotado devido a restrições na capacidade de processamento das informações geradas, uma vez que, para essa quantidade de pontos, obtêm-se 1.000.000 de valores de distâncias em rede, assim como, 1.000.000 de distâncias euclidianas para serem analisadas. Além disso, ao longo desse capítulo será possível observar que o valor obtido para o Fator de Circuito varia discretamente em relação ao número de distâncias geradas de 500 para 1000 pontos, em compensação, o número de distâncias geradas é, respectivamente, quatro vezes maior. Ao longo do capítulo serão também apresentadas algumas comparações entre os valores obtidos para o Fator de Circuito em relação à quantidade de pontos sorteada.

4.2 Fator de Circuito para 10 Pontos Sorteados

4.2.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 10 Pontos Sorteados

As estatísticas encontradas para o Fator de Circuito com 10 pontos sorteados na rede apontam que, em média, as distâncias em rede são 25,7% maiores que as respectivas distâncias euclidianas, ou seja, para o conjunto de valores gerado, o Fator de Circuito sob a forma de um número real seria definido como:

$$k = 1,257$$

Significando que, desconsiderando a mão de direção das vias de tráfego, locais geograficamente espaçados em 1.000 m, por exemplo, devem apresentar, aproximadamente, 1.257 m de distância pelas vias de tráfego.

A Figura 14 apresenta os 10 pontos sorteados aleatoriamente na área delimitada pelo mapa de Petrolina. Observa-se que, mesmo para uma pequena

quantidade de pontos, os mesmos apresentam-se, geograficamente, bem espaçados.



Figura 14: Distribuição espacial dos 10 pontos sorteados aleatoriamente na rede.

Quanto às distâncias entre os pontos calculadas, a matriz de razão, contendo o resultado da divisão entre a distância em rede e a respectiva distância euclidiana em cada célula, apresenta dados representados pelo gráfico de dispersão mostrado na Figura 15. No gráfico, o eixo das abscissas (eixo X) representa as distâncias euclidianas enquanto o eixo das ordenadas (eixo Y) representa as distâncias em rede.

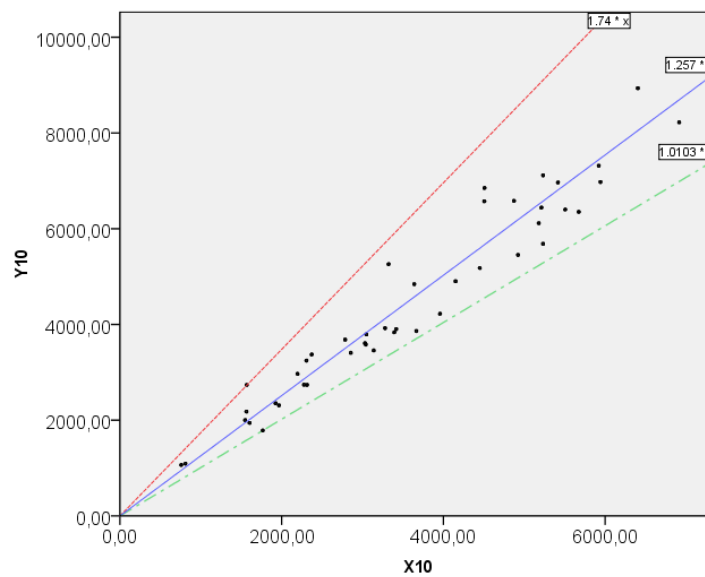


Figura 15: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas dos 10 pontos sorteados na rede.

As três retas apresentadas no gráfico relacionam as distâncias em rede e euclidianas de maneira diferentes. Enquanto a reta vermelha, de tracejado simples e contínuo, cerca os dados na parte superior, ou seja, apresenta a relação de maior razão entre as distâncias em rede euclidianas ($y = 1,74x$), a reta verde, de duplo tracejado, cerca os dados na parte inferior, ou seja, representa a menor razão encontrada para as respectivas distâncias ($y = 1,010x$). Já a reta contínua azul representa a média dos valores encontrados, ou seja, o valor encontrado para o Fator de Circuito ($y = 1,257x$).

A representação dos dados via diagrama de caixa (*gráfico box plot*) é apresentada na Figura 16.

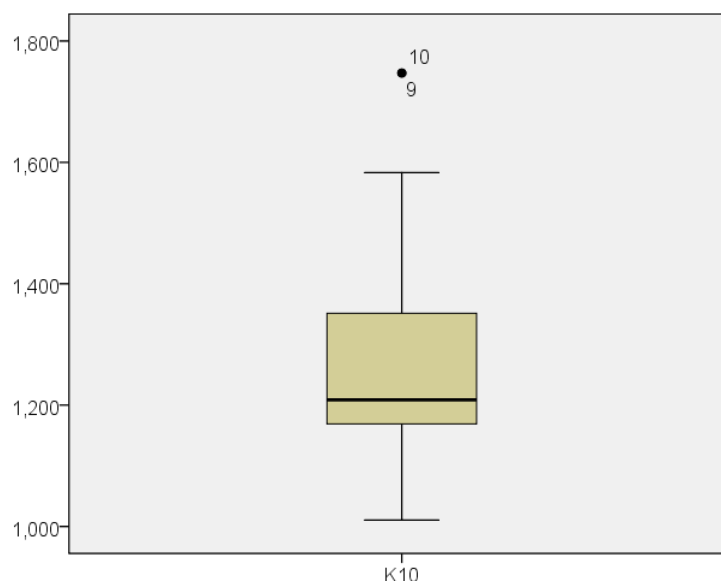


Figura 16: Gráfico *Box Plot* para os resultados da razão entre as distâncias em rede e euclidianas calculadas entre os 10 pontos sorteados.

Observa-se, no diagrama de caixa, que dois pontos ficaram acima do limite superior do gráfico, representando valores que se distanciam, demasiadamente, do conjunto, os chamados *outliers*. Esses pontos apresentaram razão entre a distância em rede e a euclidiana superior a 1,75.

No cômputo das estatísticas para as distâncias calculadas, foram excluídas aquelas em que os pontos de origem e destino eram coincidentes (cujas distâncias em rede e euclidianas são zero), evitando assim distorções para baixo no valor do Fator de Circuito.

Os valores que fundamentam o diagrama de caixa são apresentados na Tabela 8. As estatísticas indicam que, mesmo um número pequeno de pontos sorteados, o valor da variância é baixo, indicando que os valores encontram-se pouco afastados da média. Além disso, o coeficiente de assimetria indica que os valores encontram-se enviesados à direita da média, ou seja, apresentam assimetria positiva, significando que existe uma quantidade maior de valores superando 1,2572, característica também perceptível no diagrama de caixa da Figura 16.

Tabela 8: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias em rede e euclidianas calculadas entre os 10 pontos sorteados.

<i>Estatísticas para 10 Pontos Sorteados na Rede</i>		
	Estatísticas	Erro Padrão
Média	1,2572	0,0157
Mediana	1,2086	
Variância	0,0220	
Desvio Padrão	0,1482	
Mínimo	1,0104	
Máximo	1,7472	
Intervalo entre quartis	0,1851	0,2570
Assimetria	1,0440	

4.2.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 10 Pontos Sorteados

A Tabela 9 apresenta o resultado da regressão matemática com os pares de pontos (X,Y), sendo a variável X representada pela distância euclidiana e a variável Y representada pela distância em rede.

Tabela 9: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 10 pontos sorteados.

	Valor	Erro Padrão
Constante	126,656	131,672
Coefficiente a	1,208	0,034

A regressão foi feita recebendo como entrada de dados os pares de distâncias entre pontos (distância euclidiana, distância em rede), excetuando-se os valores cujos pontos de origem e destino eram coincidentes, assim como foi feito na determinação do multiplicador “k”. Os coeficientes calculados fornecem uma equação linear do tipo:

$$Y = 1,208X + 126,66$$

Com

Y = Distância em rede

X = Distância euclidiana

O coeficiente de correlação entre as variáveis em estudo foi: $r = 0,968$, indicando que as distâncias em rede têm relação muito próxima às distâncias euclidianas, uma vez que, o valor obtido para o coeficiente de correlação é próximo de 1.

Utilizando a equação gerada para converter 1.000m (como feito para o multiplicador “k”) de distância euclidiana obtêm-se, aproximadamente, 1.335 de distância em rede.

A Tabela 9 apresenta o Erro Padrão da constante de regressão. Observa-se que o erro é elevado, indicando que as aproximações, utilizando a equação gerada não são muito confiáveis. Vale lembrar que as estatísticas foram calculadas para os pares de distâncias de apenas 10 pontos sorteados na rede. A Tabela 10 apresenta o comparativo da utilização do multiplicador “k” e da equação na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede.

Tabela 10: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 10 pontos sorteados).

<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Distância em rede utilizando o multiplicador “k”</i>	<i>Distância em rede utilizando a equação de regressão</i>	<i>Diferença (k – Eq.)</i>
500	629	731	-102
1000	1258	1335	-77
2000	2515	2543	-28
4000	5029	4959	70
8000	10058	9791	267

Observa-se que para distâncias inferiores a 2590m, a aproximação da distância em rede utilizando a equação fornece respostas (distância em rede) superiores quando comparados aos obtidos através da aproximação utilizando o coeficiente “k”, revelando o peso da constante no cômputo da distância de rede. Para distâncias superiores a 2590 m, o cenário é invertido e as aproximações utilizando o multiplicador geram resultados maiores que aquelas feitas com uso da equação, uma vez que, quando a distância a ser convertida cresce o valor da

constante na equação de regressão vai tornando-se, proporcionalmente, menos oneroso.

4.3 Fator de Circuito para 50 Pontos Sorteados

4.3.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 50 Pontos Sorteados

Para 50 pontos sorteados na rede o número de distâncias a determinado é de 50×50 ou 2500 distâncias em rede e outras 2500 distâncias euclidianas. A Figura 17 apresenta a distribuição espacial dos 50 pontos sorteados aleatoriamente. Em comparação à Figura 14, que apresenta 10 pontos sorteados, observa-se maior dispersão e melhor cobertura territorial do mapa de Petrolina.



Figura 17: Distribuição espacial dos 50 pontos sorteados aleatoriamente na rede.

Em média, as distâncias em rede apresentaram-se 29,6% maiores que as respectivas distâncias euclidianas, significando que, utilizando esses dados para definir um coeficiente multiplicador como Fator de Circuito, o resultado obtido é:

$$k = 1,296$$

Em relação ao “k” calculado para 10 pontos observou-se um acréscimo percentual no valor do coeficiente calculado da ordem de 3,11%, em contrapartida, o número de distâncias tratadas estatisticamente cresceu 25 vezes, devido ao crescimento exponencial do número de distâncias calculadas em relação ao número de pontos sorteados.

A média das razões foi calculada, assim como no exemplo para 10 pontos, excetuando-se os valores de distâncias iguais à zero, em que um mesmo ponto era origem e também destino em uma rota.

O diagrama de dispersão X,Y, apresentado na Figura 18, demonstra o quanto as razões entre as distâncias observadas estão distantes da média.

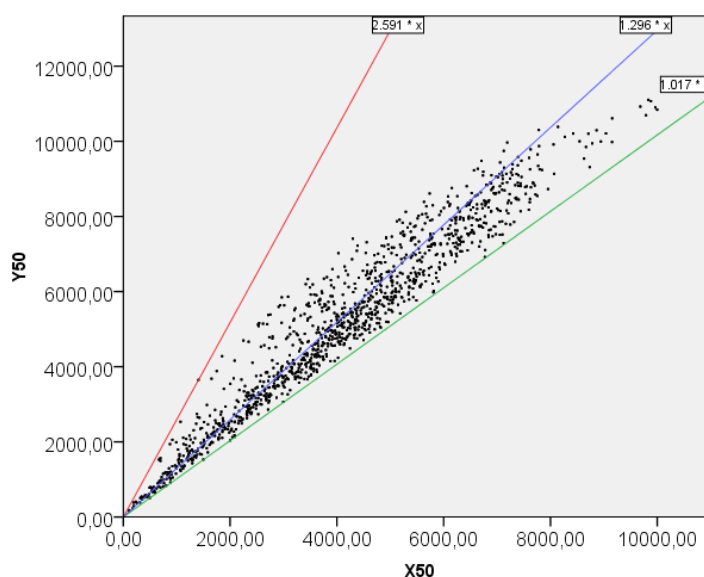


Figura 18: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 50 pontos sorteados na rede.

Observa-se no gráfico que as razões entre as distâncias estão cercadas à cima pela reta $y = 2,591x$ e abaixo por $y = 1,017x$, significando que a maior e a menor razão entre as distâncias encontradas foram, respectivamente, 2,591 e 1,017. Nesse gráfico é possível observar também que, os valores abaixo da média, representados pela reta contínua azul, os valores estão menos dispersos.

A Figura 19 apresenta o diagrama de caixa para as razões de distâncias calculadas. Devido à quantidade e distribuição dos pontos, o número de *outliers*, ou discrepâncias observadas foi elevado e 138 observações superaram o limite superior do gráfico definido como 1,65. Dessa forma, o diagrama de caixa fica com a configuração demonstrada na Figura 19.

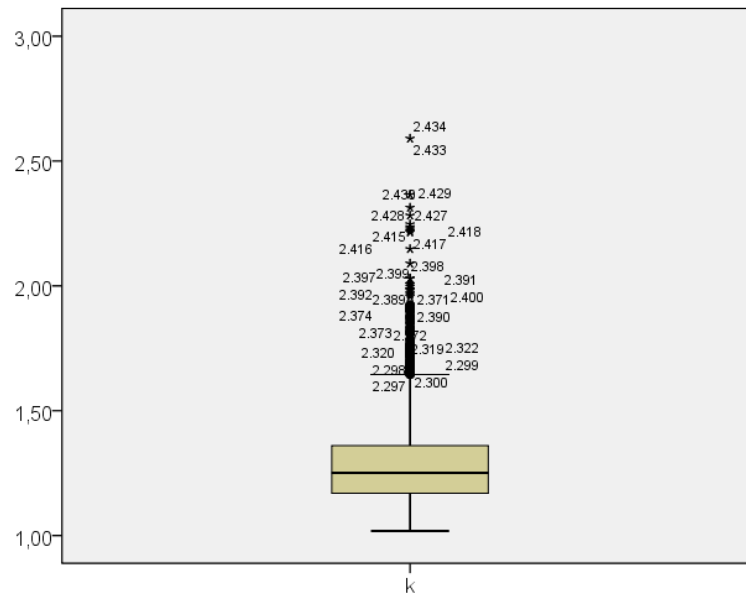


Figura 19: Gráfico *Box Plot* para as razões entre distâncias calculadas para 50 pontos sorteados.

O histograma apresentado na Figura 20 demonstra o perfil da distribuição das razões em torno da média. A tendência é que os diagramas de caixa para as observações de 100, 500 e 100 pontos apresentem configuração semelhante ao observado para 50 pontos, uma vez que a quantidade de distâncias calculadas só tende a aumentar.

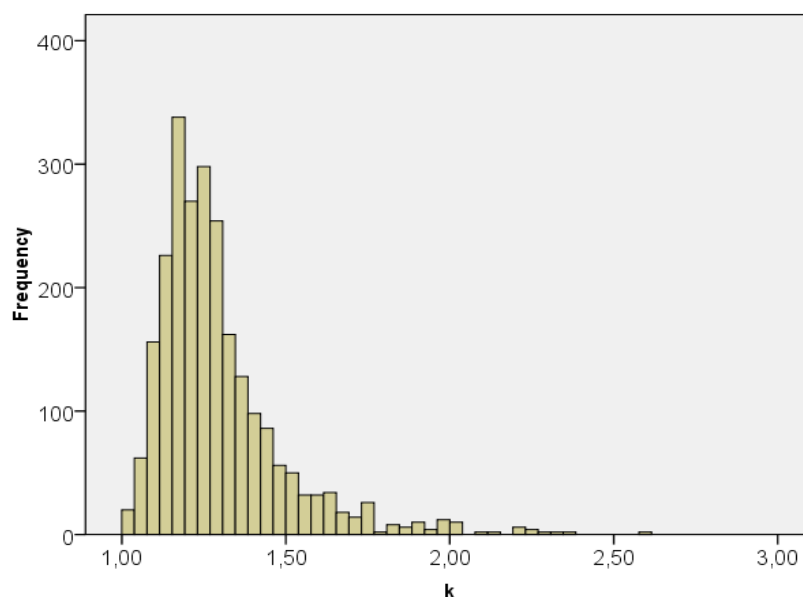


Figura 20: Histograma para as razões de distâncias de 50 pontos sorteados na rede.

As estatísticas para as 2500 distâncias tratadas são apresentadas na Tabela 11. Observa-se que, em relação aos resultados obtidos para 10 pontos, a assimetria dos dados teve um crescimento devido, principalmente aos resultados máximos obtidos que chegaram próximos a 2,59. Houve um crescimento no intervalo interquartil que também explica o aumento da Curtose e da variância dos dados.

Tabela 11: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 50 pontos sorteados.

<i>Estatísticas para 50 Pontos Sorteados na Rede</i>		
	Estatísticas	Erro Padrão
Média	1,2955	0,0398
Mediana	1,2508	
Variância	0,0390	
Desvio Padrão	0,1966	
Mínimo	1,0183	
Máximo	2,5900	
Intervalo entre quartis	0,1908	
Assimetria	2,1120	0,0500

4.3.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 50 Pontos Sorteados

Os resultados da regressão matemática para os pares de distâncias euclidianas e em rede estão apresentados na Tabela 12. Assim como na

determinação do Fator de Circuito como um multiplicador “k”, foram excluídas da análise as distâncias em que os pontos de origem e destino eram coincidentes.

Tabela 12: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 50 pontos sorteados.

	Valor	Erro Padrão
Constante	450,360	27,376
Coefficiente a	1,152	0,006

O coeficiente de correlação determinado para os pares de distâncias foi de $r = 0,969$, indicando a existência de forte correlação positiva entre as distâncias em rede e euclidianas. Com os resultados obtidos através da regressão linear a equação resultante é da forma:

$$Y = 1,152X + 450,36$$

Com

Y = Distância em rede

X = Distância euclidiana

Diferentemente da definição do FC sob a forma de um número real, a equação linear encontrada para o FC com 50 pontos é bastante distinta da encontrada para 10 pontos sorteados. Observa-se um aumento considerável no valor da constante, indicando que o comprimento médio dos pares de distâncias aumentou. Em compensação, houve uma redução no coeficiente angular da reta. Com o crescimento no coeficiente linear da reta (constante), já é possível observar que a aproximação de pequenas distâncias (inferiores a 450 m) utilizando a equação da reta não é muito boa, no entanto, o coeficiente de correlação encontrado ($r = 0,969$), indica que a relação de proporcionalidade entre as distâncias em rede e euclidiana é alta, além disso, indica que o uso da equação de regressão pode gerar bons resultados na aproximação de médias e longas distâncias, ou seja, minimizar os erros na aproximação. A Tabela 13 apresenta uma comparação entre aproximações de distâncias em rede, por distâncias euclidianas, realizadas através do multiplicador “k” e da equação.

Tabela 13: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 50 pontos).

<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Distância em rede utilizando o multiplicador “k”</i>	<i>Distância em rede utilizando a equação de regressão</i>	<i>Diferença (k – Eq.)</i>
500	648	1026	-378
1000	1296	1602	-306
2000	2592	2754	-162
4000	5184	5058	126
8000	10368	9666	702

Comparando as aproximações via multiplicador com aproximações utilizando a equação de regressão, observa-se que para distâncias euclidianas inferiores a 3128m, a equação retorna distâncias em rede superiores às obtidas por meio da multiplicação pelo número real. Em caso contrário, para distâncias superiores a 3128m, a situação se inverte, e as aproximações via multiplicador passam a gerar distâncias em rede maiores. Essas observações também puderam ser identificadas para 10 pontos sorteados.

4.4 Fator de Circuito para 100 Pontos Sorteados

4.4.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 100 Pontos Sorteados

Para 100 pontos sorteados as distâncias em rede foram, em média, 30,41% maiores que as euclidianas, gerando um Fator de Circuito sob a forma de um multiplicador com valor de:

$$k = 1,304$$

A variação entre o valor encontrado para 50 pontos sorteados é de apenas 0,6%, em compensação o número de pares de distâncias gerados é 4 vezes maior. Para essa variação no número de pontos (de 50 para 100), observa-se certa estabilização nos valores encontrados para o FC.

Para 100 pontos sorteados (Figura 21), a distribuição espacial dos pontos encontra-se mais dispersa pelas regiões da cidade, em comparação com os sorteios anteriores.



Figura 21: Distribuição espacial dos 100 pontos sorteados aleatoriamente na rede.

Com o aumento na quantidade de pontos sorteados, o valor calculado para o fator de circuito passa a ter maior influência de distâncias calculadas entre bairros e regiões distintas da cidade, mesmo que não apresente diferenças consideráveis para o “k” calculado na seção anterior (50 pontos).

O diagrama de dispersão X,Y apresentado na Figura 22 demonstra a distribuição dos valores das razões de distâncias em torno da média. Nota-se um aspecto semelhante à configuração encontrada para 50 pontos sorteados, no entanto a amplitude dos dados (diferença entre o maior e o menor valor encontrado) cresce 88% em relação à amplitude dos dados para 50 pontos, chegando a 2,968. Um fato interessante já pode ser notado: mesmo com o aumento considerável na amplitude das razões de distâncias calculadas, o coeficiente “k” sofre pouca alteração.

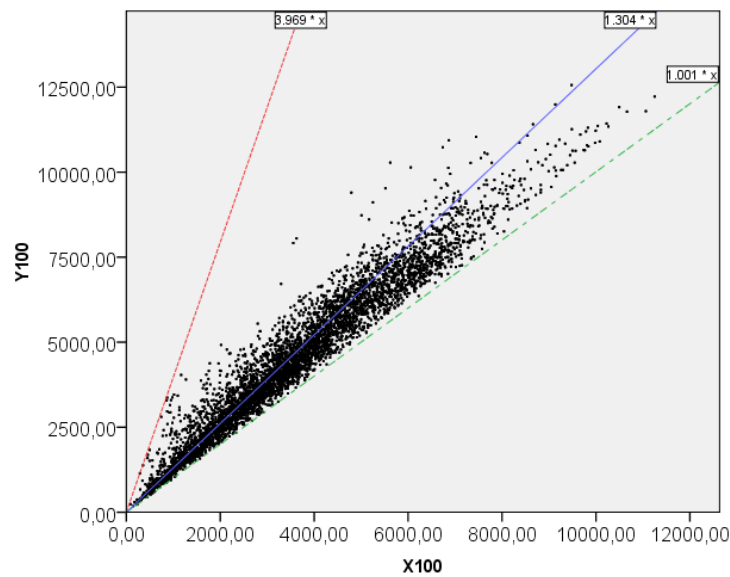


Figura 22: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 100 pontos sorteados na rede.

A reta vermelha, de tracejado contínuo ($y = 3,969x$), cerca os valores com a maior razão de distâncias calculada, enquanto a reta verde, de tracejado duplo ($y = 1,001x$), cerca os valores pela parte inferior, indicando uma razão de distâncias muito próxima de 1.

Com o crescimento na quantidade de distâncias tratadas, além do crescimento na amplitude das razões de distâncias e mantidas as tendências centrais para o Fator de Circuito “k”, o diagrama de caixa, apresentado na Figura 23, representa o comportamento dos dados em relação à distribuição de frequência acumulada. Nota-se o aumento na quantidade de dados discrepantes, fato que pode também ser creditado ao aumento na amplitude dos dados de entrada, mantidas as tendências de centro. O número de *outliers*, ou razões que superaram o limite superior do gráfico (1,66) foi de 534. Esse valor representa 5,48% dos dados de entrada.

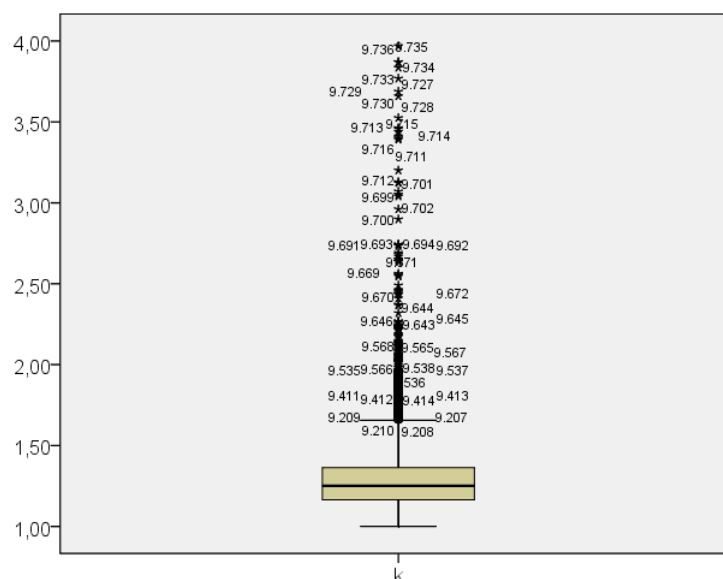


Figura 23: Gráfico *Box Plot* para as razões entre distâncias calculadas para 100 pontos sorteados.

O formato achatado do diagrama de caixa revela a tendência de distribuição dos dados de maneira tal que uma grande quantidade de valores distribui-se muito próxima da média, no entanto, uma porcentagem considerável de valores apresenta razões de distâncias muito discrepantes às demais. Essas razões muito elevadas configuram-se no processamento de distâncias em rede muito superiores às euclidianas, por vezes de 3 a 4 vezes maiores, com maiores ocorrências em regiões com baixa densidade viária, ou seja, regiões que oferecem poucas opções de trajeto viário entre diferentes locais.

As principais estatísticas que caracterizam o Fator de Circuito “k” calculado para 100 pontos sorteados na rede são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 100 pontos sorteados.

<i>Estatísticas para 100 Pontos Sorteados na Rede</i>		
	Estatísticas	Erro Padrão
Média	1,3041	0,0025
Mediana	1,2507	
Variância	0,0630	
Desvio Padrão	0,2506	
Mínimo	1,0010	
Máximo	3,9681	
Intervalo entre quartis	0,1985	0,0250
Assimetria	4,1240	

Observa-se um aumento na variância dos dados, em comparação à situação calculada para 50 pontos sorteados, assim como um aumento considerável nos coeficientes de assimetria e curtose, o que, em parte, justifica o aumento na amplitude dos dados de entrada. Identifica-se, no entanto, estabilização nos valores das medidas de tendência central (média e mediana).

4.4.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 100 Pontos Sorteados

A Tabela 15 apresenta os valores dos coeficientes resultantes do cálculo da regressão linear realizada a partir das distâncias euclidianas e em rede, relativas aos 100 pontos sorteados no mapa de Petrolina.

Tabela 15: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 100 pontos sorteados.

	Valor	Erro Padrão
Constante	492,027	11,996
Coefficiente α	1,125	0,003

Observa-se que os valores encontrados, tanto para o coeficiente angular da reta quanto para o coeficiente linear, já não apresentam diferenças tão significativas em relação àqueles calculados para 50 pontos sorteados na rede, quanto às diferenças observadas destes últimos para os valores encontrados para regressão para apenas 10 pontos sorteados na rede. Essa observação reitera a importância de um número razoável de pares de dados para realização do tratamento estatístico proposto. Observa-se ainda uma redução no erro padrão da constante, indicando maior confiabilidade e melhores resultados com o uso da equação para 100 pontos se comparada com as equações para 10 e 50 pontos sorteados.

Apesar disso, as limitações ao uso da equação gerada para conversão de pequenas distâncias euclidianas em distâncias em rede mantêm-se, devido, principalmente, ao valor elevado da constante (coeficiente linear da reta).

O coeficiente de correlação encontrado foi de $r = 0,969$, semelhante ao calculado para 50 pontos sorteados, o que também indica forte correlação positiva entre as distâncias euclidianas e em rede e que a aplicação da equação na

aproximação de distâncias euclidianas deve gerar erro médio pequeno. Com os dados obtidos na regressão, a equação gerada é da forma:

$$Y = 1,125X + 492,03$$

Com

Y = Distância em rede

X = Distância euclidiana

Como nos casos anteriores, a Tabela 16 apresenta um comparativo entre aproximações de distâncias em rede por distâncias euclidianas via utilização do coeficiente “k” e da equação de regressão gerada.

Tabela 16: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 100 pontos).

<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Distância em rede utilizando o multiplicador “k”</i>	<i>Distância em rede utilizando a equação de regressão</i>	<i>Diferença (k – Eq.)</i>
500	652	1054	-402
1000	1304	1617	-313
2000	2608	2742	-134
4000	5216	4992	224
8000	10432	9492	940

A Tabela 16 demonstra as diferenças existentes nas aproximações de distâncias realizadas das duas maneiras propostas. Em alguns casos essa diferença é bastante considerável podendo representar até 80% do valor da distância aproximada, como é o caso da aproximação para 500m. De maneira geral, para valores inferiores a 2749m a equação aproxima as distâncias com resultados superiores aos encontrados com o uso do coeficiente “k”, em caso contrário, ou seja, valores de distâncias superiores a 2749m, os resultados obtidos com o uso do coeficiente “k” apresentam respostas de dimensão superior.

4.5 Fator de Circuito para 500 Pontos Sorteados

4.5.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 500 Pontos Sorteados

A distribuição espacial dos 500 pontos sorteados no mapa de Petrolina pode ser verificada na Figura 24. Observa-se que todas as regiões da área delimitada para o sorteio dos pontos estão densamente carregadas, além disso, observa-se ainda a existência de pontos muito próximos uns dos outros, o que já era esperado devido à quantidade de pontos sorteados.

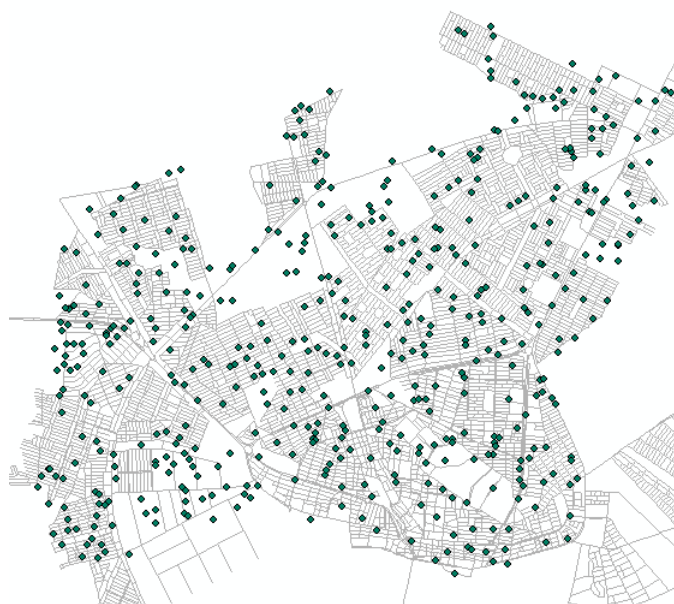


Figura 24: Distribuição espacial dos 500 pontos sorteados aleatoriamente na rede.

Calculadas as matrizes de distâncias em rede e euclidiana, as primeiras apresentam, em média, valores 26,87% maiores que as segundas. Ou seja, para esse conjunto de distâncias, o valor do Fator de Circuito “k” é:

$$k = 1,269$$

Observa-se uma redução percentual da ordem de 2,68%, no entanto, o número de distâncias calculado é 25 vezes maior que a situação para 100 pontos,

ou ainda, 100 vezes maior que a quantidade de distâncias geradas para 50 pontos. O número de distâncias euclidianas, assim como de distâncias em rede, para esse caso é de 250.000. A partir desse ponto, o cálculo das estatísticas para o conjunto de dados gerado passa a ser dificultado com o uso de sistemas computacionais domésticos.

A construção do gráfico de dispersão X,Y , apresentado na Figura 25, foi simplificada com a redução à 20% dos dados iniciais devido a limitações do *software* utilizado. Essa redução foi realizada de maneira aleatória e, devido à quantidade de dados envolvida, as medidas de tendência central calculadas mantiveram-se muito próximas (ver Tabela 17), fato ratificado pelo *Teorema do Limite Central* da estatística.

Tabela 17: Comparação entre as médias das razões entre as distâncias em rede e euclidianas para 500 pontos sorteados.

	<i>100% dos dados</i>	<i>20% dos dados</i>
Média	1,26881	1,26819

O diagrama de dispersão X,Y para 20% dos pares de distâncias é demonstrado abaixo:

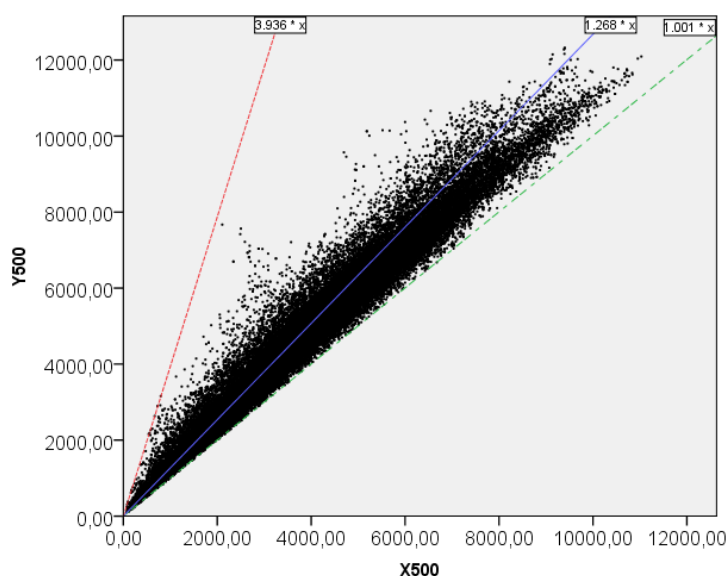


Figura 25: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 500 pontos sorteados na rede.

Observa-se que as tendências de dispersão dos dados em torno da média (reta contínua azul) são semelhantes às encontradas para 100 pontos sorteados e que a amplitude dos dados de entrada é praticamente a mesma.

O diagrama de caixa, também construído a partir de 20% dos dados de entrada, apresenta configuração demonstrada na Figura 26. O achatamento da caixa deve-se a plotagem em conjunto com os *outliers*, nesse caso, representando 5,26% dos dados de entrada. A configuração do gráfico é semelhante à encontrada para 50 e 100 pontos. O número de discrepâncias foi, portanto, de 2611 observações que superaram o limite superior do gráfico (1,58).

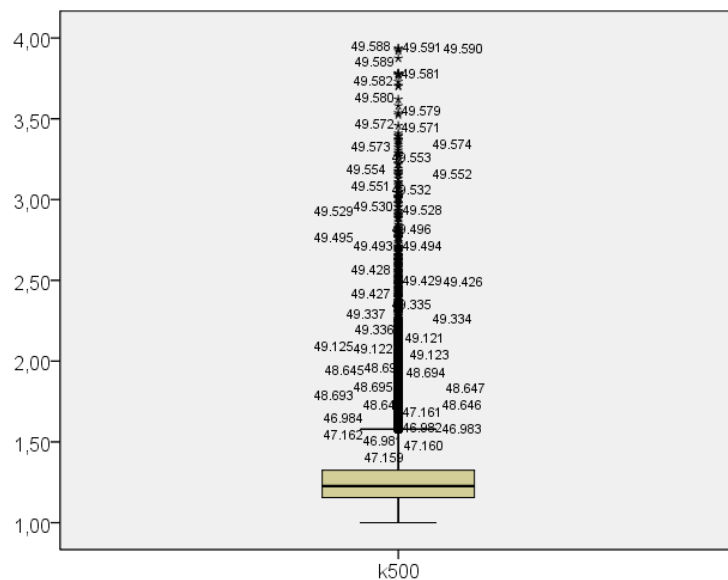


Figura 26: Gráfico *Box Plot* para as razões entre distâncias calculadas para 500 pontos sorteados.

As principais estatísticas para as razões entre as 250.000 distâncias calculadas estão demonstradas na Tabela 18. Quando relacionadas às estatísticas com os valores obtidos para 100 pontos, observa-se uma redução da variância amostral, assim como nos coeficientes de assimetria e curtose. As amplitudes dos dados mantêm-se praticamente inalteradas.

Tabela 18: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 500 pontos sorteados.

<i>Estatísticas para 500 Pontos Sorteados na Rede</i>		
	Estatísticas	Erro Padrão
Média	1,2681	~0,0
Mediana	1,2262	
Variância	0,0381	
Desvio Padrão	0,1954	
Mínimo	1,0001	
Máximo	3,9935	
Intervalo entre quartis	-	
Assimetria	3,8257	-

Observa-se um crescimento nos coeficientes de assimetria e curtose, indicando maior dispersão dos dados em torno da média, além disso, a forte assimetria positiva indica a tendência de maior quantidade de pontos inferiores à média encontrada.

4.5.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 500 Pontos Sorteados

Em planilha eletrônica, foi possível utilizar todos os pares de distâncias gerados, exceto àqueles em que a origem coincidia com o destino (como nos demais casos), no cálculo da equação linear da reta para aproximar as distâncias em rede através das euclidianas. A Tabela 19 apresenta os valores encontrados para o coeficiente linear e angular da reta.

Tabela 19: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 500 pontos sorteados.

	Valor	Erro Padrão
Constante	412,49	4,854
Coeficiente α	1,127	0,001

O coeficiente de correlação encontrado foi de $r = 0,977$ revelando, como nos demais casos, e até com maior poder, que há forte correlação positiva entre as

distâncias euclidianas e em rede. Com os dados obtidos na regressão, a equação que representa o FC é da forma:

$$Y = 1,127X + 412,49$$

Com

Y = Distância em rede

X = Distância euclidiana

Essa equação apresenta uma pequena variação quando relacionada àquela encontrada com a regressão para 100 pontos. A tendência mantém-se para o coeficiente angular próximo de 1,12 e o coeficiente linear próximo a 415. Uma observação a ser feita é a redução no erro padrão da amostra, tanto para o coeficiente angular quanto para o linear. Justifica-se o fato pelo número de pares de distâncias analisados nesse último caso.

A utilização da equação gerada para conversão de pequenas distâncias euclidianas em distâncias de rede não gera bons resultados, no entanto, vale ressaltar que, de maneira geral, a equação gerada apresenta bons resultados na conversão de distâncias, uma vez que o coeficiente de correlação encontrado é próximo de 1. A Tabela 21 apresenta uma comparação da utilização do Fator de Circuito em forma de multiplicador “k” e de uma equação linear.

Tabela 20: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 500 pontos).

<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Distância em rede utilizando o multiplicador “k”</i>	<i>Distância em rede utilizando a equação de regressão</i>	<i>Diferença (k – Eq.)</i>
500	634	976	-342
1000	1268	1539	-271
2000	2536	2666	-130
4000	5072	4920	152
8000	10144	9428	716

Como nos demais casos, a equação de regressão apresenta, proporcionalmente, variação menor para os resultados obtidos em relação aos resultados pela utilização do multiplicador “k” ou até mesmo, em relação à variação

nos dados de entrada (distância euclidiana). Um exemplo pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21: Comparação entre a variação percentual dos dados de entrada para equação linear e os resultados gerados.

	<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Ajuste pela Reta</i>
	500	976
	1000	1539
Variação	100%	57,68%

Considerando que a equação apresente bons resultados para conversão de distâncias, observa-se que distâncias euclidianas maiores apresentam menor razão de proporcionalidade às distâncias em rede, ou seja, indica que utilizar um único fator para converter as distâncias (como no caso do uso do “k”), pode gerar resultados com grande erro médio.

4.6 Fator de Circuito para 1000 Pontos Sorteados

4.6.1 Fator de Circuito sob a Forma de um Multiplicador “k” para 1000 Pontos Sorteados

A distribuição espacial dos sobre a área delimitada para o sorteio é bastante dispersa, como demonstra a Figura 27. Todos os bairros da cidade estão representados por um ou mais pontos e o número de pontos com distâncias muito pequenas entre eles é bastante elevado. A densidade de pontos na área delimitada é, também, alta.

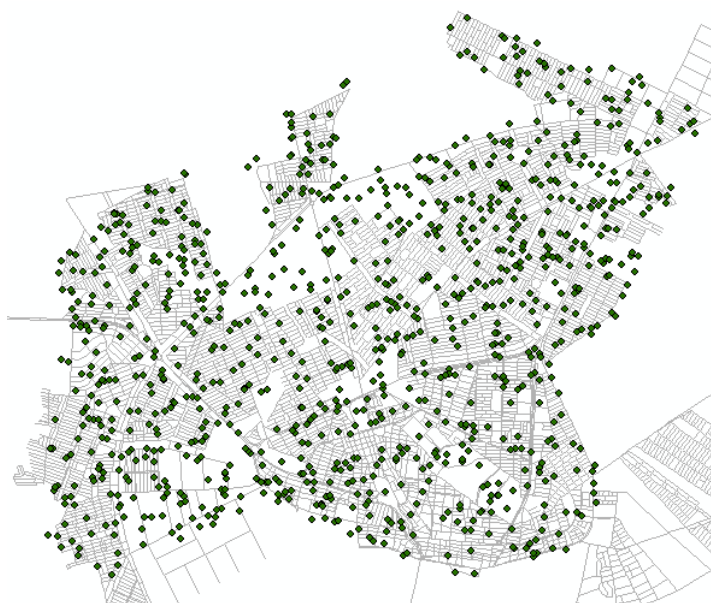


Figura 27 Distribuição espacial dos 1000 pontos sorteados aleatoriamente na rede.

Para as 1.000.000 de distâncias euclidianas e em rede geradas a partir de 1.000 pontos sorteados, essas últimas apresentam-se, em média, 27,00% maiores que as primeiras. Nesse caso, o Fator de Circuito como multiplicador é definido por:

$$k = 1,270$$

O valor encontrado é muito próximo ao encontrado para 500 pontos sorteados, apresentando variação apenas na terceira casa decimal ou, em porcentagem, 0,08%. Em contraposição, o número de distâncias tratadas é 4 vezes maior que a quantidade gerada para 500 pontos e 100 vezes maior que a quantidade gerada para 100 pontos. De fato, o esforço computacional para o tratamento dos dados é elevado consideravelmente e as diferenças nos resultados são irrisórias. Em termos de utilização prática, para os coeficientes calculados para 500 e 1000 pontos, respectivamente, aproximar 1000 metros euclidianos às distâncias viárias geraria 1269 m e 1270 m, com diferença inferior a 1% caso a caso.

O gráfico de dispersão X,Y, apresentado na , demonstra a manutenção das tendências de dispersão dos dados em torno da média já observadas nos gráficos de 100 e 500 pontos.

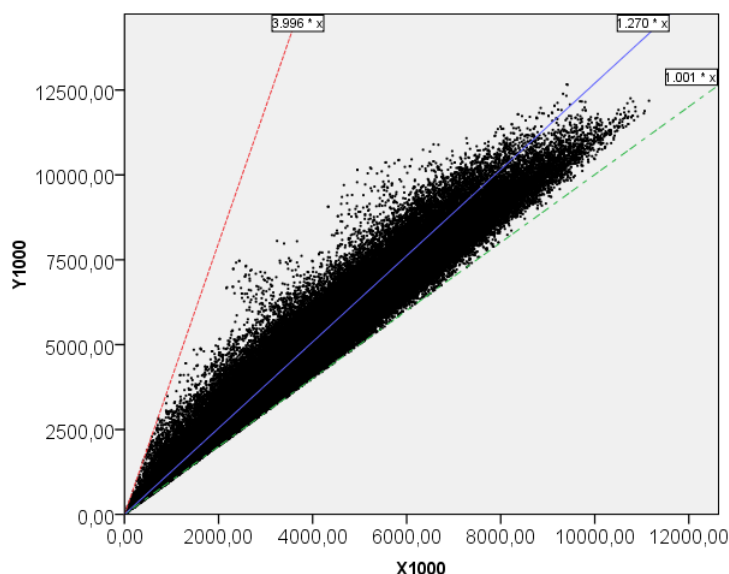


Figura 28: Gráfico de dispersão X,Y para as razões entre as distâncias em rede e euclidianas para as observações extraídas de 1.000 pontos sorteados na rede.

A amplitude nos dados também é mantida em torno de 2,99. O gráfico apresentado na Figura 28 foi construído com apenas 20% dos dados de entrada, como feito no caso de 500 pontos sorteados. Essa simplificação deve-se a restrições de capacidade do *software* utilizado. Vale salientar que, assim como para o caso de 500 pontos, 20% dos pares de distâncias, sorteados aleatoriamente do conjunto de valores possíveis, oferecem uma boa representação do universo disponível, observada, principalmente, na manutenção das medidas de tendência central (ver Tabela 22).

Tabela 22: Comparação entre as médias das razões entre as distâncias em rede e euclidianas para 1000 pontos sorteados.

	100% dos dados	20% dos dados
Média	1,27001	1,27029

O diagrama de caixa (ver Figura 29) apresenta a distribuição dos dados entre as frequências. O achatamento da caixa, assim como nos casos anteriores e ainda mais saliente, deve-se à existência de 5,27% de observações que extrapolaram o limite superior do gráfico *box plot*.

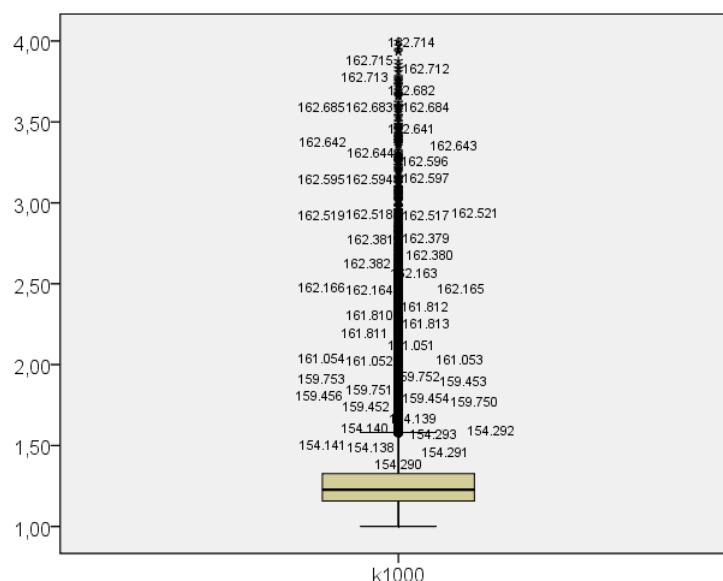


Figura 29: Gráfico *Box Plot* para as razões entre distâncias calculadas para 1000 pontos sorteados.

Foram 8583 observações determinadas como extremas e as estatísticas que descrevem o perfil do conjunto de dados para 1000 pontos são apresentadas na Tabela 23. Os valores das estatísticas são bastante próximos aos encontrados para 500 pontos. De fato há uma estabilização no valor do Fator de Circuito calculado em ambos os casos, apesar do número de distâncias gerado se bem maior, como já discutido.

Tabela 23: Principais estatísticas para a razão entre as distâncias calculadas para 1000 pontos sorteados.

<i>Estatísticas para 500 Pontos Sorteados na Rede</i>		
	Estatísticas	Erro Padrão
Média	1,2700	~0,0
Mediana	1,2267	
Variância	0,0389	
Desvio Padrão	1,1973	
Mínimo	1,0001	
Máximo	3,9963	
Intervalo entre quartis	-	
Assimetria	3,7766	-

A estabilização dos valores determinados para as estatísticas tomando-se amostras desde 10.000 distâncias (100 pontos) até 1.000.000 distâncias (1.000 pontos) indica a determinação de limiares para alguns parâmetros calculados como é o caso do erro padrão da média (tendendo a zero) ou da variância da amostra.

4.6.2 Fator de Circuito sob a Forma de Equação Linear para 1000 Pontos

Sorteados

Assim como para os pares de distâncias gerados no caso de 500 pontos sorteados, a regressão para 1000 pontos foi elaborada por meio de planilhas eletrônicas e os resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultado da regressão com os pares de distâncias relativas para 1000 pontos sorteados.

	Valor	Erro Padrão
Constante	385	1,1218
Coefficiente <i>a</i>	1,1366	0,0002

O resultado obtido na Tabela 24 difere das regressões anteriores na medida em que apresenta erros-padrão muito pequenos, tanto em relação ao coeficiente angular quanto ao coeficiente linear. Esse resultado deve-se à quantidade de distâncias tratadas. Apesar do aumento da confiabilidade na utilização da equação de regressão para aproximar distâncias (redução nos erros calculados nos coeficientes), as limitações de uso para pequenas distâncias mantêm-se. O coeficiente de correlação calculado foi de $r = 0,976$ ratificando a existência de forte correlação positiva entre as distâncias euclidianas e em rede. Desse modo, com os dados obtidos, a equação linear para distâncias relativas entre 1000 pontos é:

$$Y = 1,136X + 385$$

Com

Y = Distância em rede

X = Distância euclidiana

A utilização dessa equação para conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede, assim como a comparação em relação ao uso do coeficiente “k”, pode ser percebida na Tabela 25.

Tabela 25: Comparação do uso do multiplicador “k” e da equação de regressão na conversão de distâncias euclidianas em distâncias em rede (dados para 1000 pontos).

<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Distância em rede utilizando o multiplicador “k”</i>	<i>Distância em rede utilizando a equação de regressão</i>	<i>Diferença (k – Eq.)</i>
500	635	953	-318
1000	1270	1521	-251
2000	2540	2657	-117
4000	5080	4929	151
8000	10160	9473	687

Apesar de ainda apresentarem uma diferença grande nas saídas (distâncias em rede), a depender dos valores das entradas (distâncias euclidianas), o caso de 1000 pontos sorteados foi o que apresentou melhor aproximação entre as duas metodologias. A redução nos erros-padrão da constante e do coeficiente angular da reta indica aumento da confiabilidade em utilizá-la para conversão de distâncias.

4.7 Comparando Resultados

4.7.1 Análise de erros médios

Definidas as estatísticas para o Fator de Circuito, seja sob a forma de um número real seja sob a forma de uma equação, para as possibilidades de sorteios aleatórios definida na metodologia (10, 50, 100, 500 e 1000), parte-se para análise dos erros gerados na aproximação de distâncias via essas possibilidades, quais sejam, uma equação e um número real para cada quantidade de pontos sorteada. Nas seções anteriores as comparações entre as aproximações de distâncias feitas a partir do “k” e da equação indicam diferenças consideráveis nos valores encontrados. Essas diferenças ratificam a necessidade de análise dos erros médios gerados para identificar qual das metodologias melhor adapta-se à utilização do FC.

Apesar das estatísticas geradas para 10 pontos indicarem relações de proporcionalidade entre as distâncias em rede e euclidianas, em termos de inferência estatística, admite-se tratar de uma quantidade pequena de distâncias analisadas cujas relações possam ser estendidas ao todo. A equação de regressão

gerada, para esse caso, indicando erro padrão do coeficiente angular (131,672) superando o valor do próprio coeficiente (126,656) ratifica essa observação. Portanto, foram excluídas das possibilidades para o FC as estatísticas de 10 pontos sorteados.

O universo de análise de erros na aproximação de distâncias em rede por distâncias euclidianas restringe-se agora a 50, 100, 500 e 1000 pontos. Para analisar a eficácia do “k” e das equações geradas para cada um desses valores, foram adotados os seguintes passos:

- Sorteio aleatório de 20 pontos na rede lógica da cidade;
- Exclusão das distâncias nulas e duplicadas (pontos de origem e destino coincidentes e contrários, respectivamente), além das discrepâncias, gerando um total de 183 distâncias variando de 120m a 7615m;
- Determinação das distâncias euclidianas para esses pontos;
- Determinação das distâncias mínimas em rede via *software*;
- Aproximação das distâncias em rede utilizando o “k”;
- Cálculo do erro médio como a diferença entre as distâncias aproximada pelo “k” e a respectiva distância determinada pelo *software*;
- Determinação da distância em rede utilizando a equação;
- Cálculo do erro médio como a diferença entre as distâncias aproximada pela equação e a respectiva distância determinada pelo *software*;

É possível estender a aplicação do “k” na conversão de distâncias, matematicamente, como uma equação onde o coeficiente angular é representado pelo próprio “k” e coeficiente linear igual à zero, o seja, a reta passa pelo ponto (0,0). Essa observação é feita a título de comparação entre as metodologias de aproximação de distâncias e diferem quanto à forma de obtenção dos coeficientes. A Figura 30 apresenta a representação visual do “k” como uma equação que passa no ponto (0,0), além da equação de regressão tocando o eixo das ordenadas no valor do coeficiente linear.

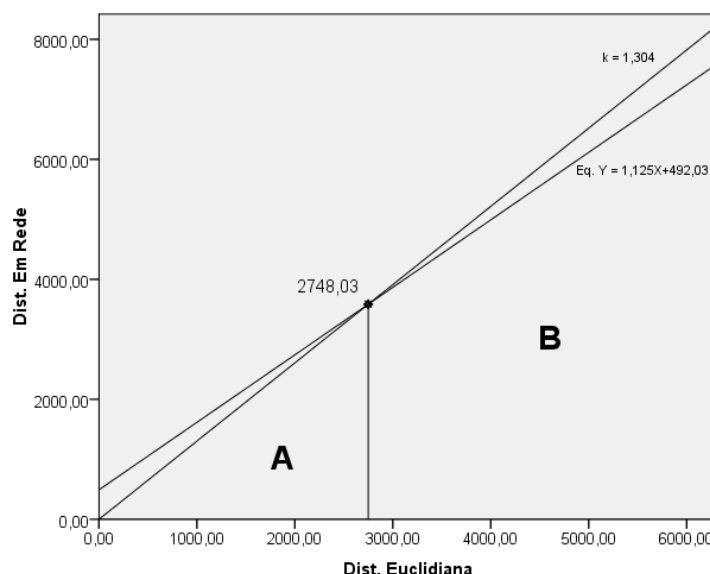


Figura 30: Diagramação do “k” e da equação de regressão com destaque para o ponto onde as retas se cruzam.

Destaca-se o ponto onde as retas se cruzam. Devido às diferenças na declividade das retas (reta “k” mais acentuada), na região anterior à interseção das retas (região A no gráfico), as aproximações de distâncias via o coeficiente “k” resultam valores inferiores às feitas a partir da equação, com já observado ao longo dos resultados nas seções anteriores. Essa tendência é verificada para todas as quantidades de pontos sorteadas, divergindo apenas na declividade das retas e, conseqüentemente, no ponto de interseção das mesmas.

Esse ponto, além de representar o valor onde as duas equações geram o mesmo resultado, indica o limiar em que, na região anterior (região A do gráfico), o erro médio das aproximações, feitas a partir do “k”, é menor quando comparadas as feitas a partir da equação. O valor do coeficiente linear da reta de regressão é o principal motivo para o aumento nos erros para pequenas distâncias, onde o valor da constante onera bastante o resultado. Na região B do gráfico, foi observado que os erros médios das aproximações de distâncias utilizando a equação eram menores que os erros gerados com a utilização do “k”. A metodologia para determinação da equação (regressão linear), que privilegia a minimização dos erros médios, indica o bom ajuste da curva e justifica a melhor aplicação em relação ao “k”.

Essas tendências indicam que a composição do fator de circuito como multiplicador “k” na região anterior ao ponto de interseção das retas e assumindo a

forma da equação na região posterior ao ponto deve minimizar os erros de maneira geral. A Tabela 26 apresenta os erros médios para as aproximações de distâncias via “k”, equação e FC ajustado - representado pela composição do “k”, até a interseção das duas retas e da equação após a interseção.

Tabela 26: Erros médios (em metros) para as aproximações de distâncias para 50, 100, 500 e 1000 pontos sorteados.

	<i>50 pontos</i>	<i>100 pontos</i>	<i>500 pontos</i>	<i>1000 pontos</i>
Erro Médio “k”	340,20	351,65	307,90	308,74
Erro Médio Equação	338,17	334,59	316,09	312,14
Erro Médio FC Ajustado	331,36	326,79	307,01	308,94

Observa-se que o erro médio do FC Ajustado é menor que os demais erros médios caso a caso, com exceção das estatísticas de 1000 pontos onde o erro médio do FC Ajustado é muito próximo ao erro encontrado com as aproximações por meio do “k”.

4.7.2 Definindo o Fator de Circuito - FC

A definição do FC deve considerar as faixas de valores encontrados nas estatísticas de 50, 100, 500 e 1000 pontos sorteados. As diferenças encontradas para o “k” e para os coeficientes angular e linear da reta definem as faixas de valores. A equação abaixo apresenta o FC definido para Petrolina com a composição de valores encontrados para o coeficiente “k” e para a equação de regressão encontrada para 50, 100, 500 e 1000 pontos sorteados. Nesse caso o valor de $f(x)$ é definido como a distância em rede, sendo x o valor da distância euclidiana.

$$f(x) = \begin{cases} \text{se } x < 2748,77, kx \\ \text{se } 2748,77 \leq x \leq 3127,50, kx \text{ ou } ax + b \\ \text{se } x > 3127,50, ax + b \end{cases}$$

Onde:

$$1,269 < k < 1,304$$

$$1,125 < a < 1,152$$

$$385,00 < b < 492,03$$

As faixas de valores que segmentam o FC foram definidas com os valores máximo e mínimo das interseções entre as retas do “k” e das equações de regressão encontradas para as quatro quantidades de pontos sorteadas. A Figura 31 apresenta a diagramação dos intervalos que definem o FC, sob as condições da equação acima.

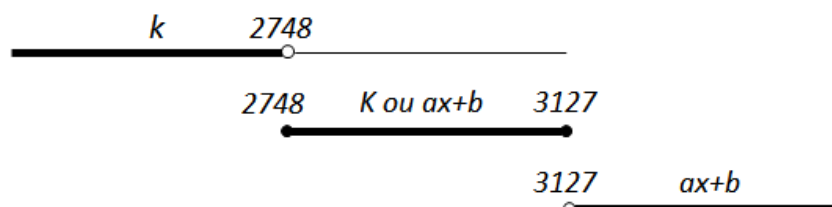


Figura 31: Intervalo de valores para definição do FC.

A implementação da metodologia proposta para conversão de distâncias, utilizando as faixas de dados geradas, pode ser facilmente aplicada em planilhas eletrônicas ou em funções de *softwares* de roteirização. Uma simplificação que pode ser adotada é a submissão do intervalo central dos dados, onde pode ser aplicada tanto a equação quanto o “k”, pelo valor médio dos extremos do intervalo (2937). O intervalo simplificado para aplicação do FC fica como demonstrado na Figura 32.

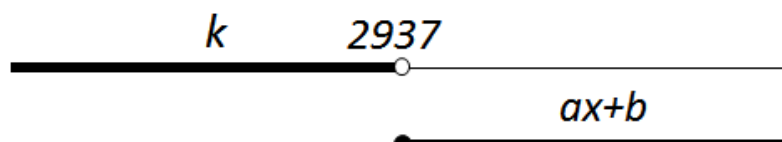


Figura 32: Intervalo simplificado para definição do FC.

Para distâncias euclidianas inferiores a 2937m, para minimização dos erros médios de aproximação, é conveniente utilizar o “k” como FC dentro da faixa de aplicação (1,269 – 1,304). Entretanto, para distâncias euclidianas superiores a 2937m, a utilização do FC sob a forma de uma equação $ax + b$ (com $1,125 < a < 1,152$ e $385,00 < b < 492,03$) minimiza os erros médios nas aproximações.

4.8 Processo para Determinação do Fator de Circuito

Aplicados os procedimentos metodológicos propostos, foi definido o Fator de Circuito para o estudo de caso: a cidade de Petrolina. A minimização dos erros médios, devido à aplicação do FC adequado em cada faixa de distâncias, valida o processo utilizado. As principais etapas desse processo estão esquematizadas na Figura 33.

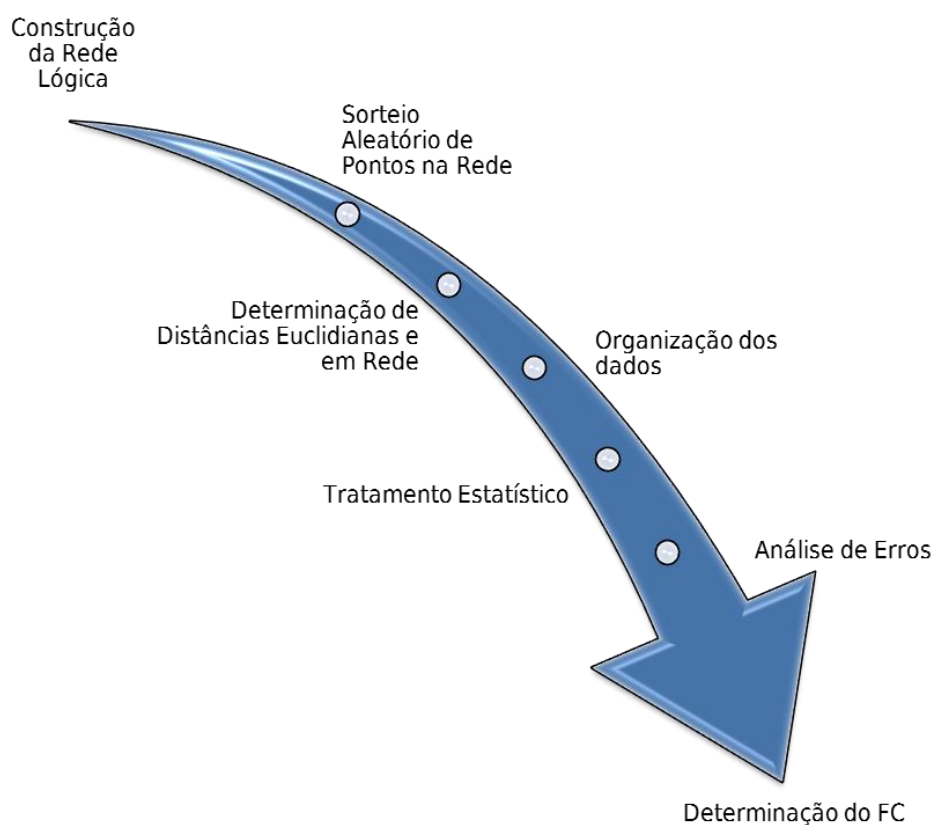


Figura 33: Processo para determinação do FC

Construção da Rede Lógica

A representação em SIG da malha viária da cidade cujo FC deseja-se determinar é um dos principais insumos para geração dos dados necessários para definição do FC. Para tanto, mapas urbanos em formato CAD oferecem, por exemplo, o aporte visual necessário à construção das entidades que representam as vias urbanas. A construção da rede lógica é um processo minucioso, além disso, o banco de dados deve ser alimentado com informações precisas sobre as vias de tráfego.

Sorteio Aleatório de Pontos

Procedimentos estatísticos são essenciais para caracterização da malha viária de cidades, além disso, para relacionar distâncias euclidianas a distâncias em rede é preciso determinar tendências entre ambas, já que se trata de um vasto universo de possibilidades. Nesse sentido, tomar uma quantidade razoável de pontos aleatórios para geração de distâncias em rede e euclidianas garante a eficácia estatística dos procedimentos de análise. A ferramenta SIG utilizada deve ser capaz de gerar pontos aleatórios sobre a área geográfica delimitada pelo perímetro urbano da cidade em estudo.

Determinação de Distâncias em Rede e Euclidianas

Os pontos sorteados aleatoriamente servem de base para determinação de distâncias variadas que podem ser processadas para definição do FC. Para facilitar o procedimento de geração de dados, é interessante que o *software* SIG utilizado ofereça ferramentas para o cálculo de distâncias mínimas entre pontos na rede lógica (distâncias em rede) e ainda, quando possível, que seja capaz de determinar distâncias euclidianas entre os pontos. Caso a ferramenta SIG utilizada não ofereça suporte à determinação de distâncias euclidianas, tomadas as coordenadas geográficas de latitude e longitude, é possível utilizar a *Fórmula do Grande Círculo* ou a fórmula para a distância mínima entre os pontos para determinar as distâncias euclidianas.

Organização dos dados

O volume elevado de dados gerados evidencia a necessidade de organizá-los de forma a torná-los informação válida à determinação do FC. Para os casos de 500 e 1000 pontos sorteados na rede lógica, o número de distâncias calculadas é de, respectivamente, 250.000 e 1.000.000, revelando a dificuldade em ordená-las de modo a tornar possível a identificação das origens e destinos referentes a cada distância. As matrizes OD, discutidas na metodologia, configuram-se como alternativas eficazes para a organização dos dados, no entanto, a tabulação dos mesmos em colunas contendo: origens, destinos, dimensão e outros fatores de interesse, pode também facilitar a manipulação das informações geradas.

Tratamento Estatístico

Os pares de distâncias (euclidianas, em rede) são o insumo básico ao tratamento estatístico necessário para definição do FC. No caso do FC definido como o multiplicador “k”, basta que se tome a média dos quocientes entre as distâncias de rede e euclidianas. No caso do FC definido como equação matemática, as análises são mais aprofundadas e o volume de dados gerado gera a necessidade de aplicação de ferramentas computacionais para tanto. No presente estudo, aplicou-se a análise de regressão linear na definição de uma equação matemática que caracterizasse o FC, no entanto, em futuros trabalhos, outras análises podem ser avaliadas na tentativa de encontrar soluções que apresentem erros médios de aplicação ainda menores.

Análise de Erros

Definido o FC por meio das análises estatísticas, é conveniente que seja testada a eficácia do Fator. Uma forma simples de teste consiste em aplicá-lo a situações reais de conversão de distâncias e analisar o erro médio gerado nas aproximações. No presente estudo, foram testadas distâncias fornecidas pelo mesmo *software* SIG empregado nas fases iniciais da pesquisa, no entanto, os testes podem ser feitos de diversas formas, inclusive de maneira prática com os dados de distâncias percorridas por veículos de entrega.

Determinação do FC

As informações geradas são suficientes para definir o FC com minimização de erros de aplicação. Com o objetivo de minimizar o erro total, no presente trabalho foi

definida uma maneira de unir as duas metodologias testadas em regiões onde cada uma gerava melhores resultados. O FC definido como proposto nesse estudo apresentou melhores resultados quando comparado ao proposto na literatura especializada.

4.9 Conclusão do Capítulo

Nesse capítulo foram apresentadas e discutidas as análises estatísticas para definição do FC. Foram analisadas, em separado, distâncias euclidianas e em rede, geradas a partir de 10, 50, 100, 500 e 1000 pontos sorteados na rede lógica que representa o mapa urbano de Petrolina. Devido à quantidade reduzida de distâncias geradas, as estatísticas para 10 pontos foram excluídas das faixas de valores em que foram definidos os parâmetros do FC, composto pelos “k” e pelas equações de regressão geradas nas análises. A composição das duas metodologias adotadas para definir o FC reduziu o erro médio nas aproximações de distâncias. Dessa maneira, esquematizou-se o processo de determinação do FC.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A definição do Fator de Circuito – FC para a cidade de Petrolina foi baseada na análise da eficácia da aplicação de dois métodos distintos. O primeiro deles, de análise mais simples, consiste na determinação da média das razões entre as distâncias em rede e euclidianas. O outro, que exige maior processamento computacional, consiste na determinação de uma equação capaz de aproximar as distâncias em rede, recebendo como entrada o valor das distâncias euclidianas.

5.1 Conclusões

A evolução dos sistemas logísticos, com suporte das tecnologias da informação, conduz a redução dos custos das atividades de suporte ao processo produtivo, tornando-se, inclusive, uma das áreas mais sensíveis a essa redução de custos. Em logística, destaca-se a área de distribuição física, que engloba grande parte dos custos da atividade e, como verificado na revisão da literatura, apresenta possibilidades variadas de melhorias em seus processos por meio da aplicação de técnicas e ferramentas da administração científica. Quando a palavra de ordem é a redução de custos, principalmente em sistemas logísticos, uma das ideias recorrentes é a maximização do uso de recursos como veículos e pessoal e ainda a minimização do consumo de combustível, do desgaste do veículo e das horas de mão de obra pagas. Nesse sentido, a elaboração de rotas que minimizem o percurso entre clientes para entrega de mercadorias, ou ainda, que reduzam o tempo de utilização do veículo e da mão-de-obra empregados, são condizentes as perspectivas de evolução dos sistemas logísticos.

Pacotes computacionais que aplicam heurísticas para determinação de rotas mínimas em redes viárias apresentam, geralmente, bons resultados na redução de tempos e distâncias percorridas em trajetos, em contrapartida, os custos de aquisição e implantação desses sistemas é bastante elevado exigindo ainda conhecimento específico para operação.

Existem metodologias alternativas para definição de roteiros sub-ótimos que apresentam resultados satisfatórios. Essas alternativas utilizam heurísticas mais

simplificadas que facilitam a implementação de sua lógica em pequenos aplicativos. Uma das principais metodologias alternativas para o problema da roteirização de veículos é o *Método das Economias*, baseado no conceito de ganho na junção de roteiros. Esse método recebe como entrada uma matriz de distâncias entre pontos que é o insumo básico para determinação da matriz de ganhos. A grande dificuldade da aplicação do método, com base na matriz de distâncias em rede entre pontos, consiste no fato de que a determinação dessa matriz, por si só, exige grande esforço computacional, principalmente quando a quantidade de pontos é elevada. No entanto, o *Método das Economias* pode receber como entrada a matriz de distâncias euclidianas entre os pontos, que pode ser determinada por meio das coordenadas geográficas de latitude e longitude dos pontos de maneira bem mais simples que a matriz de distâncias em rede. As distâncias euclidianas podem, então, serem convertidas, por aproximação, por meio de um fator de conversão denominado Fator de Circuito – FC.

O FC depende das condições de tráfego das vias urbanas das cidades, da geografia, da urbanização, do porte e pode divergir de uma cidade para outra. Nesse trabalho de fim de curso foi definido o Fator de Circuito para a cidade de Petrolina-PE com área geográfica de, aproximadamente, 50 km². A literatura especializada geralmente utiliza como FC um número real que, multiplicado pela distância euclidiana, aproxima a distância em rede e, via-de-regra, esse fator acrescenta 35% ou 40% à distância euclidiana para gerar a distância em rede. Ao longo desse trabalho foi possível observar que essa metodologia apresenta erros médios de aproximação maiores que os erros associados à aplicação de equações de regressão ou a composição das duas metodologias de aproximação em intervalos de aplicação específicos.

Em relação à aplicação do FC sob a forma de um número real ou de uma equação, observou-se que a utilização conjunta das duas metodologias, em faixas de aplicação específicas, gera resultados melhores que as aproximações de distâncias feitas, isoladamente em cada uma das metodologias. Essa observação revela que a proporcionalidade entre as distâncias euclidianas e em rede depende da dimensão da própria distância euclidiana e tende a diminuir tanto quanto essa última cresça.

A análise da eficácia de cada método foi testada por meio da comparação dos resultados obtidos com a aproximação das distâncias por meio do “k” e da equação,

com o valor das distâncias em rede determinadas pelo *software* SIG empregado. O resultado foi a definição de equações que se aplicam a faixas de distâncias e geram resultados satisfatórios quanto a redução dos erros médios de aproximação.

Definido o FC para a cidade de Petrolina, as principais etapas desse processo foram organizadas para responder a um dos objetivos desse trabalho. Definiu-se um processo para determinação do FC. Esse processo depende da utilização de ferramentas computacionais, estatísticas e SIG, no entanto, independente das ferramentas utilizadas, preserva a técnica de obtenção e tratamento dos dados.

5.2 Recomendações

A aplicação dos procedimentos metodológicos descritos pressupõe a utilização de ferramentas computacionais como planilhas eletrônicas, *softwares* estatísticos e *softwares* SIG. As ferramentas utilizadas foram escolhidas devido à disponibilidade, desse modo, as análises propostas nesse trabalho podem ser realizadas por meio de ferramentas similares sem comprometimento dos resultados obtidos.

O objetivo desse trabalho estava relacionado à determinação e análise do FC sob a forma de um multiplicador, ou uma equação linear obtida por meio de regressão. Existem, no entanto, outras formas de correlacionar dados que, inclusive, podem gerar resultados melhores, em termos de redução dos erros de aproximação, que os resultados obtidos nesse trabalho. No entanto, vale salientar que a utilização de métodos complexos, que gerem estatísticas difíceis de aplicação prática foge aos objetivos da definição de metodologias alternativas, de cunho prático, para aproximação de distâncias em rede por meio de distâncias euclidianas. Basta imaginar a dificuldade de aplicar equações de 3º ou 4º grau na determinação de uma quantidade razoável de pontos. Apesar disso, para trabalhos futuros, sugere-se que sejam analisadas formas alternativas às aqui propostas, para definição do FC, com o objetivo de reduzir ainda mais o erro médio da aplicação prática do fator.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. N. **Logística Aplicada: Suprimento e Distribuição Física**. São Paulo: Edgard Blücher. 2000.

ANDRADE, M. M. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico**. 9ª. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BALLOU, R. H. **Logística Empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física**. 1ª. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

BALLOU, R. H.; RAHARDJA, R.; SAKAI, N. **Selected Country Circuit Factors for Road Travel Distance Estimation**. Transportation Research Part A. Cleveland: Weatherhead School of Management. 2001.

BOTELHO, L. G. Programa de Pós-Graduação em Logística Empresarial. **Um Método Para o Planejamento Operacional da Distribuição**, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

BOTELHO, L. G. **Um Método para o Planejamento Operacional da Distribuição**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Industrial - Programa de Pós-Graduação em Logística Empresarial. 2003.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística Empresarial**. 1ª. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

CAIXETA-FILHO, J. V.; MARTINS, R. S. **Gestão Logística do Transporte de Cargas**. São Paulo: Atlas, 2006.

CERVO, A. L. **Metodologia Científica**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimento**: estratégia, planejamento e operação. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

DELUQUI, K. K. **Roteirização para Veículo de Coleta de Resíduos Sólidos Domiciliares Utilizando um Sistema de Informações Geográficas - SIG**. São Paulo: USP, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Universidade de São Paulo.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística**: para Engenharia e Ciências. 6ª. ed. São Paulo: Pioneira Thomson, 2006.

DIAS, M. A. P. **Administração de Materiais**: uma abordagem logística. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 1993.

FLEURY, P. Gestão Estratégica do Transporte. **Tecnológica**, Rio de Janeiro, 2002.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GURGEL, F. A. **Logística Industrial**. São Paulo: Atlas, 2000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**, 2010. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 Setembro 2010.

MAROCO, J. **Análise Estatística - Com Utilização do SPSS**. 1ª. ed. Lisboa: Sílabo, 2003.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. Brasília - DF: Embrapa - Informação e Tecnologia, 2005.

MONTGOMERY, C.; RUNGER, G. C.; NORMA, F. H. **Estatística Aplicada à Engenharia**. 2ª. ed. Rio de Janeiro RJ: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MOORE, D. S. **A Estatística Básica e sua Prática**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

MOREIRA, D. A. **Administração da Produção e Operações**. 2ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

OLIVEIRA, M. P. G. **Sistema Espacial de Apoio à Decisão**: Modelos para análise do adensamento de atividades econômicas no espaço urbano. Belo Horizonte: FJP, 1997. Dissertação (Mestrado), Escola de Governo de Minas Gerais da Fundação João Pinheiro.

PROCHNIK, V. Cadeias Produtivas e Complexos Industriais. In: HASENCLEVER, L.; KUPFER, D. **Organização Industrial**. Rio de Janeiro: Campus, 2002.

RAZZOLINI FILHO, E. **Transportes e Modais com Suporte de TI e SI**. 2ª. ed. Curitiba: Ibpex, 2009.