

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
‘JULIO DE MESQUITA FILHO’
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DE VIATURAS PARA O
ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS NAS REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Fernando Vladimir Cerna Ñahuis

Ilha Solteira – SP

Fevereiro - 2013

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DE VIATURAS PARA O ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA”

FERNANDO VLADIMIR CERNA ÑAHUIS

Orientador: Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores.

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia FEIS/UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Área de concentração: Automação.

Ilha Solteira – SP

Fevereiro - 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

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

- C415a Cerna Ñahuis, Fernando Vladimir.
Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica / Fernando Vladimir Cerna Ñahuis. – Ilha Solteira : [s.n.], 2013
151 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013
- Orientador: Marcos Julio Rider Flores
Inclui bibliografia
1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Ordens de serviços comerciais nas redes de DEE. 3. Viaturas e equipes de manutenção. 4. Automação do despacho dinâmico de viaturas. 5. Programação linear. 6. Programação linear inteiro-mista.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

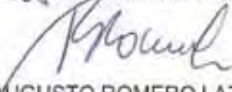
TÍTULO: Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviço nas redes de distribuição de energia elétrica

AUTOR: FERNANDO VLADIMIR CERNA ÑAHUIS

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 22 de fevereiro de 2013.

*A meus Pais por me incentivar em cada
passo deste caminho. E aos meus
irmãos por me apoiarem em tudo.*

AGRADECIMENTOS

A minha Família, pelo apoio total, em especial aos meus Pais e meus Irmãos, sem os quais não seria possível ter chegado a mais uma etapa vencida em minha vida.

Ao meu Orientador **Prof. Dr. Marcos Julio Rider Flores**, um agradecimento especial por toda a competência, disposição e atenção a mim prestada em todos os momentos deste trabalho, e também pela amizade e confiança em mim depositada.

Aos professores **Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin** e **Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro** pela colaboração no desenvolvimento do trabalho.

A todos os docentes e funcionários do **Departamento de Engenharia Elétrica – FEIS/UNESP**, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos do Laboratório (**LaPSEE**) pela excelente convivência e pela amizade ao longo deste trabalho.

Este trabalho contou com o apoio financeiro da **Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira – FEPISA** e das Empresas de Rede de Energia Elétrica através do Projeto.

*Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total,
buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo .*

Airton Senna.

RESUMO

O atendimento comercial aos clientes de uma empresa de distribuição de energia elétrica (DEE) tem como principais ordens de serviços: o religamento de consumidores, corte de fornecimento, atendimento de clientes novos, solicitações dos clientes, entre outros. Para cumprir as ordens de serviços comerciais, as empresas de DEE possuem um grupo de viaturas e equipes de manutenção, localizadas em diversos pontos da cidade, prontas a atender as ordens de serviços comerciais. Os despachos dinâmicos de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de DEE estão dentro da classe de problemas chamados “Alocação Generalizada” e podem ser modelados como problemas de programação linear inteiro-misto (PLIM), e dependendo das ordens de serviços, o número de viaturas e as restrições do problema podem ser considerados de grande porte. O presente trabalho desenvolve uma metodologia para a automação dos despachos dinâmicos com deslocamento de viaturas e suas equipes para o atendimento das ordens de serviços. O objetivo desta metodologia é hierarquizar o conjunto de ordens de serviços e atribuí-las a todas as viaturas disponíveis, segundo os critérios considerados pela empresa de DEE no período de trabalho diário e horas extras se fossem necessárias, abrangendo assim a maior quantidade de atendimentos possíveis com a consequente diminuição do tempo de duração das interrupções e a melhora do indicador coletivo DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) de acordo com as metas estipuladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANNEE). A metodologia proposta foi testada na área de concessão da Rede de Energia Caiuá na cidade de Presidente Prudente para dois casos básicos, considerando um 50% de ocorrências emergenciais e obtendo-se no primeiro caso um número de atendimentos totais, abrangendo todos os atendimentos emergenciais, gerando gastos mínimos para empresa concessionária. Já no segundo caso são atendidas todas as ocorrências e devido ao número maior de viaturas não se gerou gastos para a concessionária, esta metodologia pode ser aplicada para outras redes de infraestrutura semelhante como: atendimento médico por ambulâncias, policiamento ou segurança privada, controle de incêndios pelo corpo de bombeiros, infraestrutura da rede de telefonia.

Palavras-chave: Ordens de serviços comerciais nas redes de DEE. Viaturas e equipes de manutenção. Automação do despacho dinâmico de viaturas. Programação linear inteiro-mista.

ABSTRACT

The commercial attendance to clients of a company distribution of electrical energy (DEE) has as main service orders: reconnection of consumers, cutting the supply, new clients attendance, request from clients, among others. To meet the orders of commercial services the DEE companies have a group of vehicles and maintenance equipment, located at different points of the city, ready to meet the orders of commercial service. The dynamics dispatches of vehicles to the attendance of the orders of services in networks of distributions of electric power are within the general allocation problem and can be modeled as a linear programming problem mixed integer (PLIM) and depending on the services orders, the number of vehicles and the constraints of the problem can be considered large scale. The present work develops a methodology for automation of dynamic dispatch with displacement of vehicles to meet the orders from commercial services. The objective of this methodology is the set of hierarchize orders of commercial services and assign them to all vehicles available, according to the criteria considered in the daily work period and overtime if the were necessary (in case of emergencies attendance) so as to cover the most possible amount of attendances with the consequent reduction of time duration of the interruptions and improving the collective indicator DEC (equivalent duration of interruption per consumer unit) according to the targets stipulated by the national electric energy agency (ANEEL). The proposed methodology was tested in the concession area of the power grid Caiuá in the city of Presidente Prudente for two basic cases, considering one 50% emergency occurrences and obtaining in the first case a total number of attendances, covering all emergency attendances, generating minimal expense to the concessionary. In the second case are met and all the occurrences due to the increased number of vehicles not generated expenses for concessionary the methodology proposed can be applied to network infrastructure such as: medical care by ambulance, police or private security, control of fires by the fire brigade, infrastructure of the telephone network or even the electric network, presenting results quite satisfactory as the case here approached.

Keywords: Orders of services in networks of distributions of electric power. Vehicles and maintenance equipments. Automation of dynamic dispatch vehicles. Mixed integer linear programming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Áreas de Concessão da Rede Caiuá.....	29
Figura 2:	Linhas de Tempos para Gestão de Consumidores.....	30
Figura 3:	Porção de área de concessão em estudo (Cidade Presidente Prudente).....	31
Figura 4:	Representação do vértice (nó) e ligação (arco) para uma via disponível.	32
Figura 5:	Grafo não Orientado - Porção da área de concessão em estudo.	32
Figura 6:	Grafo não Orientado Simplificado Representativo.....	32
Figura 7:	Representação do sentido do trânsito como Mão única.....	33
Figura 8:	Representação do sentido do trânsito como Mão dupla.	34
Figura 9:	Sentido do trânsito: Desde o vértice '1' até '10', a seus vértices adjacentes - Ver Tabela 1.	35
Figura 10:	Sentido do trânsito: Desde o vértice '91' até '100', a seus vértices adjacentes - Ver Tabela 2	36
Figura 11:	Representação das Distancias entre os vértices do Modelos Simplificado.	37
Figura 12:	Distancias dos vértices '1' até '10', a seus vértices adjacentes.	40
Figura 13:	Distancias dos vértices '91' até '100', a seus vértices adjacentes.	40
Figura 14:	Representação dos Valores das Velocidades Promedio segundo o tipo de via apresentada no Modelo Simplificado.	41
Figura 15:	Velocidades Promedio do vértice '1' até '10', a seus vértices adjacentes.....	44
Figura 16:	Velocidades Promedio do vértice '91' até '100', a seus vértices adjacentes.....	44
Figura 17:	Representação das Sinais de trânsito para o Modelo Simplificado da Cidade.	45
Figura 18:	Sinais de trânsito para o vértice '1' até '10', a seus vértices adjacentes.....	48
Figura 19:	Sinais de trânsito para o vértice '91' até '100', a seus vértices adjacentes.....	49
Figura 20:	Expressão somatório para o vértice da Origem.	58
Figura 21:	Expressão somatório para o vértice de Destino.....	59
Figura 22:	Caminho com menor tempo de demora entre o vértice '1' e '7'.....	59
Figura 23:	Diagrama de fluxo da matriz viatura – ocorrência (MVO).	62
Figura 24:	Diagrama de fluxo da matriz ocorrência – ocorrência (MOO).....	63
Figura 25:	Diagrama de fluxo da matriz ocorrência – viatura (MOV).	65
Figura 26:	Sequência de atendimentos.....	69
Figura 27:	Sequência de atendimentos com custo por horas extra.	70
Figura 28:	Sequência de atendimentos com tempos de excesso ou limite de reparo.....	71

Figura 29: Sequência de atendimentos com capacidade e tipos de atendimento.	71
Figura 30: Sequência de atendimentos com valor de prioridades.	74
Figura 31: Tempos de atendimentos indicados nas posições das ocorrências.	76
Figura 32: Deslocamentos até os primeiros atendimentos feitos pelas respectivas viaturas. .	77
Figura 33: Deslocamentos entre atendimentos feitos pelas viaturas.	78
Figura 34: Deslocamentos das viaturas do ultimo atendimento até a garagem.	81
Figura 35: Tempos totais para a sequência de atendimentos da viatura ‘1’	83
Figura 36: Tempos totais para a sequência de atendimentos da viatura ‘2’	84
Figura 37: Análise para 6 viaturas e 12 ocorrências – 50% de atendimentos emergenciais. ...	92
Figura 38: Percorrido da viatura ‘1’ para a sequência de atendimentos.	96
Figura 39: Percorrido da viatura ‘2’ para a sequência de atendimentos.	99
Figura 40: Percorrido da viatura ‘3’ para a sequência de atendimentos.	101
Figura 41: Percorrido da viatura ‘4’ para a sequência de atendimentos.	104
Figura 42: Percorrido da viatura ‘5’ para a sequência de atendimentos.	106
Figura 43: Percorrido da viatura ‘6’ para a sequência de atendimentos.	108
Figura 44: Consumidores atingidos pelo defeito vs. horas sem fornecimento de EE.	111
Figura 45: Análise para 12 viaturas e 6 ocorrências – 50% de atendimentos emergenciais. ...	112
Figura 46: Percorrido da viatura ‘7’ para a sequência de atendimentos.	115
Figura 47: Percorrido da viatura ‘9’ para a sequência de atendimentos.	118
Figura 48: Percorrido da viatura ‘11’ para a sequência de atendimentos.	120
Figura 49: Percorrido da viatura ‘12’ para a sequência de atendimentos.	123
Figura 50: Consumidores atingidos pelo defeito vs. Horas sem fornecimento de EE.	125
Figura 51: Exemplo de Grafos.	131
Figura 52: Exemplo de Hipergrafos.	131
Figura 53: Exemplo de Grafo Rotulado (a) e Grafo Ponderado (b).	132
Figura 54: Exemplo de Grafo direcionado.	132
Figura 55: Exemplo de Grafo Bipartido.	133
Figura 56: Exemplo de Grafo Completo K4 (a) e K33 (b).	133
Figura 57: (a) Matriz de Adjacência do Grafo ‘G’, (b) Grafo ‘G’	134
Figura 58: (a) Matriz de Incidência do Grafo ‘G’ - Grafo Direcionado ‘G’	135
Figura 58: (b) Matriz de Incidência do Grafo ‘G’ – Grafo não Direcionado ‘G’	135
Figura 59: (a) Lista Encadeada do Grafo ‘G’, (b) – Grafo não Direcionado ‘G’	135
Figura 60: (a) Representação Vetorial do Grafo ‘G’, (b) Grafo não Direcionado ‘G’.	136
Figura 61: Definição de Conjuntos de Unidades Consumidoras.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Lista de adjacência desde o vértice '1' até '90', a seus vértices adjacentes.....	34
Tabela 2:	Lista de adjacência desde o vértice '91' até '178', a seus vértices adjacentes.....	35
Tabela 3:	Lista de distancias desde o vértice '1' até '36', a seus vértices adjacentes.....	37
Tabela 4:	Lista de distancias desde o vértice '37' até '72', a seus vértices adjacentes.....	38
Tabela 5:	Lista de distancias desde o vértice '73' até '108', a seus vértices adjacentes.....	38
Tabela 6:	Lista de distancias desde o vértice '109' até '144', a seus vértices adjacentes.....	39
Tabela 7:	Lista de distancias desde o vértice '145' até '178', a seus vértices adjacentes.....	39
Tabela 8:	Lista de velocidades desde o vértice '1' até '36', a seus vértices adjacentes.....	41
Tabela 9:	Lista de velocidades desde o vértice '37' até '72', a seus vértices adjacentes.....	42
Tabela 10:	Lista de velocidades desde o vértice '73' até '108', a seus vértices adjacentes.....	42
Tabela 11:	Lista de velocidades desde o vértice '109' até '144', a seus vértices adjacentes.....	43
Tabela 12:	Lista de velocidades desde o vértice '145' até '178', a seus vértices adjacentes.....	43
Tabela 13:	Lista de sinais desde o vértice '1' até '36', a seus vértices adjacentes.....	46
Tabela 14:	Lista de sinais desde o vértice '37' até '72', a seus vértices adjacentes.....	46
Tabela 15:	Lista de sinais desde o vértice '73' até '108', a seus vértices adjacentes.....	47
Tabela 16:	Lista de sinais desde o vértice '109' até '144', a seus vértices adjacentes.....	47
Tabela 17:	Lista de sinais desde o vértice '145' até '178', a seus vértices adjacentes.....	48
Tabela 18:	Conjunto de ligações ' Ω_a ' - vértices ' Ω_n ' e dados.....	60
Tabela 19:	Equivalência dos valores binarios das variáveis $X_{i,j,t}$ e $X_{i,k,t-1}$	78
Tabela 20:	Equivalência dos valores binarios das variáveis $\delta_{i,t}$ e $X_{i,j,t}$	81
Tabela 21:	Valores numéricos e significados dos tipos de atendimentos.....	92
Tabela 22:	Dados das posições das viaturas e ocorrências - fase '1'.....	93
Tabela 23:	Dados a considerar para os atendimentos a ser feitos pelas viaturas - fase '2'.....	93
Tabela 24:	Resultados fornecidos pelo modelo - MVO - fase '1'.....	94
Tabela 25:	Resultados fornecidos pelo modelo - MOO - fase '1'.....	94
Tabela 26:	Resultados fornecidos pelo modelo - MOV - fase '1'.....	94
Tabela 27:	Resultados fornecidos pelo modelo - $X_{i,j,t}$ - fase '2'.....	95
Tabela 28:	Resultados fornecidos pelo modelo - "h", "TDI" e "EXC" - fase '2'.....	95
Tabela 29:	Viatura '1' garagem - primeiro atendimento.....	96
Tabela 30:	Viatura '1' primeiro atendimento - segundo atendimento.....	97
Tabela 31:	Viatura '1' segundo atendimento - terceiro atendimento.....	98

Tabela 32:	Viatura '1' terceiro atendimento - garagem.	98
Tabela 33:	Viatura '2' garagem - primeiro atendimento.	99
Tabela 34:	Viatura '2' primeiro atendimento - segundo atendimento.	100
Tabela 35:	Viatura '2' segundo atendimento - garagem.	101
Tabela 36:	Viatura '3' garagem - primeiro atendimento.	102
Tabela 37:	Viatura '3' primeiro atendimento - segundo atendimento.	102
Tabela 38:	Viatura '3' segundo atendimento - terceiro atendimento.	103
Tabela 39:	Viatura '3' terceiro atendimento - garagem.	104
Tabela 40:	Viatura '4' garagem - primeiro atendimento.	105
Tabela 41:	Viatura '4' primeiro atendimento - garagem.	105
Tabela 42:	Viatura '5' garagem - primeiro atendimento.	107
Tabela 43:	Viatura '5' primeiro atendimento - garagem.	107
Tabela 44:	Viatura '6' garagem - primeiro atendimento.	108
Tabela 45:	Viatura '6' primeiro atendimento - segundo atendimento.	109
Tabela 46:	Viatura '6' segundo atendimento - garagem.	110
Tabela 47:	Dados das posições das viaturas e ocorrências - fase '1'.	112
Tabela 48:	Dados a considerar para os atendimentos a ser feitos pelas viaturas - fase '2'. ..	113
Tabela 49:	Resultados fornecidos pelo modelo - MVO - fase '1'.	113
Tabela 50:	Resultados fornecidos pelo modelo - MOO - fase '1'.	113
Tabela 51:	Resultados fornecidos pelo modelo - MOV - fase '1'.	114
Tabela 52:	Resultados fornecidos pelo modelo - $X_{i,j,t}$ - fase '2'.	114
Tabela 53:	Resultados fornecidos pelo modelo "h", "TDI" e "EXC" - fase '2'.	114
Tabela 54:	Viatura '7' garagem - primeiro atendimento.	116
Tabela 55:	Viatura '7' primeiro atendimento - segundo atendimento.	116
Tabela 56:	Viatura '7' segundo atendimento - garagem.	117
Tabela 57:	Viatura '9' garagem - primeiro atendimento.	118
Tabela 58:	Viatura '9' primeiro atendimento - segundo atendimento.	119
Tabela 59:	Viatura '9' segundo atendimento - garagem.	119
Tabela 60:	Viatura '11' garagem - primeiro atendimento.	121
Tabela 61:	Viatura '11' primeiro atendimento - garagem.	122
Tabela 62:	Viatura '12' garagem - primeiro atendimento.	123
Tabela 63:	Viatura '12' primeiro atendimento - garagem.	124

LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{i,j,t}$	Variável binária secundária de operação interna do modelo – fase ‘2’ utilizada na linealização do produto das variáveis $X_{i,j,t}$ e $\delta_{i,t}$.
$\beta_{i,t}$	Variável binária secundária de operação interna do modelo – fase ‘2’ que relaciona o estado da viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$ numa determinada ordem ‘ t ’ $\forall t \in \Omega_t$.
Ca_j	Número de consumidores atingidos pela ocorrência ‘ j ’ $\forall j \in \Omega_o$.
Cs	Número total de consumidores existentes na área em estudo.
ct_i	Custo adicional pela demora da viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$ em atender à ocorrência ‘ j ’ $\forall j \in \Omega_o$ em reais R\$.
ds_{ij}	Valor da distância do trecho ‘ (i,j) ’ $\forall (i,j) \in \Omega_a$ em Km.
DEC_{max}	Limite máximo do valor de DEC estabelecido no modelo.
$\delta_{i,t}$	Variável binária secundária de operação interna do modelo – fase ‘2’ que relaciona o estado da viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$ numa determinada sequência de ordens ‘ t ’ e ‘ $t + 1$ ’ $\forall t \in \Omega_t$ segundo os valores de $\beta_{i,t}$.
EXC_j	Tempo de excesso sobre o valor do parâmetro TDI_{max_j} .
h_i	Número de horas extras feitas por cada viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$.
hr_i	Horário de trabalho de cada viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$ em horas.
kp_i	Capacidade de atendimento da viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$.
$\lambda_{i,j,k,t}$	Variável binária secundária de operação interna do modelo – fase ‘2’ utilizada na linealização do produto das variáveis TDI_k e $Z_{i,j,k,t}$.
ml_j	Multa à viatura ‘ i ’ $\forall i \in \Omega_v$ por não atender à ocorrência não emergencial ‘ j ’ $\forall j \in \Omega_o$ em reais R\$.
$MULT_j$	Multa por ultrapassar o valor de TDI_{max_j} estabelecido ‘ j ’ $\forall j \in \Omega_o$ em reais R\$.
$MULT_{DEC}$	Valor de multa por ultrapassar o limite máximo do valor de DEC_{max} estabelecido.
M	Número de horas limites para efetuar os atendimentos.
N	Número de ocorrências no período em estudo.
ne_{ij}	Número de escolas presentes no trecho ‘ (i,j) ’ $\forall (i,j) \in \Omega_a$.

nf_{ij}	Número de faixas de pedestres presentes no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$.
ns_{ij}	Número de semáforos presentes no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$.
$ntipo_i$	Vetor característico para cada tipo de vértice com valores: '1' para a origem, '-1' o destino e '0' em outro caso.
Ω_n	Conjunto de vértices ' i ' do modelo simplificado da cidade.
Ω_a	Conjunto de ligações ' (i, j) ' do modelo simplificado da cidade.
Ω_v	Conjunto de viaturas ' i ' disponíveis.
Ω_o	Conjunto de ocorrências ' j ' a ser atendidas.
Ω_t	Conjunto ordinal ' t ' no qual a viatura ' i ' atende à ocorrência ' j '.
pd_j	Prioridade de cada ocorrência ' j ' $\forall j \in \Omega_o$ valor binário.
tp_{eij}	Tempo de demora pela presença de escolas no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$ em horas.
tp_{fij}	Tempo de demora pela presença de faixas de pedestres no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$ em horas.
tp_{sij}	Tempo de demora pela presença de semáforos no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$ em horas.
ta_j	Tempo de atendimento de cada ocorrência ' j ' $\forall j \in \Omega_o$ em horas.
tpa_j	Tipo de atendimento da ocorrência ' j ' $\forall j \in \Omega_o$.
$tipo_i$	Vetor característico para cada tipo de vértice cujo valor inicial é zero.
TDI_{max_j}	Tempo máximo de demora em atender uma ocorrência emergencial ' j ' $\forall j \in \Omega_o$ em horas.
TDI_j	Tempo total de demora em atender à ocorrência emergencial ' j ' $\forall j \in \Omega_o$.
vp_{ij}	Velocidade promedio permitida no trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$ em Km/h.
$W_{i,j}$	Variável binária principal do modelo – fase '1' indica que uma viatura ' u ' num percorrido considera ou não um trecho ' (i, j) ' $\forall (i, j) \in \Omega_a$.
$X_{i,j,t}$	Variável binária principal do modelo – fase '2' indica que uma viatura ' i ' $\forall i \in \Omega_v$ que atende à ocorrência ' j ' $\forall j \in \Omega_o$ na ordem ' t ' $\forall t \in \Omega_t$.
$Z_{i,j,k,t}$	Variável binária secundaria de operação interna do modelo – fase '2' utilizada na linealização do produto das variáveis $X_{i,j,t}$ e $X_{i,k,t-1}$.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica.
AMPL	Uma linguagem de modelagem para programação matemática.
COPEL	Companhia paranaense de energia elétrica.
CEB	Companhia elétrica de Brasília.
CAC	Centro de atendimento ao cliente.
DEC	Duração Equivalente da interrupção por unidade consumidora.
DIC	Duração da Interrupção por unidade consumidora.
DMIC	Duração máxima da interrupção por unidade consumidora.
END	Energia não distribuída.
FEC	Frequência equivalente da interrupção por unidade consumidora.
FIC	Frequência da Interrupção por unidade consumidora.
MVO	Matriz viatura - ocorrência.
MOO	Matriz ocorrência - ocorrência.
MOV	Matriz ocorrência - viatura.
PL	Problema linear.
PLI	Problema linear inteiro.
PLIM	Problema linear inteiro misto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	Revisão Bibliográfica.....	24
1.2	Objetivos.....	27
1.3	Organização.....	28
2	O PROBLEMA DE AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DAS VIATURAS PARA O ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	29
2.1	Introdução.	29
2.1.1	<i>Gestão de atendimento ao cliente.....</i>	<i>31</i>
2.2	Modelagem da área de concessão.....	31
2.3	Modelagem dos elementos da área de concessão.	33
2.3.1	<i>Sentido do trânsito (mão única ou mão dupla) – Lista de Adjacência.....</i>	<i>33</i>
2.3.2	<i>Valores de distâncias das vias (ruas, avenidas, passeios, etc) – Lista de Distâncias.....</i>	<i>36</i>
2.3.3	<i>Velocidade promedio no trânsito – Lista de Velocidades.....</i>	<i>40</i>
2.3.4	<i>Presença dos sinais de trânsito (escolas, faixas de pedestres e semáforos) – Lista de Sinais.....</i>	<i>44</i>
3	METODOLOGIA PROPOSTA PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DAS VIATURAS PARA O ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.	50
3.1	Introdução.	50
3.2	Noções Preliminares.	51
3.2.1	<i>Fase 1: Modelo de Geração de Matrizes de Tempos de Demora.....</i>	<i>51</i>
3.2.2	<i>Fase 2: Modelo para o Atendimento das Ocorrências.....</i>	<i>54</i>
3.3	Formulação Matemática do Modelo Proposto.....	57
3.3.1	<i>Fase 1: Modelo de Geração de Matrizes de Tempos de Demora.....</i>	<i>57</i>
3.3.2	<i>Fase 2: Modelo para o Atendimento das Ocorrências.....</i>	<i>65</i>

4	TESTES E RESULTADOS.	91
4.1	Introdução.	91
4.2	Caso 1: Análise para 6 viaturas e 12 ocorrências – com 50% de Atendimentos Emergenciais.	92
4.3	Caso 2: Análise para 12 viaturas e 6 ocorrências – com 50% de Atendimentos Emergenciais.	111
5	CONCLUSÕES.....	126
5.1	Trabalhos futuros.	128
	REFERÊNCIAS.....	129
	APÊNDICE A: TÓPICOS EM TEORIA DOS GRAFOS.	131
	APÊNDICE B: PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA E INTEIRA MISTA..	137
	APÊNDICE C: TÓPICOS DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO.....	145

1 INTRODUÇÃO

A manutenção é um processo vital para o bom desempenho do sistema elétrico e para o alcance dos níveis de qualidade de serviço de energia elétrica, especificados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Esta interage com praticamente todas as áreas da empresa concessionária tais como área de atendimento, comercial, construção, operação e engenharia (TELLES, et al. 2005).

A manutenção da rede de distribuição é um dos pontos críticos do serviço de fornecimento de energia elétrica, dada a grande extensão da rede na sua maior parte aérea. Para um bom funcionamento da manutenção se requer planejamento, acompanhamento e controle, definição de estratégias, metas e objetivos, além da cultura de registro ou armazenamento dos dados, cadastro das alterações e ações, de modo que o retorno das informações possibilite a realimentação do processo e a conclusão do ciclo, tornando-se eficaz e eficiente o processo. Com a reforma institucional introduzida nos últimos anos, a qualidade do fornecimento de energia elétrica tornou-se ainda mais importante para as empresas, já que é única a rede que serve ao consumidor (TELLES, et al. 2005).

Neste contexto, o volume de solicitações dos usuários das empresas concessionárias de energia elétrica é bastante significativo, além disso, variável de acordo com a hora do dia (diurno ou noturno), dia da semana (útil ou final de semana), estação do ano (seca ou chuvosa), localização do cliente (condições dos equipamentos da rede), dentre outros. Há ainda os dias considerados totalmente atípicos, com ventos e tempestades, que ocorrem esporadicamente, ocasionando danos em vários locais da rede elétrica simultaneamente. Sendo assim, as tarefas de dimensionar as equipes de trabalho das concessionárias para uma cidade/agência/rota, assim como a de despachar/designar a viatura mais próxima disponível e com o equipamento necessário para atender a uma determinada ocorrência são extremamente árduas e complexas para os operadores das referidas empresas concessionárias. O número de viaturas e as equipes devem mudar de acordo com as variações das solicitações, ou seja, serão dependentes da hora do dia, do mês, da estação do ano e outros, e no despacho devem considerar os “melhores” trajetos de acordo com as distâncias (entre os locais das ocorrências e das viaturas), tráfego, semáforos e outros (STEINER, et al. 2006).

O desempenho da empresa concessionária de distribuição, quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica, é avaliado pela ANEEL com base em indicadores coletivos e individuais, sendo o DEC e FEC os indicadores coletivos, acompanhados pela ANEEL. O DEC (Duração Equivalente da interrupção por Unidade Consumidora) indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia durante um período, geralmente o mês ou o ano. Já o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria, etc.) durante um período.

Os valores das metas de qualidade são estabelecidos na revisão tarifária periódica de cada empresa distribuidora, que ocorre normalmente a cada quatro anos. No estabelecimento das metas é aplicada uma análise comparativa de desempenho das concessionárias, a partir de atributos físico-elétricos e dados históricos de DEC e FEC, que refletem o nível de qualidade da área em questão.

A duração equivalente das interrupções (DEC) esta ligada à operação e manutenção das redes e à eficiência para recuperar o sistema após cada interrupção, o que depende do número de viaturas, da qualificação da equipe, do nível de automação etc. Este indicador esta relacionado principalmente ao custo operacional da distribuidora, pois reflete em grande parte o custo com a implantação e o gerenciamento das viaturas com as equipes de manutenção.

A frequência equivalente das interrupções (FEC) caracteriza a fragilidade do sistema frente ao meio ambiente (causas externas) e à degradação por envelhecimento e/ou falta de manutenção adequada. O FEC está relacionado principalmente aos investimentos em equipamentos e redes.

Para definir as metas de qualidade, a área de concessão de cada empresa é subdividida em conjuntos consumidores ou unidades consumidoras definidas pela concessionária e aprovados pela ANEEL.

Além dos indicadores coletivos (DEC e FEC), as distribuidoras devem acompanhar as interrupções ocorridas em cada unidade consumidora. Para isto, são apurados os indicadores de continuidade individual, DIC, FIC e DMIC. Os indicadores DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora)

indicam por quanto tempo e o número de vezes, respectivamente, que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. O DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe ao consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo.

Todas as empresas de distribuição de energia elétrica possuem um grupo de viaturas com equipes de manutenção, localizadas em diversos pontos da concessão, prontas para realizar os atendimentos das ordens de serviços de um sistema. Um dos problemas das empresas de cumprirem, ou mesmo melhorarem, seus índices de DEC é o tempo de atendimento das ordens de serviços pelas suas viaturas ao longo de uma jornada de trabalho.

Sendo assim diversos fatores devem ser levados em consideração, por exemplo:

- Nem sempre a viatura que está mais próxima da área atingida de atendimento possui todos os equipamentos necessários para o atendimento (LAMBERT, et al. 2004).
- Nem sempre a viatura que está mais próxima, mesmo possuindo todos os equipamentos necessários para o atendimento, é a melhor, pois problemas como tempo já trabalhando pela equipe no dia (gerando horas-extras) ou outro atendimento prioritário que deva ser atendido pode mudar esta escolha (LAMBERT, 2004).
- Nem sempre a viatura que está mais próxima no trajeto retilíneo, chegará à área de atendimento mais rapidamente. A presença de saída de escolas, semáforos, radares e faixas de pedestres pode mudar esta escolha.
- Problemas de engarrafamento ou simples aglomeração de horários de picos podem também alterar a solução da melhor viatura.
- Valores dos tempos de atendimento podem mudar a escolha da viatura segundo seja o tipo de atendimento a ser feito no local.
- Características como o grau de prioridade de cada atendimento no horário de trabalho será um fator determinante para atribuir atendimentos a cada viatura disponível.

- A importância do limite de tempo de reparo estabelecido para cada atendimento de grau prioritário pode ter influência na escolha da melhor viatura devido a que se dispõe de um tempo marcado para resolver o problema.
- Os valores de multa por não realizar o atendimento, tanto como por ultrapassar os valores limites de reparo fazem com que se mude a atribuição dos atendimentos às viaturas disponíveis que apresentam a melhor alocação com respeito ao ponto onde foi atingida a rede de DEE.

1.1 Revisão bibliográfica

Dentre os trabalhos relativos à automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica destacam-se os seguintes:

No trabalho apresentado por Lambert et al. (2004) descreve-se o desenvolvimento de rotinas inteligentes para determinar qual viatura que deve atender o defeito tendo em conta fatores como vias disponíveis na cidade, tráfego, horários de pico e engarrafamentos, entre outros. O objetivo principal é minimizar o tempo de atendimento ao defeito composto pelo tempo de deslocamento da viatura mais o tempo de reparo. Para isto desenvolve dois pacotes computacionais: (1) O Programa de Desenvolvimento, utilizado na modelagem de base de dados, desenvolvimento de rotinas numéricas, confecção de interface com o usuário e desenvolvimento de sistemas especialistas para o auxílio na tomada de decisão respectivamente e (2) O Programa Operacional que basicamente serve como otimizador das rotinas de (1) para ter respostas mais rápidas na solução do problema. Neste trabalho as rotinas numéricas integram diversos tipos de técnicas como: (a) Processo de Busca Baseado em Heurísticas, utilizado para decidir qual entre diversas alternativas de caminhos promete ser mais eficaz; (b) Processo de Busca Via Sistemas Especialistas Difusos, incluem procedimentos de avaliação mediante teoria dos conjuntos difusos; (c) Processo de Busca Integrando Técnicas de Algoritmos Genéticos, sendo esta parte integrada aos sistemas especialistas difusos mediante módulos específicos. A metodologia proposta foi aplicada à Companhia Elétrica de Brasília (CEB), obtendo assim uma constante otimização das ações e procedimentos de supervisão e controle do sistema.

No artigo apresentado por Telles et al. (2005) os autores tratam sobre o gerenciamento da manutenção da rede de distribuição mediante o desenvolvimento do software SGM (Sistema Integrado de Gerenciamento da Manutenção de Redes de Distribuição) tendo como objetivo principal estabelecer as diretrizes para a programação da manutenção preventiva o qual considera que trará ao longo prazo um menor custo global da manutenção. O software SGM permite o acesso às atividades de planejamento da manutenção, inspeção, elaboração dos planos, facilitando o controle e avaliação da manutenção das redes de distribuição em quatro níveis: Estratégico, Tático, Gerencial e Operacional.

No trabalho apresentado por Steiner et al. (2006) se propõe uma metodologia mediante técnicas de pesquisa operacional aplicada à logística de atendimento aos usuários da rede de distribuição de energia elétrica na qual desenvolveram um modelo matemático de Programação Linear Inteira e o Algoritmo de Floyd para o dimensionamento e despacho das equipes de atendimento respectivamente, tendo como principal objetivo o atendimento ao maior número de usuários com a consequente redução dos custos envolvidos no processo e melhorando os índices de qualidade de acordo com as metas estipuladas pela ANNEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica).

Segundo Belfiore e Fávero et al. (2006) em seu artigo titulado Problema de Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas faz-se uma revisão da literatura sobre os principais métodos de solução encontrados para os Problemas de Roteirização de Veículos com entregas fracionadas e suas extensões como o Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas, Problema de Roteirização de Veículos com Demandas de Arcos, Janelas de Tempos e Entregas Fracionadas. Os métodos de solução são classificados em três categorias: Métodos Exatos que garantem a solução ótima do problema, Métodos Heurísticos que não garantem a solução ótima, mas geralmente resultam em soluções sub-ótimas de grande qualidade a um esforço computacional menor, e métodos emergentes que reúnem técnicas mais recentes e avançadas como as Metaheurísticas, Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, Simulated Annealing, etc.

No trabalho desenvolvido por Mauri (2006) apresenta-se um modelo matemático geral e multi-objetivo para o problema de roteirização e programação de veículos de forma estática onde todas as requisições são conhecidas a priori, entre outras considerações como múltiplos

veículos, frota heterogênea possuindo cada veículo uma capacidade distinta e garagens múltiplas onde cada veículo começa e termina a rota em garagens específicas. O modelo apresentado objetiva gerar roteiros que sejam econômicos do ponto de vista operacional e que satisfaçam à demanda dos clientes.

No trabalho apresentado por Santos (2007) propõe-se a variante do problema de programação de horários professor-turma, em três partes: na primeira, apresenta uma nova heurística híbrida baseada em Busca Tabu, na segunda parte considera técnicas de programação linear inteira mista para a obtenção de quadros de horários provadamente ótimos, e finalmente na terceira parte é explorada a sinergia entre heurísticas e métodos exatos, através da resolução ótima de subproblemas em quadros de horários construídos heurísticamente, obtendo assim uma produção automatizada de quadros de horários mediante as versões sofisticadas, sendo este trabalho uma referência significativa para implementação da estrutura do nosso modelo em desenvolvimento.

O artigo apresentado por Prata et al. (2008) propõe um modelo baseado em Redes de Petri Coloridas que objetiva em avaliar o desempenho dos sistemas de atendimento emergencial em redes de distribuição elétrica, aplicando esta técnica robusta de modelagem num entorno de teste baseado em dados do sistema real e fazendo análise mediante indicadores de Eficiência como: tempo médio e máximo para normalização de incidências assim como taxas de ocorrências atendidas e ocupação de viaturas, entre outros. Este modelo desenvolvido considera os processos de chegada, detecção e normalização das ocorrências para avaliação do desempenho de dito sistema.

Já Teles et al. (2010) desenvolve um trabalho baseado em Sistemas Multi-agentes como apoio à tomada de decisão inteligente que tem como finalidade auxiliar aos elementos despachantes das companhias elétricas na alocação de viaturas para o atendimento nas falhas na rede elétrica. Neste sistema automatiza-se o conhecimento que se tem como base para realizar sugestões e soluções tendo como consequência o aumento na velocidade de atendimento das ocorrências, minimização do tempo que o usuário fica sem fornecimento, e redução considerável dos custos operativos. A estrutura básica do sistema multi-agente apresenta um agente especializado em receber dados do usuário chamado gente comunicador que interage com os agentes viatura, despachante e teste estabelecendo assim um processo de suporte ao trabalho desenvolvido.

Na dissertação de Amorim (2010) é proposto o desenvolvimento de uma metodologia baseada em técnicas de mineração de dados e o emprego de metaheurísticas para a alocação de equipes de emergência. A ferramenta computacional tem como objetivo otimizar as rotas das equipes indicando a sequência de atendimento das ocorrências num sistema de distribuição elétrica, sendo possível isto em três etapas: A primeira utiliza um algoritmo convencional para gerar parâmetros das ocorrências que juntamente com as equipes disponíveis compõem os dados de entrada. A segunda utiliza um algoritmo de mineração de dados para formação de grupos de ocorrências tendo em consideração as proximidades entre as mesmas e a terceira define a sequência de atendimentos de cada grupo de ocorrências utilizando algoritmos evolutivos obtendo assim rotas otimizadas e auxiliando na atividade de atendimentos emergenciais, proporcionando melhoria na qualidade dos atendimentos e a redução de custos operacionais.

No artigo de Patias Volpi et al. (2011) é proposta uma ferramenta computacional para o atendimento de defeitos em redes de distribuição de energia elétrica que utiliza informações de banco de dados que controlam as solicitações como tipo de serviço solicitado, identificação do cliente, a localização geográfica do mesmo como também dados das equipes disponíveis, considerando como critérios para a análise: O número de consumidores afetados em cada serviço, a distância de cada equipe aos serviços em espera e as metas de atendimento. O sistema que foi proposto objetiva em otimizar a ocupação das equipes disponíveis, alocando-as nas regiões de atendimento de tal modo que a concessionária e os consumidores sejam beneficiados.

1.2 Objetivos

- Apresentar uma metodologia de solução eficiente para resolver o problema de automação do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de DEE mediante um modelo matemático de programação linear inteira mista.
- Desenvolver uma ferramenta computacional que visa hierarquizar o conjunto de ordens de serviços comerciais e atribuí-las a todas as viaturas disponíveis, no período de trabalho diário considerando aspectos como: mapa

georeferenciado da cidade, vias disponíveis da cidade, sentido do trânsito, saída de escolas, semáforos, faixas de pedestres, velocidade máxima do trânsito, número de viaturas e equipes disponíveis para cada tipo de serviço, tempo de reparo de cada ocorrência, grau de prioridades de cada ocorrência, origem de serviço (empresa ou consumidor), manter dentro dos prazos de limite de reparo, valor de multa, gravidade da ocorrência, e o tempo de deslocamento entre a localização da viatura e o local de atendimento.

- Re-ordenamentos das ordens de serviços por cada nova ordem gerada, realizando assim uma nova atribuição a todas as viaturas disponíveis mediante a ferramenta computacional desenvolvida.

1.3 Organização

Na seção 2 é modelado o problema de automação do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica dando uma visão geral do mesmo.

Na seção 3 são apresentadas as fases de solução que compõem a metodologia proposta para a solução do problema.

Na seção 4 são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta utilizando a área de concessão da Rede de Energia Caiuá na cidade Presidente Prudente e uma análise relevante dos resultados.

Na seção 5 são mostradas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

O apêndice A: apresentam-se os tópicos em teoria dos grafos.

O apêndice B: apresentam-se os conceitos sobre programação linear inteira mista.

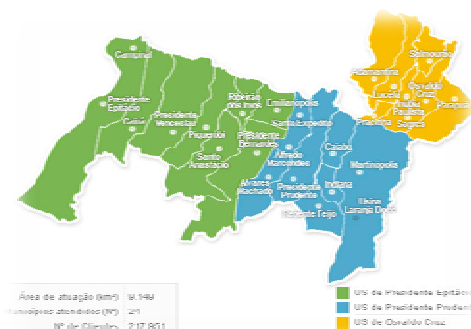
O apêndice C: apresentam-se os tópicos de continuidade de fornecimento.

2 O PROBLEMA DE AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DAS VIATURAS PARA O ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Introdução

A Caiuá, no estado de São Paulo (Centro - Oeste) possui uma área de concessão de 9.149 Km² e atende a uma população de mais de 700 mil habitantes em 24 municípios da Alta Sorocabana e Alta Paulista (ver figura 1). São eles: Adamantina, Alfredo Marcondes, Álvares Machado, Caiabu, Caiuá, Emilianópolis, Indiana, Inúbia Paulista, Lucélia, Martinópolis, Osvaldo Cruz, Parapuã, Piquerobi, Pracinha, Presidente Bernardes, Presidente Epitácio, Presidente Prudente, Presidente Venceslau, Regente Feijó, Ribeirão dos Índios, Sagres, Salmourão, Santo Anastácio e Santo Expedito sendo que cada município possui seus conjuntos de consumidores que, por sua vez, possuem as suas metas de atendimento.

Figura 1: Áreas de Concessão da Rede Caiuá (24 Municípios).



Fonte: Caiuá Rede Energia (2012).

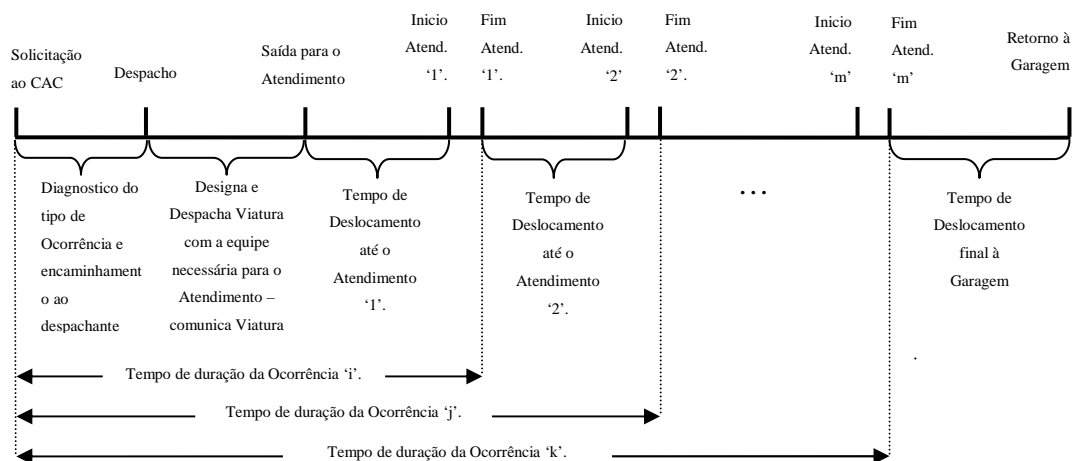
Dentre as principais atividades da concessionária de energia elétrica encontra-se o atendimento às solicitações de serviços comerciais e emergenciais mediante seu Centro de Atendimento ao Cliente (CAC), sendo este um canal de atendimento telefônico com infraestrutura informatizada e equipes altamente qualificadas prontas para atender ditas solicitações. Os serviços comerciais envolvem serviços como ligações de unidades consumidoras monofásicas, bifásicas, trifásicas, religação de consumidores desligados,

confirmação de leitura, corte de energia de consumidores inadimplentes, desligamento a pedido do cliente, padronização de entrada de serviço, troca de padrão, aumento de carga, substituição de medidores, vistorias em geral, dentre outros que são solicitados dentro do horário comercial (08:00 hrs até 20:00 hrs). Já os serviços emergenciais envolvem serviços como: cabos caídos ou rompidos, corte indevido, fogo na rede, falta de fase, falta geral de energia, ramal derretido, roubo de ramal de ligação, dentre outros cujo atendimento é feito nas 24 horas do dia.

Vale salientar que os serviços comerciais podem ser sem impedimentos (serviços que puderam ser executados) ou com impedimentos (não puderam ser executados por algum motivo como, por exemplo, o morador não se encontrava na residência para atender o electricista, falta de equipamentos, dentre outros). Já os serviços emergenciais devem ser executados de qualquer forma, o mais rapidamente possível (STEINER et al., 2006).

A ANEEL impõe às concessionárias de energia elétrica, prazos de atendimento às diversas solicitações dos consumidores mediante os indicadores coletivos DEC e FEC, para que a concessionária atinja tais metas. Assim, faz-se necessário dimensionar as equipes de trabalho para a execução dos serviços de maneira otimizada, para que não haja excesso (acarretando prejuízos à concessionária) ou escassez (multas junto à ANEEL) das equipes, visando um atendimento satisfatório aos usuários. Além disso, faz-se necessário designar/despachar as viaturas com equipes aos locais das ocorrências de forma que o tempo de deslocamento entre as equipes disponíveis e os referidos locais seja o mínimo possível, garantindo que os serviços emergenciais solicitados, sejam executados de imediato, e os comerciais, de acordo com as metas estipuladas pela ANEEL.

Figura 2: Linha dos Tempos para Gestão de Consumidores.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

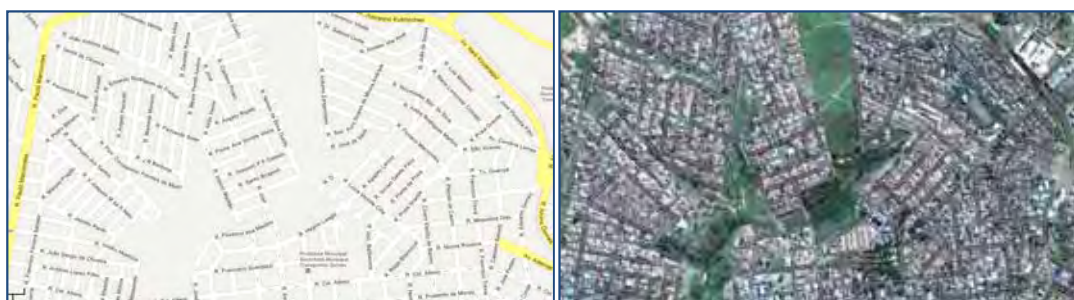
2.1.1 Gestão de Atendimento ao Cliente

Quando um cliente (usuário de energia elétrica, seja residencial, comercial ou industrial) percebe a interrupção do serviço de energia elétrica telefona para o CAC, recebendo este último a reclamação do usuário e fazendo um diagnóstico do tipo de ocorrência, estipulando um tempo de normalização da falta para o cliente e encaminhando a requisição ao escritório de despacho. Aqui o despachante gera uma lista hierarquizada das ocorrências segundo o tipo de atendimento, a prioridade e o prazo limite de reparo de cada ocorrência, entre outros parâmetros, designando assim a viatura com a capacidade de atendimento (a equipe necessária) e despachando cada viatura com a respectiva sequência de atendimentos no dia, para um final retorno à garagem dentro do horário de trabalho estabelecido (ver figura 2).

2.2 Modelagem da Área de Concessão

A área de concessão em estudo apresenta grande abrangência como nos mostra a figura 3.

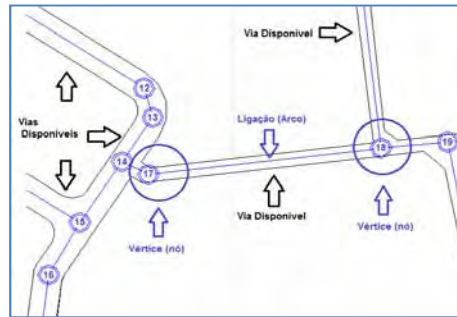
Figura 3: Porção da área de concessão em estudo (Cidade Presidente Prudente).



Fonte: Google (2012).

A teoria de grafos é uma ferramenta fundamental na elaboração do modelo da área de concessão, portanto vamos considerar uma porção de área de concessão como um grafo não orientado, onde cada interseção das vias disponíveis (ruas, avenidas, passeios, etc.) vai ser rotulada por um vértice (ou nó) e cada distância das vias (ainda sem considerar o sentido do trânsito) por ligações (ou arcos) do grafo (ver figuras 4 e 5).

Figura 4: Representação do Vértice (nó) e Ligação (arco) para uma via disponível.



Fonte: Modificado de Presidente Prudente (2006).

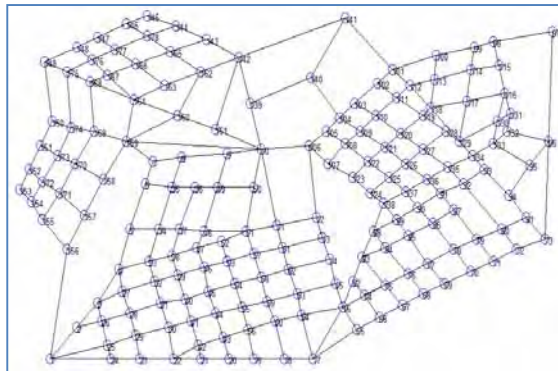
Figura 5: Grafo Não Orientado - porção da área de concessão em estudo (Cidade Presidente Prudente).



Fonte: Modificado de Presidente Prudente (2006).

Baseando-nos no grafo não orientado da figura 5, podemos realizar uma simplificação do dito grafo na procura de um modelo mais adaptado a nossos fins aplicativos da metodologia a ser apresentada (ver figura 6), obtendo assim um grafo não orientado simplificado de 178 vértices (ou nós).

Figura 6: Grafo Não Orientado Simplificado Representativo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

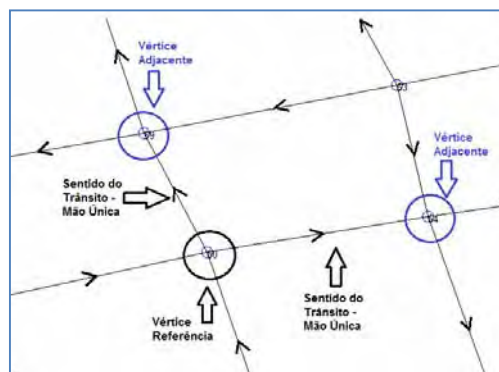
2.3 Modelagem dos Elementos da Área de Concessão

Uma vez formulado o modelo da área de concessão tendo em conta as vias disponíveis tanto interseções como distâncias das vias, nesta seção vamos começar a incluir os modelos dos elementos como: sentido do trânsito (mão única ou mão dupla), os valores das distâncias das vias (ruas, avenidas, passeios, etc), velocidades médias no trânsito e a presença de sinais de trânsito que poderiam atrasar o deslocamento das viaturas; entre os principais a considerar são os semáforos, saídas de escolas e faixa de pedestres.

2.3.1 Sentido do Trânsito (Mão única ou Mão dupla) – Lista de Adjacência

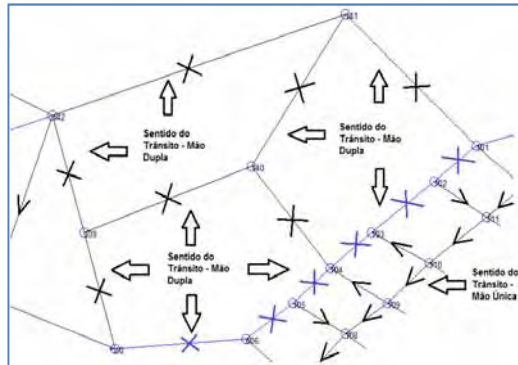
As considerações para determinar o sentido do trânsito são baseadas no arquivo Mapa da Cidade 2006.dwf (obtido no site oficial da Prefeitura Municipal de Presidente Prudente, na seção de planejamento urbano/ plano diretor municipal/ mapas e informações geográficas) e o mapa da cidade de Presidente Prudente apresentado com a ferramenta computacional Google Maps, sendo importante pela aproximação a um modelo realista, além de permitir estabelecer trajetos com tempos diferenciados o que se traduzem como mais alternativas de solução ao problema. Para a representação do sentido do trânsito vamos nos basear no modelo simplificado representativo da cidade (ver figura 6) como um grafo orientado onde o sentido do trânsito esto dado pela orientação da ligação de um vértice a cada um de seus vértices adjacentes.

Figura 7: Representação do Sentido do Trânsito como Mão Única.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 8: Representação do Sentido do Trânsito como Mão Dupla.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Segundo as representações das figuras 7 e 8, podemos construir o modelo representativo da cidade como uma lista de adjacência tomando dito modelo como um grafo orientado, obtendo assim a lista seguinte:

Tabela 1: Lista de Adjacência do Vértice '1' até '90', a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.
1	2,24,25,156	19	18,20	37	34,38	55	44,56	73	72,81,96
2	1,3,26	20	19,21,43	38	39,47	56	19,60	74	66,75
3	2,4	21	20,22	39	32,40	57	51,53	75	83,76
4	3,5,27,33	22	21,23,42,30	40	41,45	58	57,62	76	77,68
5	4,6,34	23	22,24	41	30,42	59	55,58	77	78,85
6	5,7,35	24	23,1,25	42	21,43	60	59,64	78	70,79
7	6,8,159	25	26,1	43	44,56	61	57,62	79	80,87
8	7,9	26	3,28	44	41,45	62	63,14	80	72,81
9	8,10	27	3,28	45	46,54	63	59,64	81	73,94
10	9,11,106,139,161,159	28	29,31	46	39,47	64	16,17	82	16,74
11	10,12,61	29	23,25	47	48,52	65	16,17,66	83	82
12	11,13,106	30	29,31	48	37,49	66	65,67	84	83,76
13	12,14,61	31	32,40	49	9,50	67	66,68,75	85	84,89
14	13,15	32	27,33	50	10	68	67,69	86	78,85
15	14,16,63	33	34,38	51	50,11,48	69	68,70,77	87	86,91
16	15,17,75	34	35	52	51,53	70	69,71	88	83,84,89
17	18,65	35	8,36	53	46,54	71	70,72,79	89	90,138
18	17,19,60	36	37,49	54	55,58	72	71,73	90	86,91

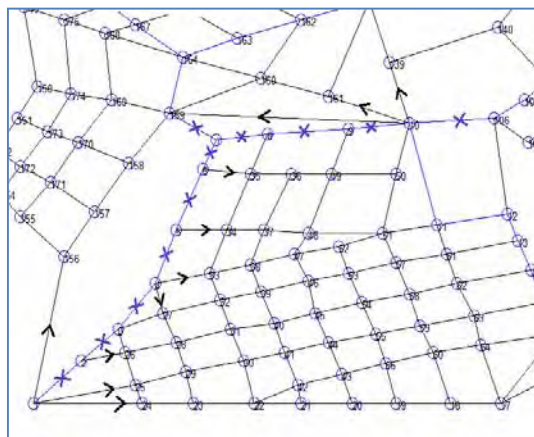
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 2: Lista de Adjacência do Vértice ‘91’ até ‘178’, a seus vértices adjacentes.

Vért. Ref.	Vért. Adjacentes.	Vért. Ref.	Vért. Adjacentes.	Vért. Ref.	Vért. Adjacentes.	Vért. Ref.	Vért. Adjacentes.	Vért. Ref.	Vért. Adjacentes.
91	92,136	109	104,108	127	120,126	145	144,146	163	162,164,
92	80,93	110	103,109	128	127,129	146	145,147	164	163,159,168,167
93	94,134	111	110,119	129	118,134	147	146,148,177	165	166,178
94	81,93,95	112	101,111,118	130	129,116	148	147,149,176	166	163,167
95	94,96,133	113	100,112	131	130,116,132	149	148,150	167	164,168,176
96	95,97,132	114	113,117	132	131,133,96	150	149,151,174	168	169,175
97	96,98	115	98,114,116	133	95,130,132,134	151	150,152,173	169	159,170
98	97,99,115	116	115,131	134	93,129,133,135	152	151,153	170	158,171,173
99	98,100,114	117	116,129	135	92,127,134,136	153	152,154	171	155,172
100	99,101	118	113,112,117,129	136	126,135,137	154	153,155,172	172	152,173
101	100,102,112,141	119	118,128	137	90,136,138	155	154,156	173	151,170,174
102	101,103,111	120	110,119	138	88,137	156	155,157	174	169,175
103	102,104	121	109,120	139	10,140,142	157	156,158,171	175	149,176
104	103,105	122	121,125	140	104,139,141	158	157,159,170	176	148,167,177
105	104,106,108	123	122,124	141	101,140,142	159	158,7,10,160,164	177	166,178
106	10,12,105,107	124	138	142	139,141,143,161,162	160	162,161,164	178	144,146
107	123	125	124,137	143	142,144,165	161	10,160	--	---
108	107,122	126	121,125	144	143,145	162	142,163,165	--	---

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

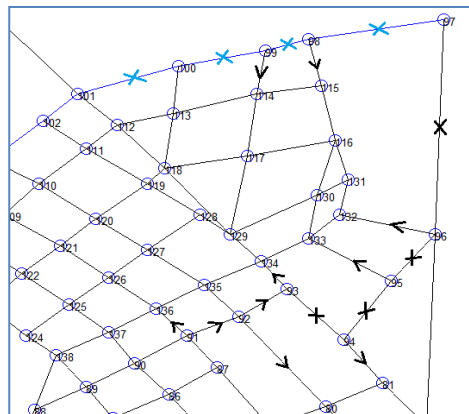
Como exemplo tem-se os vértices de referência 1 ao 10, da lista de adjacência – Tabela 1, e na figura 9 se apresentam graficamente com seus respectivos vértices adjacentes.

Figura 9: Sentido do Trânsito: Desde o vértice ‘1’ até ‘10’, a seus vértices adjacentes – Tabela 1.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Do mesmo jeito tem-se para os vértices de referência 91 até 100, da lista de adjacência – Tabela 2, e na figura 10 se apresenta graficamente como os seus respectivos vértices adjacentes.

Figura 10: Sentido do Trânsito: Desde o Vértice ‘91’ até ‘100’, a seus vértices adjacentes – Tabela 2.



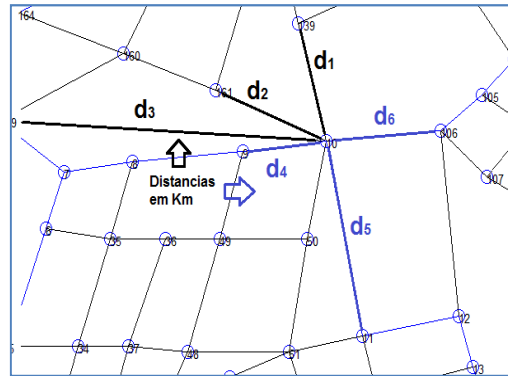
Fonte: Do próprio Autor.

Podemos dizer que a lista de adjacência apresentada (Tabelas 1 e 2) simplifica o trabalho de representação do sentido do trânsito, dando uma direção de mão única às “ruas e passeios” (ver figura 7) na maioria dos casos, e a direção de mão dupla principalmente para as “avenidas” (ver figura 8) do modelo simplificado da cidade (ver figura 6).

2.3.2 Valores das Distâncias das Vias (Ruas, Avenidas, Passeios, etc) – Lista de Distâncias.

As considerações para estabelecer os valores das distâncias das vias são baseadas no arquivo Mapa da cidade 2006.dwf (obtido no site oficial da Prefeitura Municipal de Presidente Prudente, na seção de planejamento urbano/ plano direto municipal/ mapas e informações geográficas) que foi escalonado e medido ponto a ponto com a ferramenta computacional AutoCAD. Sendo assim este arquivo torna-se uma referência para fornecer valores ao modelo simplificado da cidade e estes valores são importantes já que conhecendo a velocidade média em cada trecho pode-se calcular o tempo de demora da viatura para percorrer cada trajeto. Os valores de distâncias entre vértices do modelo simplificado da cidade (ver figura 11) são expressos em forma de lista (Ver Tabelas 3 até 7), tendo como ponto de partida um vértice de referência até cada um de seus vértices adjacentes.

Figura 11: Representação das Distâncias entre os Vértices do Modelo Simplificado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 3: Lista de Distâncias desde o Vértice ‘1’ até ‘36’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Distância (Km)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Distância (Km)
1	2, 24, 25, 156	4.2, 7.2, 7.0, 18.4	19	18, 20	3.5, 3.5
2	1, 3, 26	4.2, 3.7, 3.5	20	19, 21, 43	3.5, 3.5, 1.5
3	2, 4	3.7, 3.7	21	20, 22	3.5, 3.5
4	3, 5, 27, 33	3.7, 6.4, 2.2, 3.8	22	21, 23, 42, 30	3.5, 3.8, 3.3, 2.9
5	4, 6, 34	6.4, 6.4, 3.44	23	22, 24	3.8, 3.5
6	5, 7, 35	6.4, 3.9, 3.44	24	23, 1, 25	3.5, 7.2, 1.5
7	6, 8, 159	3.9, 3.20, 4.5	25	26, 1	2.2, 7.0
8	7, 9	3.20, 6.48	26	3, 28	2.2, 3.5
9	8, 10	6.38, 6.60	27	3, 28	3.5, 2.2
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	6.60, 9.42, 7.4, 8.80, 8.40, 19.30	28	29, 31	2.2, 3.56
11	10, 12, 61	9.42, 4.60, 3.0	29	23, 25	2.2, 3.50
12	11, 13, 106	4.6, 3.0, 9.12	30	29, 31	3.50, 2.9
13	12, 14, 61	3.0, 3.0, 4.6	31	32, 40	2.9, 3.5
14	13, 15	3.0, 3.0	32	27, 33	3.8, 2.9
15	14, 16, 63	3.0, 3.0, 4.6	33	34, 38	5.2, 3.5
16	15, 17, 74	3.0, 5.8, 3.5	34	35	6.40
17	18, 65	3.5, 4.5	35	8, 36	5.0, 3.2
18	17, 19, 60	3.5, 3.5, 3.5	36	37, 49	6.4, 3.2

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 4: Lista de Distâncias desde o Vértice ‘37’ até ‘72’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Distância (Km)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Distância (Km)
37	34, 38	3.2, 4.2	55	44, 56	3.5, 3.0
38	39, 47	2.9, 3.5	56	19, 60	2.5, 3.2
39	32, 40	3.5, 3.2	57	51, 53	3.0, 3.8
40	41, 45	3.2, 3.5	58	57, 62	3.0, 3.5
41	30, 42	3.5, 2.9	59	55, 58	3.5, 3.0
42	21, 43	0.5, 3.2	60	59, 64	3.0, 3.2
43	44, 56	3.0, 3.2	61	57, 62	3.8, 3.0
44	41, 45	3.5, 3.2	62	63, 14	3.0, 4.6
45	46, 54	3.2, 3.5	63	59, 64	3.5, 3.0
46	39, 47	3.5, 3.0	64	16, 17	4.6, 4.0
47	48, 52	2.5, 3.5	65	16, 17, 66	3.0, 4.5, 3.5
48	37, 49	3.2, 6.45	66	65, 67	3.5, 3.5
49	9, 50	5.23, 6.70	67	66, 68, 75	3.5, 3.5, 3.5
50	10	5.4	68	67, 69	3.5, 3.5
51	50, 11, 48	6.70, 3.8, 6.70	69	68, 70, 77	3.5, 3.5, 3.5
52	51, 53	3.8, 3.0	70	69, 71	3.5, 3.5
53	46, 54	3.5, 3.2	71	70, 72, 79	3.5, 3.5, 3.5
54	55, 58	3.2, 3.5	72	71, 73	3.5, 3.5

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5: Lista de Distâncias desde o Vértice ‘73’ até ‘108’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Distância (Km)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Distância (Km)
73	72, 81, 96	3.5, 2.5, 18.4	91	92, 136	3.5, 2.0
74	66, 75	3.5, 3.5	92	80, 93	6.70, 3.5
75	83, 76	4.2, 3.5	93	94, 134	4.2, 2.0
76	77, 68	3.5, 3.5	94	81, 93, 95	2.5, 4.2, 4.2
77	78, 85	3.5, 4.2	95	94, 96, 133	4.2, 4.3, 5.20
78	70, 79	3.5, 3.5	96	95, 97, 132	4.3, 22.4, 4.70
79	80, 87	3.5, 4.2	97	96, 98	22.4, 7.10
80	72, 81	3.5, 3.5	98	97, 99, 115	7.1, 2.4, 3.2
81	73, 94	2.5, 2.5	99	98, 100, 114	2.4, 4.3, 4.0
82	16, 74	3.8, 1.2	100	99, 101	4.3, 5.2
83	82	3.8	101	100, 102, 112, 141	5.2, 2.2, 3.2, 10.20
84	83, 76	3.5, 4.2	102	101, 103, 111	2.2, 3.8, 3.0
85	84, 89	3.5, 2.5	103	102, 104	3.8, 3.5
86	78, 85	4.2, 3.5	104	103, 105	3.5, 3.5
87	86, 91	3.5, 2.5	105	104, 106, 108	3.5, 3.5, 3.0
88	83, 84, 89	3.8, 2.5, 3.5	106	10, 12, 105, 107	7.4, 9.12, 3.5, 3.5
89	90, 138	3.5, 2.0	107	123	4.1
90	86, 91	2.5, 3.5	108	107, 122	3.5, 3.8

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 6: Lista de Distâncias desde o Vértice ‘109’ até ‘144’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Distância (Km)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Distância (Km)
109	104, 108	3.0, 3.5	127	120, 126	3.8, 3.7
110	103, 109	3.0, 3.5	128	127, 129	3.8, 2.0
111	110, 119	3.8, 3.4	129	118, 134	5.2, 2.0
112	101, 111, 118	3.2, 2.0, 3.5	130	129, 116	4.3, 3.5
113	100, 112	4.0, 3.5	131	130, 116, 132	2.0, 2.5, 2.0
114	113, 117	4.2, 4.5	132	131, 133, 96	2.0, 3.5, 4.70
115	98, 114, 116	3.2, 3.5, 3.2	133	95, 130, 132, 134	5.20, 2.5, 3.5, 3.5
116	115, 131	3.2, 2.5	134	93, 129, 133, 135	2.0, 2.0, 3.5, 3.5
117	116, 129	4.7, 4.5	135	92, 127, 134, 136	2.0, 3.5, 3.5, 3.5
118	113, 112, 117, 129	4.5, 3.5, 3.5, 5.2	136	126, 135, 137	3.0, 3.5, 3.5
119	118, 128	1.2, 3.5	137	90, 136, 138	2.0, 3.5, 3.5
120	110, 119	3.8, 3.8	138	88, 137	3.8, 3.5
121	109, 120	3.8, 3.5	139	10, 140, 142	8.80, 8.90, 8.80
122	121, 125	3.5, 3.8	140	104, 139, 141	9.20, 8.90, 10.2
123	122, 124	3.5, 4.1	141	101, 140, 142	10.2, 10.2, 18.4
124	138	1.9	142	139, 141, 143, 161, 162	8.80, 18.4, 6.70, 16.40, 5.20
125	124, 137	3.5, 2.8	143	142, 144, 165	6.70, 6.70, 5.20
126	121, 125	3.8, 3.5	144	143, 145	6.70, 5.0

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

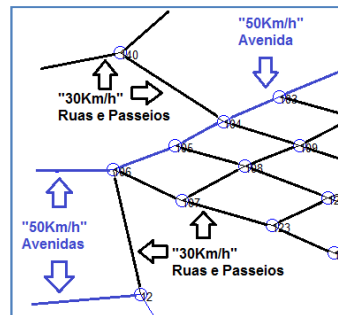
Tabela 7: Lista de Distâncias desde o Vértice ‘145’ até ‘178’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Distância (Km)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Distância (Km)
145	144, 146	5.0, 4.90	163	162, 164,	5.10, 5.0
146	145, 147	4.90, 4.90	164	163, 159, 168, 167	5.0, 5.20, 7.20, 6.70
147	146, 148, 177	4.90, 3.80, 5.0	165	166, 178	5.0, 6.70
148	147, 149, 176	3.80, 5.20, 4.70	166	163, 167	6.70, 4.2
149	148, 150	5.20, 12.70	167	164, 168, 176	6.70, 2.0, 6.0
150	149, 151, 174	12.70, 4.70, 3.5	168	169, 175	6.70, 5.0
151	150, 152, 173	4.70, 4.5, 3.5	169	159, 170	5.0, 5.0
152	151, 153	4.5, 4.4	170	158, 171, 173	5.20, 5.11, 4.6
153	152, 154	4.4, 3.5	171	155, 172	5.0, 4.2
154	153, 155, 172	3.5, 4.0, 4.7	172	152, 173	3.5, 4.9
155	154, 156	4.0, 5.32	173	151, 170, 174	3.50, 4.60, 4.88
156	155, 157	5.32, 5.20	174	169, 175	4.7, 10.20
157	156, 158, 171	5.20, 5.20, 5.22	175	149, 176	4.7, 3.90
158	157, 159, 170	5.20, 5.20, 5.20	176	148, 167, 177	4.7, 6.0, 4.0
159	158, 7, 10, 160, 164	5.20, 4.5, 19.30, 8.0, 5.20	177	166, 178	6.50, 4.90
160	162, 161, 164	12.30, 7.90, 8.20	178	144, 146	5.0, 5.0
161	10, 160	8.40, 7.90	---	---	---
162	142, 163, 165	5.20, 5.10, 6.70	---	---	---

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

gasto pela viatura pelo trajeto. Os valores de velocidade média a considerar entre vértices (aresta ou ligação) do modelo simplificado são de 30 km/h para vias como passeios e ruas, e de 50 km/h para vias como avenidas (ver figura 14). Note que essas velocidades são especificadas para cada aresta ou ligação e podem ser alteradas individualmente.

Figura 14: Representação dos Valores das Velocidades Promedio segundo o tipo de Via apresentada no Modelo Simplificado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na figura 14, pode-se observar que as linhas de cor azul representam as avenidas e as linhas de cor escura são para as ruas e passeios. Nas tabelas 8 à 12 são apresentados os valores de velocidade média para cada ligação segundo seja o tipo de via que está se assumindo no modelo simplificado, tendo assim a representação gráfica desses valores nas figuras 15 e 16.

Tabela 8: Lista de Velocidades do Vértice '1' até '36', a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Velocidade (Km/h)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Velocidade (Km/h)
1	2, 24, 25, 156	50, 30, 30, 30	19	18, 20	30, 30
2	1, 3, 26	50, 50, 30	20	19, 21, 43	30, 30, 30
3	2, 4	50, 50	21	20, 22	30, 30
4	3, 5, 27, 33	50, 50, 30, 30	22	21, 23, 42, 30	30, 30, 30, 30
5	4, 6, 34	50, 50, 30	23	22, 24	30, 30
6	5, 7, 35	50, 50, 30	24	23, 1, 25	30, 30, 30
7	6, 8, 159	50, 50, 50	25	26, 1	30, 30
8	7, 9	50, 50	26	3, 28	30, 30
9	8, 10	50, 50	27	3, 28	30, 30
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	50, 50, 50, 30, 30, 30	28	29, 31	30, 30
11	10, 12, 61	50, 50, 30	29	23, 25	30, 30
12	11, 13, 106	50, 50, 30	30	29, 31	30, 30
13	12, 14, 61	50, 50, 30	31	32, 40	30, 30
14	13, 15	50, 50	32	27, 33	30, 30
15	14, 16, 63	50, 50, 30	33	34, 38	30, 30
16	15, 17, 74	50, 30, 30	34	35	30
17	18, 65	30, 30	35	8, 36	30, 30
18	17, 19, 60	30, 30, 30	36	37, 49	30, 30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Pode-se observar nas listas de velocidade (Tabela 8 até 12), a possibilidade de modificar os valores devido à flexibilidade do modelo para incluir novos tipos de vias com novos valores de velocidade segundo os objetivos.

Tabela 9: Lista de Velocidades do Vértice ‘37’ até ‘72’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Velocidade (Km/h)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Velocidade (Km/h)
37	34, 38	30, 30	55	44, 56	30, 30
38	39, 47	30, 30	56	19, 60	30, 30
39	32, 40	30, 30	57	51, 53	30, 30
40	41, 45	30, 30	58	57, 62	30, 30
41	30, 42	30, 30	59	55, 58	30, 30
42	21, 43	30, 30	60	59, 64	30, 30
43	44, 56	30, 30	61	57, 62	30, 30
44	41, 45	30, 30	62	63, 14	30, 30
45	46, 54	30, 30	63	59, 64	30, 30
46	39, 47	30, 30	64	16, 17	30, 30
47	48, 52	30, 30	65	16, 17, 66	30, 30, 30
48	37, 49	30, 30	66	65, 67	30, 30
49	9, 50	30, 30	67	66, 68, 75	30, 30, 30
50	10	30	68	67, 69	30, 30
51	50, 11, 48	30, 30, 30	69	68, 70, 77	30, 30, 30
52	51, 53	30, 30	70	69,71	30, 30
53	46, 54	30, 30	71	70, 72, 79	30, 30, 30
54	55, 58	30, 30	72	71, 73	30, 30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 10: Lista de Velocidades do Vértice ‘73’ até ‘108’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Velocidade (Km/h)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Velocidade (Km/h)
73	72, 81, 96	30, 30, 30	91	92, 136	30, 30
74	66, 75	30, 30	92	80, 93	30, 30
75	83, 76	30, 30	93	94, 134	30, 30
76	77, 68	30, 30	94	81, 93, 95	30, 30, 30
77	78, 85	30, 30	95	94, 96, 133	30, 30, 30
78	70, 79	30, 30	96	95, 97, 132	30, 30, 30
79	80, 87	30, 30	97	96, 98	30, 50
80	72, 81	30, 30	98	97, 99, 115	50, 50, 30
81	73, 94	30, 30	99	98, 100, 114	50, 50, 30
82	16, 74	30, 30	100	99,101	50, 50
83	82	30	101	100, 102, 112, 141	50, 50, 30, 30
84	83, 76	30, 30	102	101, 103, 111	50, 50, 30
85	84, 89	30, 30	103	102, 104	50, 50
86	78, 85	30, 30	104	103, 105	50, 50
87	86, 91	30, 30	105	104, 106, 108	50, 50, 30
88	83, 84, 89	30, 30, 30	106	10, 12, 105, 107	50, 30, 50, 30
89	90, 138	30, 30	107	123	30
90	86, 91	30, 30	108	107, 122	30, 30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 11: Lista de Velocidades do Vértice ‘109’ até ‘144’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Velocidade (Km/h)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Velocidade (Km/h)
109	104, 108	30, 30	127	120, 126	30, 30
110	103, 109	30, 30	128	127, 129	30, 30
111	110, 119	30, 30	129	118, 134	30, 30
112	101, 111, 118	30, 30, 30	130	129, 116	30, 30
113	100, 112	30, 30	131	130, 116, 132	30, 30, 30
114	113, 117	30, 30	132	131, 133, 96	30, 30, 30
115	98, 114, 116	30, 30, 30	133	95, 130, 132, 134	30, 30, 30, 30
116	115, 131	30, 30	134	93, 129, 133, 135	30, 30, 30, 30
117	116, 129	30, 30	135	92, 127, 134, 136	30, 30, 30, 30
118	113, 112, 117, 129	30, 30, 30, 30	136	126, 135, 137	30, 30, 30
119	118, 128	30, 30	137	90, 136, 138	30, 30, 30
120	110, 119	30, 30	138	88, 137	30, 30
121	109, 120	30, 30	139	10, 140, 142	30, 30, 30
122	121, 125	30, 30	140	104, 139, 141	30, 30, 30
123	122, 124	30, 30	141	101, 140, 142	30, 30, 30
124	138	30	142	139, 141, 143, 161, 162	30, 30, 30, 30, 50
125	124, 137	30, 30	143	142, 144, 165	30, 30, 30
126	121, 125	30, 30	144	143, 145	30, 30

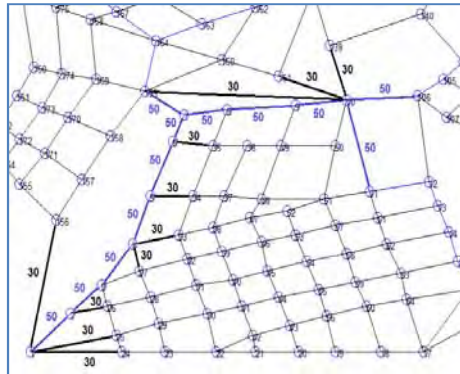
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 12: Lista de Velocidades do Vértice ‘145’ até ‘178’, a seus vértices adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	Velocidade (Km/h)	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	Velocidade (Km/h)
145	144, 146	30, 30	163	162, 164,	50, 50
146	145, 147	30, 30	164	163, 159, 168, 167	50, 50, 30, 50
147	146, 148, 177	30, 30, 30	165	166, 178	30, 30
148	147, 149, 176	30, 30, 50	166	163, 167	30, 30
149	148, 150	30, 30	167	164, 168, 176	50, 30, 50
150	149, 151, 174	30, 30, 30	168	169, 175	30, 30
151	150, 152, 173	30, 30, 30	169	159, 170	30, 30
152	151, 153	30, 30	170	158, 171, 173	30, 30, 30
153	152, 154	30, 30	171	155, 172	30, 30
154	153, 155, 172	30, 30	172	152, 173	30, 30
155	154, 156	30, 30	173	151, 170, 174	30, 30, 30
156	155, 157	30, 30	174	169, 175	30, 30
157	156, 158, 171	30, 30, 30	175	149, 176	30, 30
158	157, 159, 170	30, 30, 30	176	148, 167, 177	50, 50, 30
159	158, 7, 10, 160, 164	30, 50, 30, 30, 50	177	166, 178	30, 30
160	162, 161, 164	30, 30, 30	178	144, 146	30, 30
161	10, 160	30, 30	---	---	---
162	142, 163, 165	50, 50, 30	---	---	---

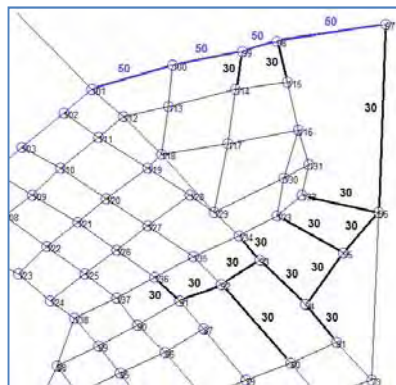
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 15: Valores de Velocidade Média do Vértice '1' até '10', a seus vértices



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 16: Valores de Velocidade Média do Vértice '91' até '100', a seus vértices

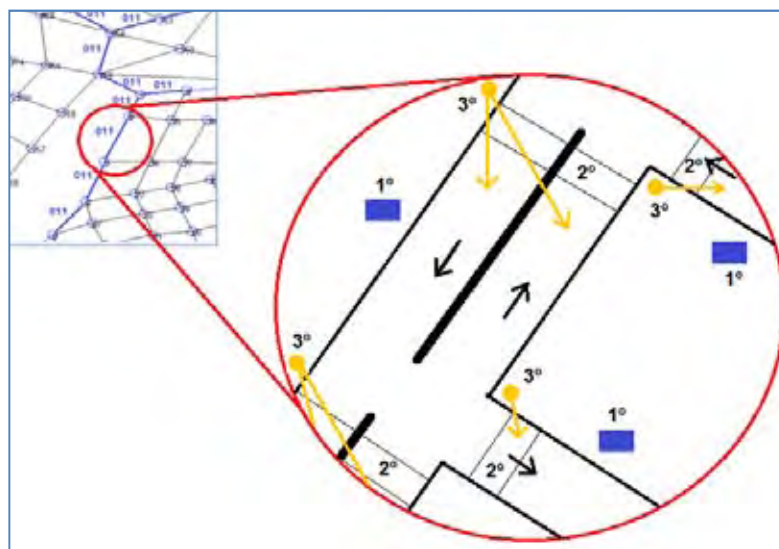


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2.3.4 Presença dos Sinais de Trânsito (Escolas, Faixas de Pedestres e Semáforos) – Lista de Sinais.

O número de sinais de trânsito a considerar em cada trecho dentro do modelo simplificado da cidade é baseado na observação direta dos diversos tipos de vias, tendo nas vias principais o maior número de sinais. Cabe salientar que a importância dos sinais de trânsito está em representar elementos que restringem a escolha do trajeto com menor tempo de gasto pelas viaturas. Os sinais de trânsito a considerar no modelo simplificado da cidade são: as escolas, as faixas de pedestres e os semáforos, cuja representação se mostra na figura 17.

Figura 17: Representação dos Sinais de Trânsito para o Modelo Simplificado da Cidade.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Cabe salientar que a presença dos sinais de trânsito para cada ligação é representada como um vetor de três elementos (ver figura 17).

O primeiro componente (1º) indica o número de escolas presentes nessa ligação ou via. Se a via fosse de mão dupla e nesta houvesse só uma escola, então conta como uma escola para cada direção da via na lista de sinais, p.e. Ligação “11-12” tem o vetor “[1,1,1]” e a ligação “12-11” tem o vetor “[1,1,1]” (ver tabela 13, vértices de referência 11 e 12), isto é, “1” significa que entre esses vértices se tem uma escola.

O segundo componente (2º) indica o número de faixas de pedestres. Se a via é mão dupla a faixa que contem a estrada nas duas direções se conta como uma para cada direção ou sentido.

O terceiro componente (3º) indica o número de semáforos que se apresenta em companhia da respectiva faixa de pedestres, portanto, se a via é de mão dupla, se conta um semáforo por cada direção ou sentido.

Sendo assim, teríamos a forma do vetor dos sinais que vem a ser um elemento da lista de sinais, para diversos tipos de configurações, como apresentam as tabelas seguintes:

Tabela 13: Lista dos Sinais do Vértice ‘1’ até ‘36’, a seus Vértices Adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	[ne, nf, ns]	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	[ne, nf, ns]
1	2, 24, 25, 156	011, 011, 011, 011	19	18, 20	011, 011
2	1, 3, 26	011, 011, 011	20	19, 21, 43	011, 011, 011
3	2, 4	011, 011	21	20, 22	011, 011
4	3, 5, 27, 33	011, 011, 011, 011	22	21, 23, 42, 30	011, 011, 011, 011
5	4, 6, 34	011, 011, 011	23	22, 24	011, 011
6	5, 7, 35	011, 011, 011	24	23, 1, 25	011, 011, 011
7	6, 8, 159	011, 011, 011	25	26, 1	000, 011
8	7, 9	011, 011	26	3, 28	011, 011
9	8, 10	011, 011	27	3, 28	011, 011
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	011, 011, 011, 011, 011, 000	28	29, 31	100, 011
11	10, 12, 61	011, 111, 011	29	23, 25	011, 000
12	11, 13, 106	111, 011, 011	30	29, 31	000, 000
13	12, 14, 61	011, 011, 011	31	32, 40	011, 011
14	13, 15	011, 011	32	27, 33	000, 011
15	14, 16, 63	011, 011, 011	33	34, 38	000, 011
16	15, 17, 74	011, 011, 011	34	35	000
17	18, 65	011, 011	35	8, 36	011, 000
18	17, 19, 60	011, 011, 011	36	37, 49	100, 000

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 14: Lista dos Sinais do Vértice ‘37’ até ‘72’, a seus Vértices Adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	[ne, nf, ns]	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	[ne, nf, ns]
37	34, 38	000, 000	55	44, 56	000, 000
38	39, 47	011, 011	56	19, 60	011, 000
39	32, 40	000, 011	57	51, 53	011, 000
40	41, 45	000, 011	58	57, 62	011, 011
41	30, 42	000, 000	59	55, 58	000, 000
42	21, 43	000, 000	60	59, 64	000, 000
43	44, 56	000, 000	61	57, 62	000, 011
44	41, 45	000, 000	62	63, 14	000, 011
45	46, 54	011, 011	63	59, 64	000, 000
46	39, 47	000, 011	64	16, 17	011, 111
47	48, 52	000, 011	65	16, 17, 66	011, 011, 011
48	37, 49	000, 000	66	65, 67	011, 011
49	9, 50	011, 000	67	66, 68, 75	011, 011, 011
50	10	011	68	67, 69	011, 011
51	50, 11, 48	000, 011, 000	69	68, 70, 77	011, 011, 011
52	51, 53	011, 011	70	69, 71	011, 011
53	46, 54	000, 011	71	70, 72, 79	011, 011, 011
54	55, 58	000, 011	72	71, 73	011, 011

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 15: Lista dos Sinais do Vértice ‘73’ até ‘108’, a seus Vértices Adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	[ne, nf, ns]	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	[ne, nf, ns]
73	72, 81, 96	011, 011, 011	91	92, 136	000, 000
74	66, 75	011, 000	92	80, 93	000, 000
75	83, 76	000, 000	93	94, 134	000, 000
76	77, 68	000, 011	94	81, 93, 95	000, 000, 000
77	78, 85	000, 000	95	94, 96, 133	000, 000, 000
78	70, 79	011, 000	96	95, 97, 132	000, 011, 000
79	80, 87	000, 100	97	96, 98	011, 011
80	72, 81	011, 000	98	97, 99, 115	011, 011, 011
81	73, 94	011, 000	99	98, 100, 114	011, 011, 011
82	16, 74	011, 000	100	99, 101	011, 011
83	82	000	101	100, 102, 112, 141	011, 011, 011, 011
84	83, 76	000, 000	102	101, 103, 111	011, 011, 011
85	84, 89	000, 000	103	102, 104	011, 000
86	78, 85	000, 000	104	103, 105	000, 011
87	86, 91	000, 000	105	104, 106, 108	011, 011, 011
88	83, 84, 89	000, 000, 000	106	10, 12, 105, 107	011, 011, 011, 011
89	90, 138	000, 000	107	123	000
90	86, 91	000, 000	108	107, 122	000, 000

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 16: Lista Sinais do Vértice ‘109’ até ‘144’, a seus Vértices Adjacentes.

Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	[ne, nf, ns]	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	[ne, nf, ns]
109	104, 108	011, 000	127	120, 126	000, 000
110	103, 109	011, 000	128	127, 129	000, 000
111	110, 119	000, 000	129	118, 134	000, 000
112	101, 111, 118	011, 000, 000	130	129, 116	000, 000
113	100, 112	011, 000	131	130, 116, 132	000, 000, 000
114	113, 117	000, 000	132	131, 133, 96	000, 000, 000
115	98, 114, 116	011, 000, 000	133	95, 130, 132, 134	000, 000, 000, 000
116	115, 131	000, 000	134	93, 129, 133, 135	000, 000, 000, 000
117	116, 129	000, 000	135	92, 127, 134, 136	000, 000, 000, 000
118	113, 112, 117, 129	000, 000, 000, 000	136	126, 135, 137	000, 000, 000
119	118, 128	000, 000	137	90, 136, 138	000, 000, 000
120	110, 119	100, 000	138	88, 137	000, 000
121	109, 120	000, 000	139	10, 140, 142	011, 011, 011
122	121, 125	000, 000	140	104, 139, 141	011, 011, 011
123	122, 124	000, 000	141	101, 140, 142	011, 011, 011
124	138	000	142	139, 141, 143, 161, 162	011, 011, 011, 011, 011
125	124, 137	000, 000	143	142, 144, 165	011, 000, 000
126	121, 125	000, 000	144	143, 145	000, 011

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 17: Lista dos Sinais do Vértice ‘145’ até ‘178’, a seus Vértices Adjacentes.

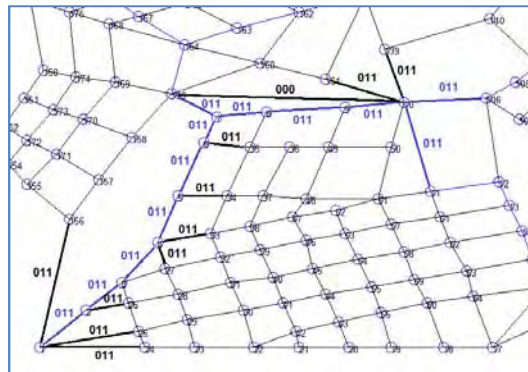
Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes	[ne, nf, ns]	Vértice. Referên.	Vértices. Adjacentes.	[ne, nf, ns]
145	144, 146	011, 000	163	162, 164,	011, 011
146	145, 147	000, 000	164	163, 159, 168, 167	011, 011, 011, 011
147	146, 148, 177	000, 011, 011	165	166, 178	000, 011
148	147, 149, 176	011, 011, 011	166	163, 167	011, 011
149	148, 150	011, 000	167	164, 168, 176	011, 011, 011
150	149, 151, 174	000, 000, 000	168	169, 175	000, 000
151	150, 152, 173	000, 000, 000	169	159, 170	011, 000
152	151, 153	000, 000	170	158, 171, 173	000, 000, 000
153	152, 154	000, 000	171	155, 172	000, 111
154	153, 155, 172	000, 000, 000	172	152, 173	011, 000
155	154, 156	000, 011	173	151, 170, 174	000, 000, 000
156	155, 157	011, 000	174	169, 175	000, 000
157	156, 158, 171	000, 011, 011	175	149, 176	000, 011
158	157, 159, 170	011, 011, 000	176	148, 167, 177	011, 011, 011
159	158, 7, 10, 160, 164	011, 011, 000, 011, 011	177	166, 178	000, 000
160	162, 161, 164	011, 011, 011	178	144, 146	000, 011
161	10, 160	011, 011	---	---	---
162	142, 163, 165	011, 011, 111	---	---	---

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Como pode se observar nas diversas configurações dos elementos da lista de sinais, existem vetores com componentes “111” (p.e. ver tabelas: 13 - vért. de ref. 11e 12, 14 – vért. de ref. 64), isto é, que no modelo simplificado está se considerando a presença de escolas principalmente nas avenidas ou perto delas (p.e. ver tabela 13, vértice de ref. 28), e “011” que são vias que na maioria dos casos estão perto da avenida principal (p.e. ver tabela 15 – vértice de ref. 100).

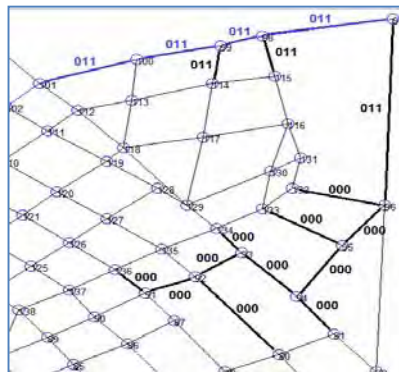
No caso de componentes da forma “000” são vias afastadas da avenida principal que comumente são passeios ou ruas de pouca concocorrência veicular (p.e. ver tabela 17 – vértice de ref. 170), que ao contrário dos casos anteriores que são lugares ou zonas de maior concocorrência veicular. As representações gráficas são apresentadas nas figuras 18 e 19.

Figura 18: Sinais de Trânsito do Vértice '1' até '10', a seu vértices adjacentes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 19: Sinais de Trânsito do Vértice '91' até '100', a seus vértices adjacentes.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Vale mencionar que para a presença de cada tipo de sinal de trânsito está sendo especificada no modelo proposto o tempo que demoraria uma viatura entre cada trecho de um trajeto pela presença de semáforos ($t_{ps} = 1 \text{ min} \approx 0,0167 \text{ hrs}$), faixas de pedestres ($t_{pf} = 2 \text{ min} \approx 0,033 \text{ hrs}$) e escolas ($t_{pe} = 3 \text{ min} \approx 0,05 \text{ hrs}$) no modelo simplificado da cidade. Os valores de tempos de demora que foram considerados pela presença de cada tipo de sinal estão baseados na observação direta, sendo considerados valores aproximados que tenham influência significativa na solução do modelo proposto.

Portanto o modelo simplificado apresenta as características nos seus elementos (listas de adjacência, distâncias, velocidades e dos sinais de trânsito) que constituem a base principal sobre a qual se aplicará a metodologia desenvolvida e apresentada na seção seguinte.

3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE AUTOMAÇÃO DO DESPACHO DINÂMICO DAS VIATURAS PARA O ATENDIMENTO DAS ORDENS DE SERVIÇOS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3.1 Introdução

A metodologia proposta para a resolução do problema de automação do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços em redes de distribuição de energia elétrica apresenta duas fases no seu desenvolvimento.

Na primeira fase foi desenvolvido um modelo matemático para geração de matrizes de tempos de deslocamento, isto é, basicamente os tempos de demora no trajeto desde as posições das viaturas até cada uma das posições das ocorrências a serem atendidas, além do tempo de demora em voltar à garagem, levando em conta também os tempos de demora ocasionados por sinais de trânsito (escolas, faixas de pedestres e semáforos) assim como as diferentes velocidades médias permitidas dependendo do tipo de via (avenidas, passeios e ruas).

Na segunda fase se desenvolveu um modelo matemático para o atendimento das ocorrências que atingiram à rede de distribuição de energia elétrica, atendimentos feitos pelas viaturas com as equipes necessárias para realiza-lo nos diversos pontos da cidade (modelo simplificado da cidade – ver figura 6), visando assim melhorar o tempo de atendimento ante as ocorrências na rede de energia elétrica com a consequente melhora dos índices coletivos operativos de continuidade de fornecimento de energia (DEC e FEC) aos usuários (ver apêndice 3).

Cabe salientar que as posições das viaturas (ou garagens) são conhecidas a priori, desde o começo do dia (ou horário de trabalho), sendo o programa computacional executado conhecendo as posições das ocorrências a serem atendidas no dia, as quais são modificadas segundo novas ocorrências apareçam o que torna a metodologia proposta muito interativa.

3.2 Noções Preliminares

3.2.1 Fase 1: Modelo de Geração de Matrizes de Tempos de Demora

A. Conjuntos a Considerar:

Os conjuntos a considerar são a base do modelo simplificado da cidade (ver figura 6), expressa como um grafo direcionado, segundo isto temos:

- Ω_n : Conjunto de vértices (ou nós) ‘ i ’ do modelo simplificado da cidade.
- Ω_a : Conjunto de ligações (ou arestas) ‘ ij ’ do modelo simplificado da cidade.

B. Parâmetros e Dados Considerados:

A seguir se descrevem os parâmetros principais da fase 1 do modelo proposto com os respectivos conjuntos aos quais pertencem:

- ds_{ij} : valor da distância de cada trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$) em quilômetros (km).
- vp_{ij} : velocidade média permitida no trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$) em quilômetros por hora (km/h).
- ne_{ij} : número de escolas no trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$).
- nf_{ij} : número de faixas de pedestres no trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$).
- ns_{ij} : número de semáforos no trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$).
- $tipo_i$: vetor de valores fixos ($tipo[i] = 0, \forall i \in \Omega_n$) definido no arquivo de dados da fase ‘1’ no modelo proposto, tem como função principal complementar-se como o vetor ‘ $ntipo_i$ ’ em modo soma para cada iteração, sendo o resultado reconhecido pelo programa dentro do arquivo de dados.
- $ntipo_i$: vetor a ser calculado em cada processo iterativo. Em cada iteração este vetor apresenta um valor $ntipo[i] = 1$ para o vértice tipo origem; $ntipo[i] = -1$ para o tipo destino e $ntipo[i] = 0$ para os demais tipo de vértices ($\forall i \in \Omega_n$). Com estes valores se realiza a soma ‘ $ntipo_i + tipo_i$ ’ cujo objetivo é ser reconhecido no arquivo de dados e conseqüentemente interpretado nas restrições da fase ‘1’ do modelo proposto.
- tpe_{ij} : tempo de demora pela presença de escolas no trecho ‘ ij ’ ($\forall ij \in \Omega_a$) em horas (hrs).

- **tpf_{ij}** : tempo de demora pela presença de faixas de pedestres no trecho ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) em horas (hrs).
- **tps_{ij}** : tempo de demora pela presença de semáforos no trecho ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) em horas (hrs).
- **t_{demora}** : representa o valor da função objetivo, resultado do somatório da sequência de trechos ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) que constituem o caminho com o menor tempo de demora no trajeto entre um vértice origem ' u ' e um de destino ' v '.
- **mvo** : matriz viatura (garagem)-ocorrência de tempos de demora, de ' n ' número linhas ou viaturas ($\forall u = 1, \dots, n$) e ' m ' número de colunas ou ocorrências ($\forall v = 1, \dots, m$). Nesta matriz são consideradas como vértices origem as posições das garagens para cada viatura ' u ' e vértices destino às posições de cada ocorrência ' v ', por tanto, cada elemento da matriz é um tempo total de demora, desde a posição da garagem para cada viatura ' u ' até a posição da ocorrência ' v '. Este tempo inclui tempo de demora por deslocamento mais o tempo de demora pela presença de sinais de trânsito no trajeto do caminho (sequência de trechos ' ij ').
- **moo** : matriz ocorrência-ocorrência de tempos de demora, de ' m ' números de linhas ou ocorrências ($\forall u = 1, \dots, m$) e ' m ' números de colunas ou ocorrências ($\forall v = 1, \dots, m$). Uma característica desta matriz resulta do fato que os elementos da diagonal principal ($u = v$) são zero, os valores dos elementos desta matriz permitem ter o tempo total que demoraria uma viatura em ir de uma ocorrência ' u ' à seguinte ocorrência ' v ' tomando em conta as demoras por deslocamento mais as demoras por presença de sinais de trânsito no trajeto do caminho (sequência de trechos ' ij ').
- **mov** : matriz ocorrência-viatura (garagem) de tempos de demora, de ' m ' números de linhas ou ocorrências ($\forall u = 1, \dots, m$) e ' n ' números de colunas ou viaturas ($\forall v = 1, \dots, n$). Nesta matriz são consideradas como vértices origem as posições das ocorrências e vértices de destino as posições das garagens. Isto permite ter o tempo total que demoraria uma viatura em percorrer o trajeto mais curto desde a posição da ocorrência ' u ' até a posição ou a garagem respectiva, tomando em conta as demoras por deslocamento mais as demoras por presença de sinais de trânsito no trajeto do caminho (sequência de trechos ' ij ').

C. Variáveis:

A fase 1 do modelo proposto apresenta uma única variável de decisão:

- W_{ij} : variável principal de decisão que assume valores '1' ou '0', fazendo desta uma variável de tipo binária, $W_{ij} = 1$, se trecho ' ij ' melhora a função objetivo (t_demora), no caso contrário $W_{ij} = 0$.

D. Supostos e considerações:

A abordagem nesta seção está baseada principalmente sobre o modelo simplificado da cidade (ver figura 6), sobre a qual se assume:

- Inicialmente um conjunto de viaturas ' u ' ($\forall u \in \Omega_v$) localizada cada uma num vértice específico ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) no modelo simplificado da cidade. Estes vértices serão considerados as garagens (ponto de partida de cada viatura ' u ' para realizar a sequência de atendimentos no horário de trabalho no dia) no modelo proposto.
- Um conjunto de ocorrências ' v ' ($\forall v \in \Omega_o$) localizada cada uma num vértice específico ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) no modelo simplificado da cidade, cada vértice ' i ' ocupado por uma ocorrência ' v ' ($\forall v \in \Omega_o$) significará a nova posição de uma viatura ' u ' ($\forall u \in \Omega_v$) ao realizar um atendimento atribuído, por tanto, para uma sequência de atendimentos a cada viatura ' u ', significa também uma sequência de posições no deslocamento da viatura ' u ' até chegar à posição da última ocorrência ' v '.
- Ao realizar o último atendimento feito pela viatura ' u ' ($\forall u \in \Omega_v$), esta volta ao vértice ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) inicialmente ocupado (garagem).
- São considerados só dois valores de velocidade permitidos (50 e 30 quilômetros por hora) para a cada viatura ' u ', dependendo do trecho ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) a ser percorrido.
- Todos os valores das distâncias em cada trecho ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) estão em quilômetros.
- É considerado um número maior de semáforos e faixa de pedestres em cada trecho ' ij ' ($\forall ij \in \Omega_a$) da avenida, assim como em ruas e passeios próximos, onde os sinais de trânsito são mais frequentes nestes trajetos para cada viatura ' u ' ($\forall u \in \Omega_v$) no horário de trabalho do dia.

3.2.2 Fase 2: Modelo para o Atendimento das Ocorrências

A. Conjuntos a Considerar:

Entre os conjuntos a considerar para o atendimento das ordens de serviços (ocorrências) temos:

- Ω_v : Conjunto de viaturas 'i' disponíveis para realizar os atendimentos ($n(\Omega_v) = n$).
- Ω_o : Conjunto de ocorrências 'j', cujo número de elementos muda dentro do horário de trabalho diário ($n(\Omega_o) = m$).
- Ω_t : Conjunto ordinal 't', cujos elementos indicam a sequência em ordem cronológica das ocorrências a serem atendidas ($n(\Omega_t) = p$; $p = m$).

B. Parâmetros e Dados Considerados:

A seguir são descritos os parâmetros principais da fase 2 do modelo proposto com os respectivos conjuntos aos quais pertencem:

- ct_i : custo adicional por cada hora extra gerada pela viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) em atender à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) ao final do horário de trabalho diário em reais (R\$).
- kp_i : capacidade de atendimento da viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) representa a equipe necessária que possui cada viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$).
- hr_i : horário de trabalho diário de cada viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) em horas.
- ta_j : tempo de atendimento a cada ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) desde a chegada da viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) ao local da ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) em horas.
- ml_j : multa para a viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) por não atender à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) não emergencial, expresso em reais.
- pd_j : grau de prioridade de cada ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$), valor binário.
- tpa_j : tipo de atendimento da ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$), cujo valor numérico depende da ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$).
- TDI_{max_j} : tempo máximo de demora em atender uma ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$), indica o prazo limite que tem a concessionária para reparar ou atender à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) de prioridade emergencial, em horas.

- **MULT_j**: multa por ultrapassar o TDI_{max_j} em atender à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$), em reais.
- **Ca_j**: indica o número de consumidores atingidos pela ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$).
- **Cs**: número total de consumidores existentes na área em estudo.
- **N**: número de ocorrências no período em estudo ($N = |\Omega_o|$).
- **DEC_max**: limite máximo do valor da Duração Equivalente da Interrupção, dado estabelecido no modelo.
- **MULT_DEC**: valor de multa por ultrapassar o limite máximo do valor DEC_{max} estabelecido no modelo.
- **M**: número de horas limites (24 h) na jornada diária de trabalho.

C. Variáveis:

A fase 2 do modelo proposto apresenta as seguintes variáveis:

i. Variável Principal.

- **X_{i,j,t}**: variável binária que representa o estado da viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) que atende à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) na ordem 't' ($\forall t \in \Omega_t$).

ii. Variável de Operação Interna.

- **Z_{i,j,k,t}**: variável binária interna utilizada na linearização do produto de variáveis $X_{i,j,t}$ e $X_{i,k,t-1}$. Representa o estado de uma viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) que atende uma ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) para uma sequência de ordens 'k' e 't' ($\forall k, t \in \Omega_t$).
- **λ_{i,j,k,t}**: variável binária interna utilizada na linearização do produto de duas variáveis TDI_k e $Z_{i,j,k,t}$. Representa o estado da viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) que atende à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) numa sequência de ordens 'k' e 't' ($\forall k, t \in \Omega_t$).
- **α_{i,j,t}**: variável binária interna utilizada na linearização do produto de duas variáveis $X_{i,j,t}$ e $\delta_{i,t}$. Representa o estado da viatura 'i' ($\forall i \in \Omega_v$) que atende à ocorrência 'j' ($\forall j \in \Omega_o$) numa sequência de ordens 't' ($\forall t \in \Omega_t$).

- $\beta_{i,t}$: variável binária interna que relaciona o estado da viatura ‘ i ’ ($\forall i \in \Omega_v$) numa determinada ordem ‘ t ’ ($\forall t \in \Omega_t$).
- $\delta_{i,t}$: variável binária interna que relaciona o estado da viatura ‘ i ’ ($\forall i \in \Omega_v$) numa determinada sequência de ordens ‘ t ’ e ‘ $t + 1$ ’ ($\forall t \in \Omega_t$), segundo os valores de $\beta_{i,t}$.

iii. Variáveis Relacionadas às Viaturas.

- h_i : variável contínua que representa as horas extras feitas por cada viatura ‘ i ’ ($\forall i \in \Omega_v$); variável a ser penalizada na função objetivo.

iv. Variáveis Relacionadas às Ocorrências.

- EXC_j : variável contínua que representa o tempo de excesso ao valor do parâmetro TDI_{max_j} ; variável a ser penalizada na função objetivo.
- TDI_j : variável contínua que representa o tempo de demora em atender à ocorrência emergencial ‘ j ’ ($\forall j \in \Omega_o$).

v. Outras variáveis.

- $ALPHA_{DEC}$: variável contínua que representa o tempo de excesso do valor calculado do ‘ DEC ’, variável a ser penalizada na função objetivo.
- DEC : Duração Equivalente da Interrupção, valor a ser calculado para um determinado período, segundo a expressão (3.1) do apêndice 3.

D. Supostos e Considerações:

As suposições e considerações estabelecidas nesta seção têm como base a linha dos tempos para a gestão de consumidores (ver figura 2), assim como os parâmetros característicos que descrevem o processo de atendimentos por cada viatura, e são os seguintes:

- Da linha dos tempos para gestão dos consumidores (ver figura 2), considera-se como ponto de partida o “despacho”. O despachante executa a metodologia proposta e designa a sequência de atendimentos para cada viatura com as equipes necessárias. Cabe salientar que devido ao tempo tão curto que leva passar da “solicitação ao CAC” ao “despacho” e do “despacho” até “saída para o atendimento” estes tempos são considerados zero com fins práticos na aplicação da metodologia.

- No começo do horário de trabalho diário todas as viaturas disponíveis para realizar o primeiro atendimento têm como ponto de partida suas garagens respectivas.
- Na segunda fase do modelo matemático o tempo de atendimento de cada ocorrência é considerado desde a chegada da viatura ao local da ocorrência.
- Ao realizar o último atendimento, todas as viaturas deveram voltar ao ponto de partida, isto é, às suas garagens respectivas.
- Sobre os parâmetros que na sua maioria são penalidades ou multas e tempos de demora, considera-se que as unidades monetárias para ditas multas estão expressas em “reais” e as unidades dos tempos de demora estão expressas “reais por cada hora”.
- Segundo seja o tipo de ocorrência que atinge ao sistema de energia elétrica, atribui-se a cada uma um valor numérico que caracteriza o tipo de atendimento a ser feito pela viatura respectiva.
- Considera-se que o valor da multa por ultrapassar o tempo máximo de demora em atender uma ocorrência emergencial é maior ou igual ao dobro do valor estabelecido para a multa por não atender a ocorrência caso fosse considerada não emergência ou comercial, exigindo assim um esforço pela melhoria na qualidade de serviço por parte da concessionária.
- São considerados dois valores numéricos para caracterizar a prioridade dos atendimentos às ocorrências, considerando como valor ‘1’ para atendimento emergencial, e ‘0’ para atendimentos não emergenciais ou comerciais.

3.3 Formulação Matemática do Modelo Proposto

3.3.1 Fase 1: Modelo de Geração de Matrizes de Tempos de Demora

Apresenta-se o seguinte modelo matemático proposto para esta fase:

Minimizar:

$$t_demora: \sum_{(i,j) \in \Omega_a} \left(\frac{ds_{ij}}{vp_{ij}} + tpe * ne_{ij} + tpf * nf_{ij} + tps * ns_{ij} \right) * W_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,i) \in \Omega_a} W_{ki} = 1; \text{ tipo}_i + \text{ntipo}_i = 1, \forall i \in \Omega_n \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,i) \in \Omega_a} W_{ki} = 0; \text{ tipo}_i + \text{ntipo}_i = 0, \forall i \in \Omega_n \quad (3)$$

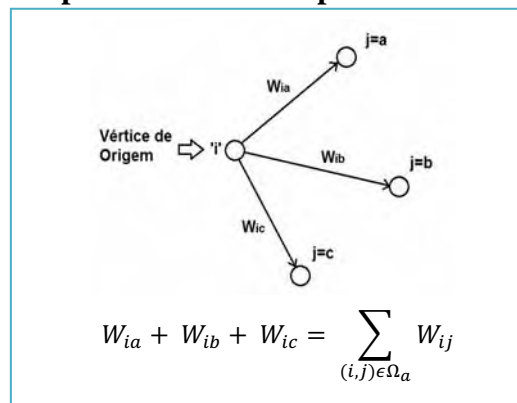
$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,i) \in \Omega_a} W_{ki} = -1; \text{ tipo}_i + \text{ntipo}_i = -1, \forall i \in \Omega_n \quad (4)$$

A expressão (1) representa a função objetivo que permite calcular o caminho com tempo mais curto desde um vértice origem até um vértice destino dentro do modelo simplificado da cidade.

Nas restrições (2, 3 e 4) se apresentam dois tipos de termos com as seguintes características:

$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij}$: Indica o somatório de todos os valores das ligações W_{ij} que saem do vértice 'i', até qualquer outro vértice representado por 'j', como o mostrado na figura 20. Este termo basicamente define ao vértice 'i' como a origem.

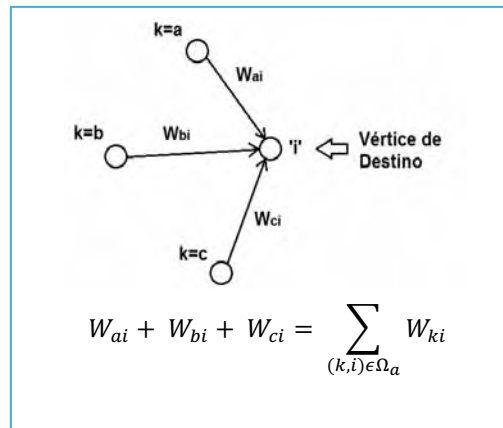
Figura 20: Expressão somatório para o vértice da Origem.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

$\sum_{(k,i) \in \Omega_a} W_{ki}$: Indica o somatório de todas as ligações W_{ij} que entram no vértice 'i', desde qualquer outro vértice representado por 'k', como o mostrado na figura 21. Este termo basicamente define ao vértice 'i' como o destino.

Figura 21: Expressão somatório para o vértice de Destino.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

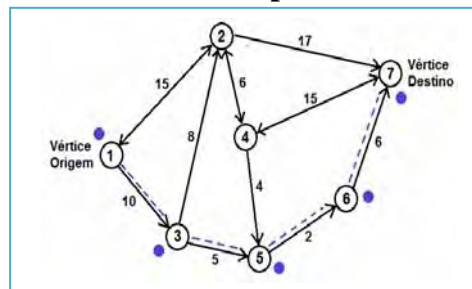
A expressão (2) se aplica só para um vértice ‘ i ’ ($\forall i \in \Omega_n$) considerado como vértice de origem, entre os outros vértices adjacentes encontra-se o vértice de destino, sendo que o termo $\sum_{(k,i) \in \Omega_a} W_{ki}$, necessariamente assume o valor de zero, reafirmando a expressão (2) como única para um vértice de origem, garantida pela condição $ntipo_i + tipo_i = 1$.

A expressão (3) se aplica só a aqueles vértices diferentes à origem e ao destino, sendo garantida pela condição $ntipo_i + tipo_i = 0$.

Finalmente a expressão (4) se aplica só para um vértice ‘ i ’ ($\forall i \in \Omega_n$) considerado como vértice de destino, sendo que entre os vértices encontra-se o vértice de destino, tendo como consequência que o termo $\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij}$, assume o valor de zero, reafirmando a expressão (4) como única para um vértice de destino, sendo garantida pela condição $ntipo_i + tipo_i = -1$.

Como exemplo, apresenta-se o seguinte grafo (ver figura 22), onde se mostra o caminho mais curto entre os vértices ‘1’ e ‘7’, segundo a formulação apresentada:

Figura 22: Caminho com Menor Tempo de Demora entre vértice ‘1’ e ‘7’.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os conjuntos e os respectivos dados são apresentados na tabela 18:

**Tabela 18: Conjunto de ligações ‘ Ω_a ’ –
Vértices ‘ Ω_n ’ e Dados.**

$(i,j) \in \Omega_a$	ds_{ij}	vp_{ij}	ne_{ij}	nf_{ij}	ns_{ij}	$i \in \Omega_n$	$tipo$
(1,2)	15	50	0	1	1	1	1
(1,3)	10	30	0	1	1	2	0
(2,1)	15	50	0	1	1	3	0
(2,4)	6	50	1	1	1	4	0
(2,7)	17	30	0	1	1	5	0
(3,2)	8	30	0	0	0	6	0
(3,5)	5	30	1	1	1	7	-1
(4,2)	6	50	1	1	1		
(4,5)	4	30	0	0	0		
(4,7)	15	50	0	1	1	<i>temp</i>	<i>Hrs</i>
(5,6)	2	30	0	1	1	tpe	0.050
(6,7)	6	30	0	0	0	tpf	0.033
(7,4)	15	50	0	1	1	tps	0.016

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As variáveis de decisão são dadas por:

$$\forall W_{ij} \in \{0,1\} \Rightarrow W_{12}, W_{13}, W_{21}, W_{24}, W_{27}, W_{32}, W_{35}, W_{42}, W_{45}, W_{47}, W_{56}, W_{67}, W_{74}.$$

A função objetivo (expressão (1)) apresenta a forma desenvolvida seguinte:

Minimizar t_{demora} :

$$(0.349) * W_{12} + (0.382) * W_{13} + (0.349) * W_{21} + (0.219) * W_{24} + (0.615) * W_{27} + (0.266) * W_{32} \\ + (0.265) * W_{35} + (0.219) * W_{42} + (0.133) * W_{45} + (0.349) * W_{47} + (0.116) * W_{56} \\ + (0.200) * W_{67} + (0.349) * W_{74}$$

As restrições (expressões (2, 3 e 4)) são desenvolvidas como:

Para a expressão (2):

$$(W_{12} + W_{13}) - (0) = 1; \quad i = 1 \quad (\text{Vért. Origem})$$

Para a expressão (3):

$$(W_{27} + W_{24}) - (W_{12} + W_{32}) = 0; \quad i = 2$$

$$(W_{32} + W_{35}) - (W_{13}) = 0; \quad i = 3$$

$$(W_{47} + W_{45}) - (W_{24}) = 0; \quad i = 4$$

(Vért. Intermediários)

$$(W_{56}) - (W_{45} + W_{35}) = 0; \quad i = 5$$

$$(W_{67}) - (W_{56}) = 0; \quad i = 6$$

Para a expressão (4):

$$(0) - (W_{27} + W_{47} + W_{67}) = -1; \quad i = 7 \quad (\text{Vért. Destino})$$

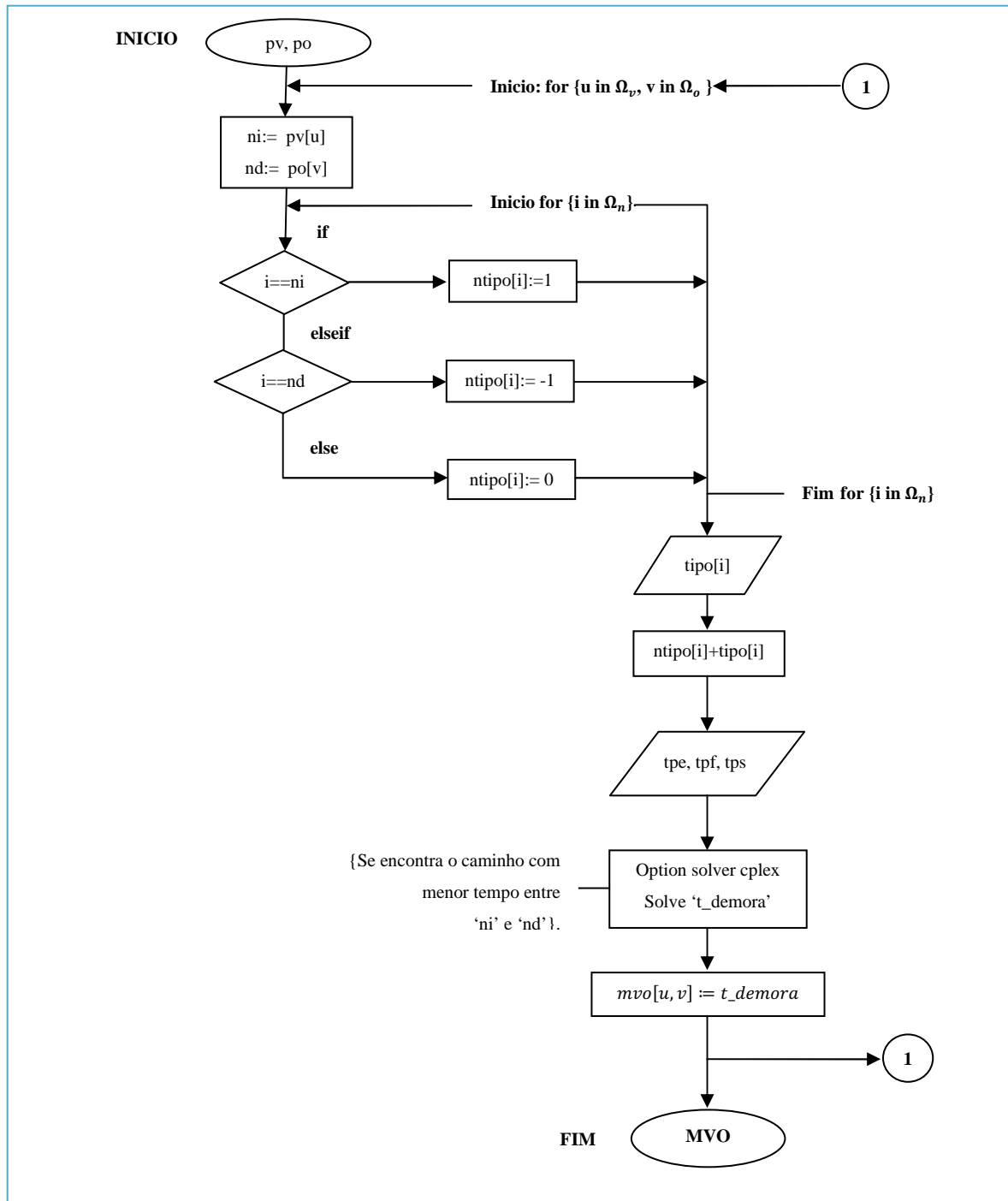
Finalmente o caminho mais curto se obtém para valores:

$$\begin{aligned} W_{13} &= 1 \\ W_{35} &= 1 \\ W_{56} &= 1 \\ W_{67} &= 1 \end{aligned} \quad \Rightarrow t_{demora}: (0.382) * W_{13} + (0.265) * W_{35} + (0.116) * W_{56} + (0.200) * W_{67}$$

$$\Rightarrow t_{demora} : 0.963 \text{ (Hrs).}$$

A formulação do modelo matemático de programação linear inteiro misto é executada como uma parte do processo iterativo para o cálculo de cada elemento das matrizes **mvo**, **moo**, **mov** segundo como se mostram nos respectivos diagramas de fluxo (ver figura 23, 24, e 25).

Figura 23: Diagrama de Fluxo da Matriz Viatura-Ocorrência (MVO).

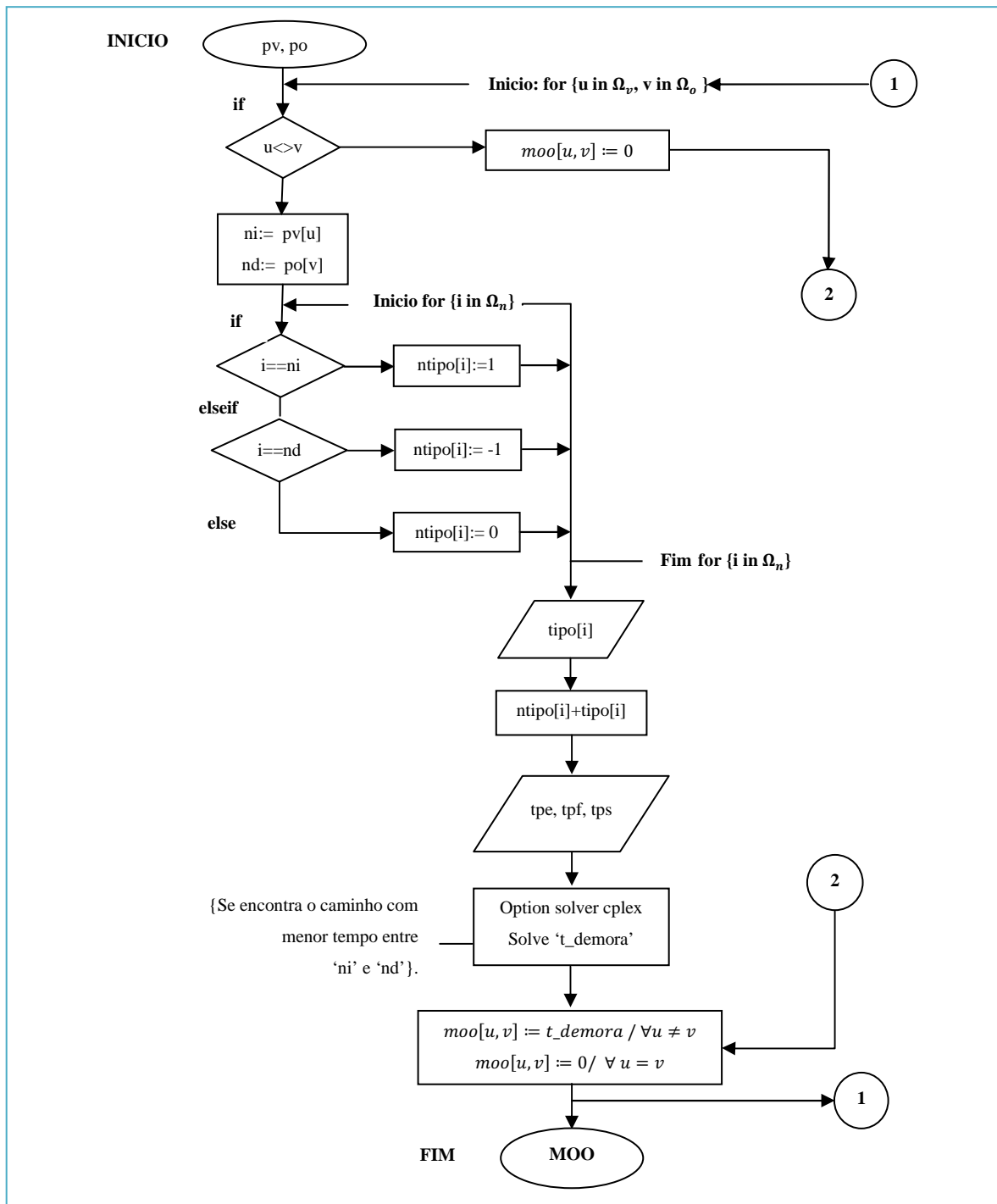


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No diagrama de fluxo da matriz MVO (ver figura 23) as posições das viaturas, $pv[u]$; $\forall u \in \Omega_v$, e as ocorrências, $po[v]$; $\forall v \in \Omega_o$ devem ser conhecidos antes da execução do modelo matemático-fase 1, ingressando em modo vetor ao processo iterativo, onde os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas viaturas são os vértices de origem, sendo os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas ocorrências os vértices de destino, gerando-se um valor

característico para cada vértice (1: origem; -1: destino e 0: outro) e sendo armazenado num vetor '*ntipo*' e somado ao vetor '*tipo*' ($tipo[i] = 0; \forall i \in \Omega_n$) e considerando os dados de tempo de demora: tpe, tpf e tps é finalmente chamado a resolver-se o modelo matemático – fase 1 '*t_demora*', obtendo um caminho com o menor tempo de demora e sendo este tempo um elemento '*mvo*[*u, v*]' da matriz MVO.

Figura 24: Diagrama de Fluxo da Matriz Ocorrência-Ocorrência (MOO).

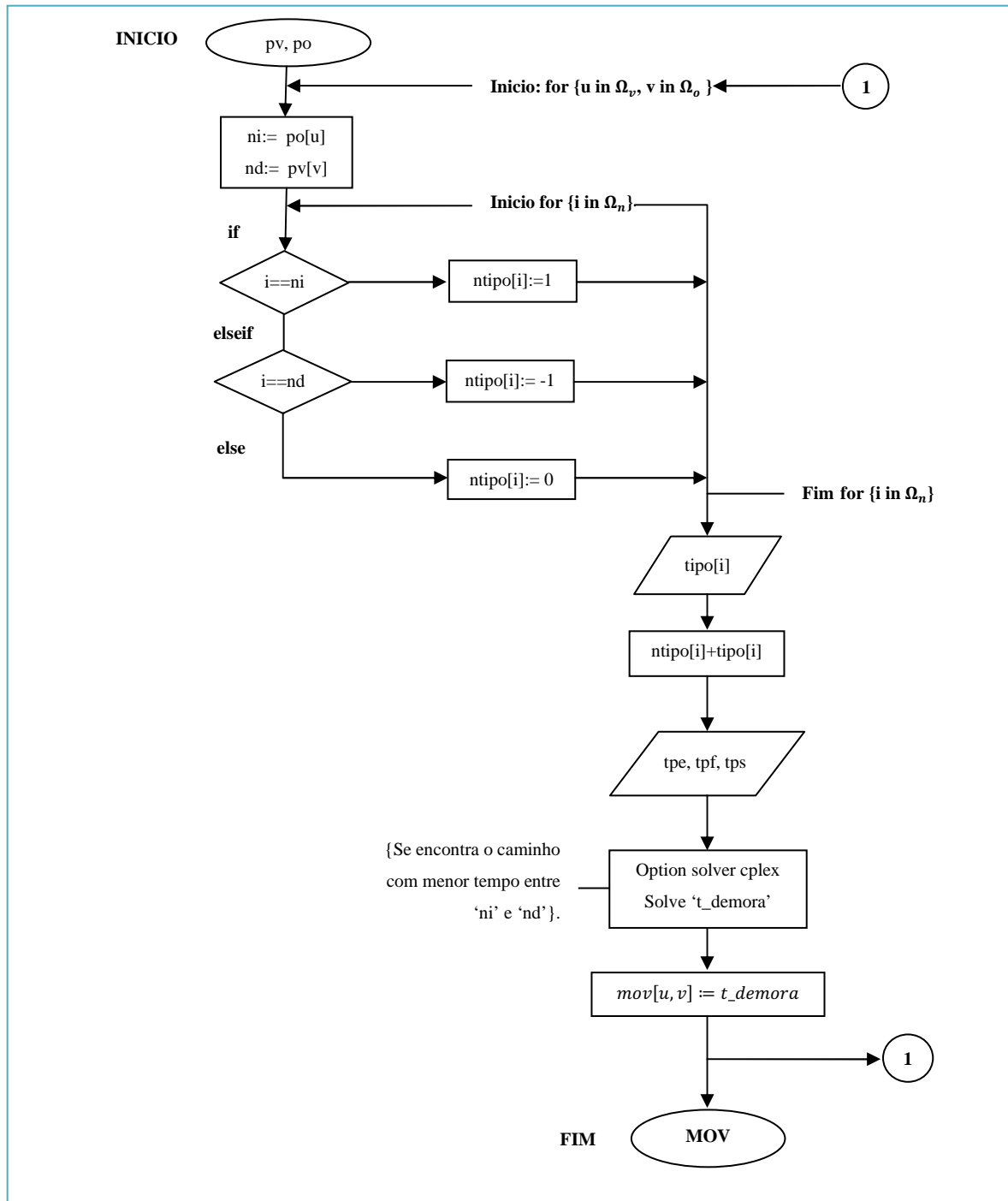


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

No diagrama de fluxo da matriz MOO (ver figura 24) é mostrado que as posições das ocorrências $po[u]$; $\forall u \in \Omega_o$ (linha da matriz MOO), tanto como das ocorrências, $pv[v]$; $\forall v \in \Omega_o$ (coluna da matriz MOO) devem ser conhecidos antes da execução do modelo matemático-fase 1, ingressando em modo vetor ao processo iterativo, onde os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas ocorrências-linha da matriz MOO são tomados como vértices de origem, conseqüentemente os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas ocorrências-coluna da matriz MOO são os vértices de destino, gerando-se um valor característico para cada vértice (1: origem; -1: destino e 0: outro) e sendo armazenado num vetor ' $ntipo$ ' e somado ao vetor ' $tipo$ ' ($tipo[i] = 0$; $\forall i \in \Omega_n$) e logo considerando os dados dos tempo de demora como: tpe, tpf e tps é finalmente chamado para resolver o modelo matemático – fase 1 ' t_demora ', obtendo um caminho com o menor tempo de demora e sendo este tempo um elemento ' $moo[u, v]$ ' ($\forall u \neq v$) da matriz MOO. Cabe salientar que cada elemento da diagonal principal ' $moo[u, v] = 0$ ' ($\forall u = v$).

No diagrama de fluxo da matriz MOV (ver figura 25) é mostrado que as posições das ocorrências $po[u]$; $\forall u \in \Omega_o$, tanto como das viaturas $pv[v]$; $\forall v \in \Omega_v$ devem ser conhecidas antes da execução do modelo matemático-fase 1, ingressando em modo vetor ao processo iterativo, onde os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas ocorrências são tomados como vértices de origem, conseqüentemente os vértices ' i ' ($\forall i \in \Omega_n$) ocupados pelas viaturas são os vértices de destino, gerando-se um valor característico para cada vértice (1: origem; -1: destino e 0: outro) e sendo armazenado num vetor ' $ntipo$ ' e somado ao vetor ' $tipo$ ' ($tipo[i] = 0$; $\forall i \in \Omega_n$) e logo considerando os dados dos tempo de demora como: tpe, tpf e tps é finalmente chamado para resolver o modelo matemático – fase 1 ' t_demora ', obtendo o caminho com o menor tempo de demora e sendo este tempo um elemento ' $mov[u, v]$ ' da matriz MOV.

Figura 25: Diagrama de Fluxo da Matriz Ocorrência-Viatura (MOV).



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.3.2 Fase 2: Modelo para o Atendimento das Ocorrências

O modelo matemático a apresentar nesta fase está relacionado mais diretamente com a linha de tempos da gestão de consumidores (ver figura 2) sendo o seguinte:

Minimizar:

$$fob: \sum_{j \in \Omega_o} ml_j * \left(1 - \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \right) + \sum_{i \in \Omega_v} ct_i * h_i + \sum_{j \in \Omega_o} MULT_j * EXS_j + MULT_DEC * ALPHA_DEC \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \quad (2)$$

$$/ tpa_j \leq kp_i$$

$$\sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 0; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \quad (3)$$

$$/ tpa_j > kp_i$$

$$\sum_{i \in \Omega_v} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \quad (4)$$

$$\sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (5)$$

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 1; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} \leq \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t-1}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (8)$$

$$/ t > 1$$

$$\beta_{i,t} = \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (9)$$

$$\delta_{i,t} = \beta_{i,t} - \beta_{i,t+1}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (10)$$

$$/ t < |\Omega_t|$$

$$\sum_{t \in \Omega_t} \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} \sum_{j \in \Omega_o} mvo_{ij} * X_{i,j,t} +$$

$$\sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{kj} * Z_{i,j,k,t} + \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t<|\Omega_t|}} \sum_{j \in \Omega_o} mov_{j,i} * \alpha_{i,j,t} \quad \forall i \in \Omega_v \quad (11)$$

$$\leq hr_i + h_i;$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{0} \leq \mathbf{Z}_{i,j,k,t} \wedge \mathbf{Z}_{i,j,k,t} \leq \mathbf{X}_{i,j,t}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \\
& \quad / t > 1
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{0} \leq \mathbf{Z}_{i,j,k,t} \wedge \mathbf{Z}_{i,j,k,t} \leq \mathbf{X}_{i,k,t-1}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \\
& \quad / t > 1
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
(\mathbf{X}_{i,j,t} + \mathbf{X}_{i,k,t-1}) - \mathbf{1} \leq \mathbf{Z}_{i,j,k,t}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \\
& \quad / t > 1
\end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{Z}_{i,j,k,t} \leq \mathbf{1}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \\
& \quad / t > 1
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{X}_{i,j,t}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t|
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq \delta_{i,t}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t|
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
(\delta_{i,t} + \mathbf{X}_{i,j,t}) - \mathbf{1} \leq \alpha_{i,j,t}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t|
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
\alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{1}; & \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
& \quad \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t|
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
TDI_j = & \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} mvo_{ij} * X_{i,j,t} \\
& + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} \lambda_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t}; \quad \forall j \in \Omega_o
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
0 \leq -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \wedge -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \leq M * (1 - Z_{i,j,k,t}); \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
\forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
0 \leq \lambda_{i,j,k,t} \wedge \lambda_{i,j,k,t} \leq M * (Z_{i,j,k,t}); \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
\forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t
\end{aligned} \tag{22}$$

$$TDI_j \leq TDI_max_j + EXS_j; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 1 \tag{23}$$

$$\frac{1}{Cs} * \sum_{j \in \Omega_o} Ca_j * TDI_j \leq DEC_max + ALPHA_DEC; \tag{24}$$

$$\forall X_{i,j,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall Z_{i,j,k,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
\forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall \beta_{i,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall \delta_{i,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall \alpha_{i,j,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall \lambda_{i,j,k,t}, \text{ binario}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \\
\forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall h_i \geq 0; \quad \forall i \in \Omega_v$$

$$\forall TDI_j \geq 0;$$

$$\forall j \in \Omega_o$$

$$\forall EXS_j \geq 0;$$

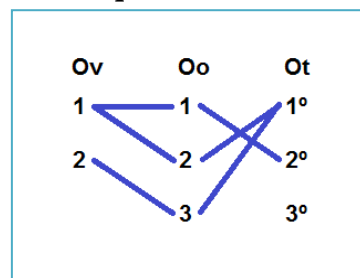
$$\forall j \in \Omega_o$$

$$\forall ALPHA_DEC \geq 0;$$

A expressão (1) representa a função objetivo do modelo matemático-fase 2. Esta expressão é formada por quatro termos, que na totalidade representam os gastos a ser feitos pela empresa concessionária devido a descumprimentos como: o não atendimento a uma ocorrência com determinada prioridade, excesso de horas de trabalho pelas viaturas, ultrapassar os limites de tempo de reparo estabelecidos para ocorrências de tipo emergenciais e excesso de valor de DEC estabelecido para um período considerado, segundo ANEEL.

O primeiro termo da expressão (1) é o resultado do somatório das multas obtidas ao não atendimento das ocorrências 'j' pelas viaturas 'i' numa respectiva ordem 't' da concessionária. Por exemplo, seja $|\Omega_v| = 2$, $|\Omega_o| = 3$ e $|\Omega_t| = 3$ de onde se apresenta a seguinte sequência de atendimentos para as viaturas disponíveis segundo a figura 26.

Figura 26: Sequência de Atendimentos.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desenvolvendo o primeiro termo da expressão (1) temos:

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \Omega_o} ml_j * (1 - \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t}) = & ml_1 * [1 - (X_{111} + X_{112} + X_{113} + X_{211} + X_{212} + X_{213})] + \\ & ml_2 * [1 - (X_{121} + X_{122} + X_{123} + X_{221} + X_{222} + X_{223})] + \\ & ml_3 * [1 - (X_{131} + X_{132} + X_{133} + X_{231} + X_{232} + X_{233})] \end{aligned}$$

Da sequência de atendimentos pelas viaturas disponíveis (ver figure 26) podemos dizer que:

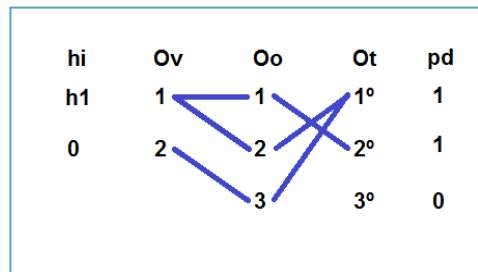
$$X_{121} = 1, \quad X_{112} = 1, \quad X_{231} = 1.$$

O qual mostra que todas as ocorrências ‘j’ são atendidas pelas viaturas ‘i’ numa ordem ‘t’ determinada, assim temos que:

$$\sum_{j \in \Omega_o} ml_j * \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = ml_1 * [1 - (X_{112})] + ml_2 * [1 - (X_{121})] + ml_3 * [1 - (X_{231})] = 0 \quad \dots (1.1)$$

O segundo termo da expressão (1) é considerado somente para as viaturas ‘i’ que geram horas extras ‘h_i’ no atendimento das ocorrências ‘j’, e são penalizadas pelo custo por cada hora ‘ct_i’, no horário de trabalho diário. Para o exemplo anterior considera-se:

Figura 27: Sequência de Atendimentos com Custo por Horas Extra.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

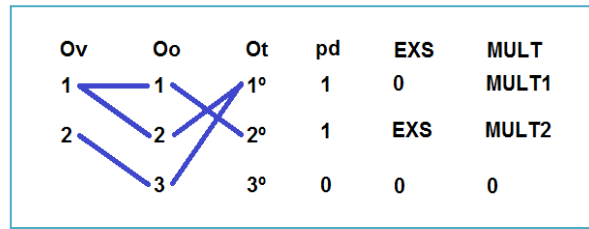
Desenvolvendo o segundo termo da expressão (1) tem-se:

$$\sum_{i \in \Omega_v} ct_i * h_i = ct_1 * h_1 + ct_2 * (0) = ct_1 * h_1 \quad \dots (1.2)$$

Segundo os dados (ver figura 27) o resultado obtido do desenvolvimento do segundo termo indica o pagamento adicional a ser cobrado à concessionária por cada hora ou fração de horas extras geradas fora do horário diário de trabalho da viatura ‘i’ para o atendimento de ocorrências ‘j’ de prioridade emergencial. Neste caso específico a viatura ‘1’ gera horas extras ‘h₁’ para completar a sequência de atendimentos atribuída.

O terceiro termo da expressão (1) se aplica especificamente para aquelas ocorrências ‘j’ de caráter emergencial (pd_j = 1) para as quais se estabelece um tempo limite de reparo, sendo que ao ultrapassar dito limite ‘EXS_j’ é cobrado à concessionária por cada hora ou fração um valor de multa ‘MULT_j’.

Figura 28: Sequência de Atendimentos com Tempo de Excesso ao Limite de Reparo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desenvolvendo o terceiro termo da expressão (1) tem-se:

$$\sum_{j \in \Omega_o} MULT_j * EXS_j = MULT_1 * (0) + MULT_2 * (EXS_2) = MULT_2 * EXS_2 \dots (1.3)$$

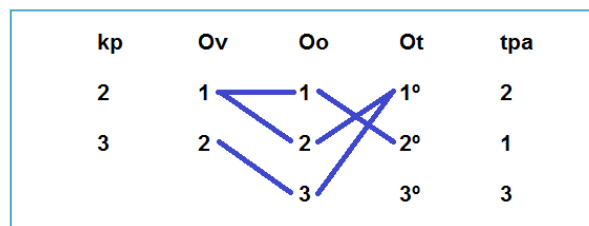
Segundo os dados (ver figura 28) e o resultado obtido no desenvolvimento do terceiro termo temos um valor de multa a ser cobrado à concessionária por ultrapassar o tempo limite de reparo estabelecido para o atendimento da ocorrência '2' de prioridade emergencial.

O quarto termo da expressão (1) indica o valor de multa a cobrar à concessionária por ultrapassar o valor de DEC estabelecido pela ANEEL para um determinado período.

$$MULT_DEC * ALPHA_DEC \dots (1.4)$$

A expressão (2) representa uma restrição que garante que uma viatura 'i' com capacidade de atendimento 'kp_i' pode atender uma ocorrência 'j' que possui um valor de tipo de atendimento 'tpa_j' menor ao valor 'kp_i' em só uma determinada e única ordem 't'.

Figura 29: Sequência de Atendimentos com Capacidade e Tipo de Atendimento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desenvolvendo a expressão (2) e segundo a sequência de atendimento estabelecida (ver figura 29) temos:

$$\sum_{i \in \Omega_t} X_{i,j,t} \leq 1; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o / tpa_j \leq kp_i \dots (2)$$

$$X_{111} + X_{112} + X_{113} \leq 1; \quad i = 1 \wedge j = 1 \quad \Rightarrow \quad 0 + X_{112} + 0 \leq 1; \quad tpa_1 \leq kp_1$$

$$X_{121} + X_{122} + X_{123} \leq 1; \quad i = 1 \wedge j = 2 \quad \Rightarrow \quad X_{121} + 0 + 0 \leq 1; \quad tpa_2 \leq kp_1$$

$$\begin{array}{ll}
X_{131} + X_{132} + X_{133} \leq 1; & i = 1 \wedge j = 3 & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & tpa_3 \leq kp_1 \\
X_{211} + X_{212} + X_{213} \leq 1; & i = 2 \wedge j = 1 & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & tpa_1 \leq kp_2 \\
X_{221} + X_{222} + X_{223} \leq 1; & i = 2 \wedge j = 2 & \Rightarrow & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & tpa_2 \leq kp_2 \\
X_{231} + X_{232} + X_{233} \leq 1; & i = 2 \wedge j = 3 & & X_{231} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & tpa_3 \leq kp_2
\end{array}$$

A expressão (3) representa uma restrição que complementa a restrição (2) e garante que toda viatura ‘ i ’ com capacidade de atendimento ‘ kp_i ’ inferior ao valor do tipo de atendimento ‘ tpa_j ’ da ocorrência ‘ j ’ não seja considerada, tendo assim:

$$\sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 0; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o / tpa_j > kp_i \dots (3)$$

Desenvolvendo a expressão (3) e tomando em conta a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 29) temos:

$$\begin{array}{ll}
X_{111} + X_{112} + X_{113} = 0; & i = 1 \wedge j = 1 & X_{111} = X_{112} = X_{113} = 0; & tpa_1 > kp_1 \\
X_{121} + X_{122} + X_{123} = 0; & i = 1 \wedge j = 2 & \Rightarrow & X_{121} = X_{122} = X_{123} = 0; & tpa_2 > kp_1 \\
X_{131} + X_{132} + X_{133} = 0; & i = 1 \wedge j = 3 & & X_{131} = X_{132} = X_{133} = 0; & tpa_3 > kp_1 \\
\\
X_{211} + X_{212} + X_{213} = 0; & i = 2 \wedge j = 1 & X_{211} = X_{212} = X_{213} = 0; & tpa_1 > kp_2 \\
X_{221} + X_{222} + X_{223} = 0; & i = 2 \wedge j = 2 & \Rightarrow & X_{221} = X_{222} = X_{223} = 0; & tpa_2 > kp_2 \\
X_{231} + X_{232} + X_{233} = 0; & i = 2 \wedge j = 3 & & X_{231} = X_{232} = X_{233} = 0; & tpa_3 > kp_2
\end{array}$$

A expressão (4) garante o fato que uma ocorrência ‘ j ’ pode ser atendida numa determinada ordem ‘ t ’ por somente uma viatura ‘ i ’.

$$\sum_{i \in \Omega_v} X_{i,j,t} \leq 1; \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \dots (4)$$

Desenvolvendo a expressão (4) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

$$\begin{array}{ll}
X_{111} + X_{211} + X_{311} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 1 & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 1 \\
X_{112} + X_{212} + X_{312} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 2 & \Rightarrow & X_{112} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 2
\end{array}$$

$$\begin{array}{ll}
X_{113} + X_{213} + X_{313} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 3 & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 1 \wedge t = 3 \\
\\
X_{121} + X_{221} + X_{321} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 1 & X_{121} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 1 \\
X_{122} + X_{222} + X_{322} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 2 & \Rightarrow & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 2 \\
X_{123} + X_{223} + X_{323} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 3 & & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 2 \wedge t = 3 \\
\\
X_{131} + X_{231} + X_{331} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 1 & \mathbf{0} + X_{231} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 1 \\
X_{132} + X_{232} + X_{332} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 2 & \Rightarrow & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 2 \\
X_{133} + X_{233} + X_{333} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 3 & & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & j = 3 \wedge t = 3
\end{array}$$

A expressão (5) garante que a viatura ‘*i*’ pode atender numa determinada ordem ‘*t*’ a somente uma ocorrência ‘*j*’.

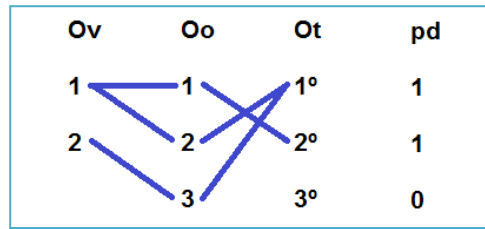
$$\sum_{j \in \Omega_j} X_{i,j,t} \leq 1; \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \dots (5)$$

Desenvolvendo a expressão (5) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

$$\begin{array}{ll}
X_{111} + X_{121} + X_{131} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 1 & \mathbf{0} + X_{121} + \mathbf{0} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 1 \\
X_{112} + X_{122} + X_{132} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 2 & \Rightarrow & X_{112} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 2 \\
X_{113} + X_{123} + X_{133} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 3 & & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & i = 1 \wedge t = 3 \\
\\
X_{211} + X_{221} + X_{231} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 1 & \mathbf{0} + \mathbf{0} + X_{231} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 1 \\
X_{212} + X_{222} + X_{232} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 2 & \Rightarrow & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 2 \\
X_{213} + X_{223} + X_{233} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 3 & & \mathbf{0} + \mathbf{0} + \mathbf{0} \leq 1; & i = 2 \wedge t = 3
\end{array}$$

As expressões (6) e (7) representam restrições complementares condicionadas ao valor de prioridade que têm cada ocorrência ‘*j*’.

Figura 30: Sequência de Atendimentos com valor de Prioridade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Sendo assim temos que a expressão (6) restringe o atendimento (nesse mesmo dia dentro do horário de trabalho diário) ou não atendimento (deixar para o dia seguinte) da ocorrência ‘j’ de prioridade não emergencial por só uma viatura ‘i’ numa determinada ordem ‘t’.

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \leq 1; \forall j \in \Omega_o / \forall pd_j = 0 \dots (6)$$

Desenvolvendo a expressão (6) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 30) temos:

$$\begin{aligned} (X_{111} + X_{112} + X_{113}) + (X_{211} + X_{212} + X_{213}) &\leq 1; \quad j = 1 \wedge i = \{1, 2\} & \mathbf{0 + 0 \leq 1; pd_1 = 1} \\ (X_{121} + X_{122} + X_{123}) + (X_{221} + X_{222} + X_{223}) &\leq 1; \quad j = 2 \wedge i = \{1, 2\} & \Rightarrow \mathbf{0 + 0 \leq 1; pd_2 = 1} \\ (X_{113} + X_{123} + X_{133}) + (X_{231} + X_{232} + X_{233}) &\leq 1; \quad j = 3 \wedge i = \{1, 2\} & \mathbf{0 + X_{231} \leq 1; pd_3 = 0} \end{aligned}$$

E a expressão (7) representa a restrição que garante o atendimento obrigatório (dentro do horário de trabalho diário nesse dia) da ocorrência ‘j’ de prioridade emergencial ($pd_1 = 1$ e $pd_2 = 1$, ver figura 30) por só uma viatura ‘i’ numa determinada ordem ‘t’.

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 1; \forall j \in \Omega_o / \forall pd_j = 1 \dots (7)$$

Desenvolvendo a expressão (7) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 30) temos:

$$\begin{aligned} (X_{111} + X_{112} + X_{113}) + (X_{211} + X_{212} + X_{213}) &= 1; \quad j = 1 \wedge i = \{1, 2\} & \mathbf{X_{112} + 0 = 1; pd_1 = 1} \\ (X_{121} + X_{122} + X_{123}) + (X_{221} + X_{222} + X_{223}) &= 1; \quad j = 2 \wedge i = \{1, 2\} & \Rightarrow \mathbf{X_{121} + 0 = 1; pd_2 = 1} \\ (X_{113} + X_{123} + X_{133}) + (X_{231} + X_{232} + X_{233}) &= 1; \quad j = 3 \wedge i = \{1, 2\} & \mathbf{0 + 0 \neq 1; pd_3 = 0} \end{aligned}$$

A expressão (8) garante o atendimento sequencial no tempo ‘ t ’ no qual é realizado o atendimento da ocorrência ‘ j ’ pela viatura ‘ i ’, isto é, que a viatura ‘ i ’ pode atender numa ocorrência ‘ j ’ na ordem ‘ t ’ tal que $t > 1$, logo de realizar um primeiro atendimento a uma ocorrência ‘ j' ’.

$$\sum_{j \in \Omega_0} X_{i,j,t} \leq \sum_{j \in \Omega_0} X_{i,j,t-1}; \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \dots (8)$$

Desenvolvendo a expressão (8) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

$$\begin{aligned} (X_{112} + X_{122} + X_{132}) &\leq (X_{111} + X_{121} + X_{131}); & i = 1 \wedge t = 2 & & X_{112} \leq X_{121} \\ & & & \Rightarrow & \\ (X_{113} + X_{123} + X_{133}) &\leq (X_{112} + X_{122} + X_{132}); & i = 1 \wedge t = 3 & & 0 \leq X_{112} \\ & & & & \\ (X_{212} + X_{222} + X_{232}) &\leq (X_{211} + X_{221} + X_{231}); & i = 2 \wedge t = 2 & & 0 \leq X_{231} \\ & & & \Rightarrow & \\ (X_{213} + X_{223} + X_{233}) &\leq (X_{212} + X_{222} + X_{232}); & i = 2 \wedge t = 3 & & 0 \leq 0 \end{aligned}$$

As expressões (9), (10), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18) e (19) são utilizadas para representar a restrição (11) que garante que para cada viatura ‘ i ’ a soma dos tempos de atendimento de cada ocorrência ‘ j ’ e o tempo de deslocamento entre as posições de cada ocorrência ‘ j ’ da sequência atribuída ao horário de trabalho diário a viatura ‘ i ’ seja menor ou igual ao horário de trabalho estabelecido ‘ hr_i ’ mais o tempo de excesso ‘ h ’ por atendimentos de prioridade emergencial.

$$\sum_{t \in \Omega_t} \sum_{j \in \Omega_0} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} \sum_{j \in \Omega_0} mvo_{i,j} * X_{i,j,t} + \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{j \in \Omega_0} \sum_{k \in \Omega_0} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t} + \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t < |\Omega_t|}} \sum_{j \in \Omega_0} mov_{j,i} * \alpha_{i,j,t} \leq hr_i + h_i \dots (11)$$

Sendo $\forall i \in \Omega_v$, uma análise de cada termo da expressão (11) será feito para um maior entendimento da origem das expressões (9), (10), (12), (13), (14), (15), (16), (17), (18) e (19).

O primeiro termo representa os tempos de atendimento das ocorrências ‘ j ’ e começa desde que a viatura ‘ i ’ chega ao local da ocorrência ‘ j ’ e termina quando a viatura ‘ i ’ sai do local e vai para o próximo atendimento ou à garagem, isto dependendo da sequência de atendimentos atribuída a cada viatura ‘ i ’ no horário de trabalho diário.

$$\sum_{t \in \Omega_t} \sum_{j \in \Omega_0} X_{i,j,t} * ta_j; \forall i \in \Omega_v \dots (11.1)$$

Desenvolvendo o primeiro termo (11.1) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

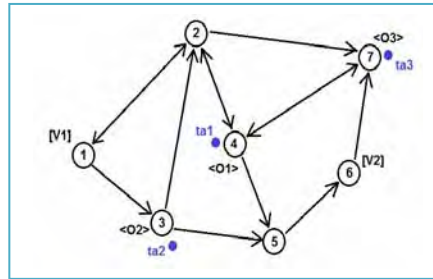
Para a viatura $i = 1$:

$$\begin{aligned} & [X_{111} * ta_1 + X_{121} * ta_2 + X_{131} * ta_3]_{t=1} + \\ & [X_{112} * ta_1 + X_{122} * ta_2 + X_{132} * ta_3]_{t=2} + \quad \Rightarrow \quad [X_{121} * ta_2]_{t=1} + [X_{112} * ta_1]_{t=2} + [0]_{t=3} \\ & [X_{113} * ta_1 + X_{123} * ta_2 + X_{133} * ta_3]_{t=3} \end{aligned}$$

Para a viatura $i = 2$:

$$\begin{aligned} & [X_{211} * ta_1 + X_{221} * ta_2 + X_{231} * ta_3]_{t=1} + \\ & [X_{212} * ta_1 + X_{222} * ta_2 + X_{232} * ta_3]_{t=2} + \quad \Rightarrow \quad [X_{231} * ta_3]_{t=1} + [0]_{t=2} + [0]_{t=3} \\ & [X_{213} * ta_1 + X_{223} * ta_2 + X_{233} * ta_3]_{t=3} \end{aligned}$$

Figura 31: Tempo de Atendimento indicados nas Posições das Ocorrências



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O segundo termo representa o tempo de deslocamento da viatura 'i' desde a garagem até o local do primeiro atendimento da ocorrência 'j'.

$$\sum_{\substack{i \in \Omega_i \\ /t=1}} \sum_{j \in \Omega_o} mvo_{ij} * X_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v \quad \dots (11.2)$$

Desenvolvendo o termo primeiro (11.2) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

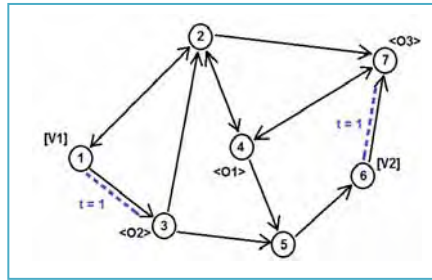
Para a viatura $i = 1$:

$$[mvo[1,1] * X_{111} + mvo[1,2] * X_{121} + mvo[1,3] * X_{131}]_{t=1} \quad \Rightarrow \quad [mvo[1,2] * X_{121}]_{t=1}$$

Para a viatura $i = 2$:

$$[mvo[2,1] * X_{211} + mvo[2,2] * X_{221} + mvo[2,3] * X_{231}]_{t=1} \Rightarrow [mvo[2,3] * X_{231}]_{t=1}$$

Figura 32: Deslocamentos até os primeiros atendimentos feitos pelas respectivas viaturas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O terceiro termo representa o tempo de deslocamento da viatura ‘ i ’ (saindo do local do primeiro atendimento) segundo a sequência de atendimento atribuída à viatura ‘ i ’ e termina com a chegada ao local da última ocorrência ‘ j ’.

$$\sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1}; \forall i \in \Omega_v \quad \dots (11.3)$$

A expressão (11.3) é a expressão original do terceiro termo. Com base nesta expressão faremos o desenvolvimento respectivo para cada viatura ‘ i ’ e segundo os atendimentos estabelecidos (ver figura 26) temos:

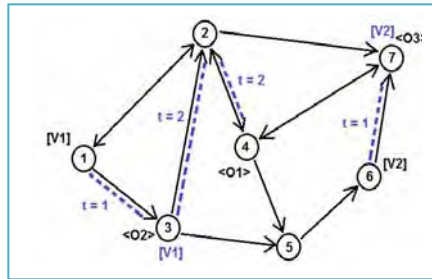
Para a viatura $i = 1$:

$$\begin{aligned} & [(moo[1,1] * X_{112} * X_{111} + moo[2,1] * X_{112} * X_{121} + moo[3,1] * X_{112} * X_{131})_{j=1} + \\ & (moo[1,2] * X_{122} * X_{111} + moo[2,2] * X_{122} * X_{121} + moo[3,2] * X_{122} * X_{131})_{j=2} + \\ & (moo[1,3] * X_{132} * X_{111} + moo[2,3] * X_{132} * X_{121} + moo[3,3] * X_{132} * X_{131})_{j=3}]_{t=2} + \\ & [(moo[1,1] * X_{113} * X_{112} + moo[2,1] * X_{113} * X_{122} + moo[3,1] * X_{113} * X_{132})_{j=1} + \\ & (moo[1,2] * X_{123} * X_{112} + moo[2,2] * X_{123} * X_{122} + moo[3,2] * X_{123} * X_{132})_{j=2} + \\ & (moo[1,3] * X_{133} * X_{112} + moo[2,3] * X_{133} * X_{122} + moo[3,3] * X_{133} * X_{132})_{j=3}]_{t=3} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} & [moo[2,1] \\ & * X_{112} \\ & * X_{121}]_{t=2} \end{aligned}$$

Para a viatura $i = 2$:

$$\begin{aligned}
 & [(moo[1,1] * X_{212} * X_{211} + moo[2,1] * X_{212} * X_{221} + moo[3,1] * X_{212} * X_{231})_{j=1} + \\
 & (moo[1,2] * X_{222} * X_{211} + moo[2,2] * X_{222} * X_{221} + moo[3,2] * X_{222} * X_{231})_{j=2} + \\
 & (moo[1,3] * X_{232} * X_{211} + moo[2,3] * X_{232} * X_{221} + moo[3,3] * X_{232} * X_{231})_{j=3}]_{t=2} + \\
 & [(moo[1,1] * X_{213} * X_{212} + moo[2,1] * X_{213} * X_{222} + moo[3,1] * X_{213} * X_{232})_{j=1} + \\
 & (moo[1,2] * X_{223} * X_{212} + moo[2,2] * X_{223} * X_{222} + moo[3,2] * X_{223} * X_{232})_{j=2} + \\
 & (moo[1,3] * X_{233} * X_{212} + moo[2,3] * X_{233} * X_{222} + moo[3,3] * X_{233} * X_{232})_{j=3}]_{t=3}
 \end{aligned} \Rightarrow 0$$

Figura 33: Deslocamento entre atendimentos feitos pelas respectivas viaturas.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Segundo o terceiro termo (11.3) temos um produto de duas variáveis binárias ' $X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1}$ ' o qual faz com que este termo seja não linear. Objetivando um modelo de programação linear inteiro misto, formularemos um modelo equivalente que produza o produto das variáveis binárias como segue:

$$Z_{i,j,k,t} = X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

Segundo isto se tem as combinações de valores das variáveis binárias como:

Tabela 19: Equivalência dos Valores Binários das Variáveis $X_{i,j,t}$ e $X_{i,k,t-1}$.

$X_{i,j,t}$	$X_{i,k,t-1}$	$Z_{i,j,k,t}$
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Propõem-se as seguintes expressões lineares:

$$0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,j,t}$$

$$0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,k,t-1}$$

$$X_{i,j,t} + X_{i,k,t-1} - 1 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1$$

Teste baseado nas expressões propostas:

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 0 \\
 * X_{i,j,t} = 0 \wedge X_{i,k,t-1} = 0 & \Rightarrow 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 0 \Rightarrow Z_{i,j,k,t} = 0 \\
 & -1 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1 \\
 * X_{i,j,t} = 1 \wedge X_{i,k,t-1} = 0 & \Rightarrow 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 0 \Rightarrow Z_{i,j,k,t} = 0 \\
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 0 \\
 * X_{i,j,t} = 0 \wedge X_{i,k,t-1} = 1 & \Rightarrow 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1 \Rightarrow Z_{i,j,k,t} = 0 \\
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1 \\
 * X_{i,j,t} = 1 \wedge X_{i,k,t-1} = 1 & \Rightarrow 0 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1 \Rightarrow Z_{i,j,k,t} = 1 \\
 & 1 \leq Z_{i,j,k,t} \leq 1
 \end{aligned}$$

Por tanto resulta numa formulação linear equivalente ao produto de duas variáveis binárias:

$$\sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1} \equiv \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t}; \forall i \in \Omega_v$$

Das expressões lineares propostas obtêm-se as expressões (12), (13), (14) e (15):

$$\mathbf{0} \leq Z_{i,j,k,t} \wedge Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \dots (12)$$

$$\mathbf{0} \leq Z_{i,j,k,t} \wedge Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,k,t-1}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \dots (13)$$

$$(X_{i,j,t} + X_{i,k,t-1}) - \mathbf{1} \leq Z_{i,j,k,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \dots (14)$$

$$Z_{i,j,k,t} \leq \mathbf{1}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \dots (15)$$

O quarto termo (11.4) representa o tempo de deslocamento da viatura ‘i’ que começa saindo do local de atendimento da última ocorrência ‘j’ e segue o percurso até a garagem (posição inicial da viatura ‘i’) respectiva da viaura ‘i’.

$$\sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t < |\Omega_t|}} \sum_{j \in \Omega_o} mov_{j,i} * \delta_{i,t} * X_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v \dots (11.4)$$

De onde:

$$\delta_{i,t} = \beta_{i,t} - \beta_{i,t+1}; \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \dots (10)$$

$$\beta_{i,t} = \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \dots (9)$$

A expressão (11.4) é a expressão original do quarto termo. Com base nesta expressão e nas expressões (10) e (9) faremos o desenvolvimento respectivo para cada viatura ‘i’ e segundo os atendimentos estabelecidos (ver figura 26) temos:

Para a viatura $i = 1$:

$$\begin{array}{l} t = 1: \beta_{11} = X_{111} + X_{121} + X_{131} \\ t = 2: \beta_{12} = X_{112} + X_{122} + X_{132} \end{array} \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} t = 1: \beta_{11} = X_{121} \\ t = 2: \beta_{12} = X_{112} \end{array}$$

$$t = 3: \beta_{13} = X_{113} + X_{123} + X_{133} \qquad t = 3: \beta_{11} = 0$$

$$t = 1: \delta_{11} = \beta_{11} - \beta_{12} \qquad t = 1: \delta_{11} = 0$$

$$t = 2: \delta_{12} = \beta_{12} - \beta_{13} \qquad t = 2: \delta_{12} = 1$$

$$\begin{aligned} & [mov[1,1] * \delta_{11} * X_{111} + mov[2,1] * \delta_{11} * X_{121} + mov[3,1] * \delta_{11} * X_{131}]_{t=1} + \\ & [mov[1,1] * \delta_{12} * X_{112} + mov[2,1] * \delta_{12} * X_{122} + mov[3,1] * \delta_{12} * X_{132}]_{t=2} \Rightarrow mov[1,1] * X_{112} \end{aligned}$$

Para a viatura $i = 2$:

$$t = 1: \beta_{21} = X_{211} + X_{221} + X_{231} \qquad t = 1: \beta_{21} = X_{231}$$

$$t = 2: \beta_{22} = X_{212} + X_{222} + X_{232} \qquad t = 2: \beta_{22} = 0$$

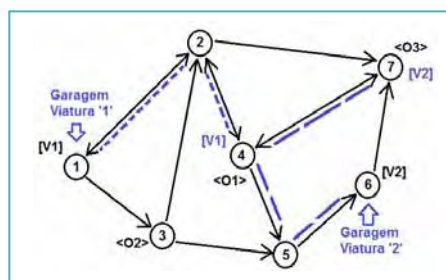
$$t = 3: \beta_{23} = X_{213} + X_{223} + X_{233} \qquad t = 3: \beta_{23} = 0$$

$$t = 1: \delta_{21} = \beta_{21} - \beta_{22} \qquad t = 1: \delta_{21} = 1$$

$$t = 2: \delta_{22} = \beta_{22} - \beta_{23} \qquad t = 2: \delta_{22} = 0$$

$$\begin{aligned} & [mov[1,2] * \delta_{21} * X_{211} + mov[2,2] * \delta_{21} * X_{221} + mov[3,2] * \delta_{21} * X_{231}]_{t=1} + \\ & [mov[1,2] * \delta_{22} * X_{212} + mov[2,2] * \delta_{22} * X_{222} + mov[3,2] * \delta_{22} * X_{232}]_{t=2} \Rightarrow mov[3,2] * X_{231} \end{aligned}$$

Figura 34: Deslocamento das Viaturas do último Atendimento até a Garagem.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Segundo o quarto termo (11.4) temos um produto de duas variáveis binárias “ $\delta_{i,t} * X_{i,j,t}$ ” o qual faz com que seja não linear. Visando em conseguir um modelo de programação linear inteiro misto formularemos uma expressão equivalente que produza o produto das variáveis binárias como segue:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{1} \\
 * \delta_{i,t} = \mathbf{1} \wedge X_{i,j,t} = \mathbf{1} & \Rightarrow \mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{1} \Rightarrow \alpha_{i,j,t} = \mathbf{1} \\
 & \mathbf{1} \leq \alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{1}
 \end{aligned}$$

Portanto resulta numa formulação linear equivalente ao produto de duas variáveis binárias:

$$\sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} mov_{j,i} * \delta_{i,t} * X_{i,j,t} \equiv \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} mov_{j,i} * \alpha_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v$$

Das expressões lineares propostas obtem-se as expressões (16), (17), (18) e (19) como segue:

$$\mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq X_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \dots (16)$$

$$\mathbf{0} \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq \delta_{i,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \dots (17)$$

$$(\delta_{i,t} + X_{i,j,t}) - \mathbf{1} \leq \alpha_{i,j,t}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \dots (18)$$

$$\alpha_{i,j,t} \leq \mathbf{1}; \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \dots (19)$$

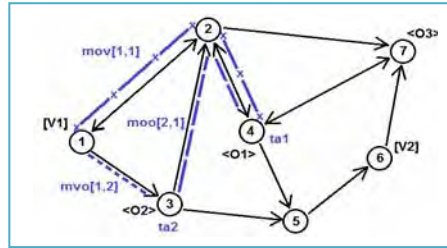
Finalmente juntando os quatro termos para cada viatura ‘i’ temos:

Para a viatura $i = 1$:

$$(ta_2 + ta_1)_{termo \ 1'} + (mvo[1,2])_{termo \ 2'} + (moo[2,1])_{termo \ 3'} + (mov[1,1])_{termo \ 4'} \leq hr_1 + h_1$$

De onde ‘ hr_1 ’ é o parâmetro que indica o tempo de horas diárias de trabalho para a viatura ‘1’ e ‘ h_1 ’ é a variável de tempo extra no caso de atendimento às ocorrências emergenciais ao final do horário de trabalho.

Figura 35: Tempos Totais para a Sequência de Atendimento da Viatura ‘1’.



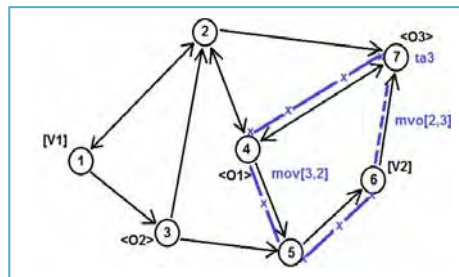
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para a viatura $i = 2$:

$$(ta_3)_{termo\ 14'} + (mvo[2,3])_{termo\ 12'} + (0)_{termo\ 13'} + (mov[3,2])_{termo\ 14'} \leq hr_2 + h_2$$

De onde ' hr_2 ' o parâmetro que indica o tempo de horas diárias de trabalho para a viatura '1' e ' h_2 ' é a variável de tempo extra no caso de atendimento às ocorrências emergenciais ao final do horário de trabalho.

Figura 36: Tempos Totais para a Sequência de Atendimento da Viatura ‘2’.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As expressões (21) e (22) são utilizadas para representar a restrição (20) na qual calcula o tempo total para o atendimento de cada ocorrência ' j ' que inclui os tempos de deslocamentos ' $mvo_{i,j}$ ' e ' $moo_{k,j}$ ' e também os tempos de atendimentos próprios a cada ocorrência ' j ' como ' ta_j '.

$$TDI_j = \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} mvo_{i,j} * X_{i,j,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} \lambda_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t} \dots (20)$$

Sendo $\forall j \in \Omega_o$, um análise de cada termo da expressão (20) será feito para um maior entendimento da origem das expressões (21) e (22).

O primeiro termo representa os tempos de atendimento às ocorrências ‘ j ’ e começa desde que a viatura ‘ i ’ chega ao local da ocorrência ‘ j ’ e termina quando a viatura ‘ i ’ sai do local e vai para o próximo atendimento ou à garagem, isto dependendo da sequência de atendimentos atribuída a cada viatura ‘ i ’ no horário de trabalho diário.

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} * ta_j; \forall j \in \Omega_o \dots (20.1)$$

Desenvolvendo o termo primeiro (20.1) e segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

Para a ocorrência $j = 1$:

$$\begin{aligned} [X_{111} * ta_1 + X_{112} * ta_1 + X_{113} * ta_1]_{i=1} + \\ [X_{211} * ta_1 + X_{212} * ta_1 + X_{213} * ta_1]_{i=2} \end{aligned} \Rightarrow [X_{112} * ta_1]_{i=1} \Rightarrow ta_1$$

Para a ocorrência $j = 2$:

$$\begin{aligned} [X_{121} * ta_2 + X_{122} * ta_2 + X_{123} * ta_2]_{i=1} + \\ [X_{221} * ta_2 + X_{222} * ta_2 + X_{223} * ta_2]_{i=2} \end{aligned} \Rightarrow [X_{121} * ta_2]_{i=1} \Rightarrow ta_2$$

Para a ocorrência $j = 3$:

$$\begin{aligned} [X_{131} * ta_3 + X_{132} * ta_3 + X_{133} * ta_3]_{i=1} + \\ [X_{231} * ta_3 + X_{232} * ta_3 + X_{233} * ta_3]_{i=2} \end{aligned} \Rightarrow [X_{231} * ta_3]_{i=2} \Rightarrow ta_3$$

O segundo termo representa o tempo de deslocamento até o local da ocorrência ‘ j ’ por parte da viatura ‘ i ’, sendo este o primeiro atendimento ($t = 1$) a ser realizado por dita viatura ‘ i ’.

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} mvo_{i,j} * X_{i,j,t}; \forall j \in \Omega_o \dots (20.2)$$

Desenvolvendo o segundo termo (11.2) e tendo uma sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) podemos calcular os primeiros tempos de deslocamento como:

Para a ocorrência $j = 1$:

$$[mvo[1, 1] * X_{111}]_{i=1} + [mvo[2, 1] * X_{211}]_{i=2} \Rightarrow [0] (t = 1)$$

Para a ocorrência $j = 2$:

$$[mvo[1, 2] * X_{121}]_{i=1} + [mvo[2, 2] * X_{221}]_{i=2} \Rightarrow [mvo[1, 2]] (t = 1)$$

Para a ocorrência $j = 3$:

$$[mvo[1, 3] * X_{131}]_{i=1} + [mvo[2, 3] * X_{231}]_{i=2} \Rightarrow [mvo[2, 3]] (t = 1)$$

O terceiro e quarto termo tomam maior significado quando se interpretam na forma de um termo só, como segue:

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} \lambda_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{kj} * Z_{i,j,k,t} \equiv \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} (TDI_k + moo_{k,j}) * X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1}$$

O segundo membro da equivalência anterior é a expressão inicial da qual resultam as expressões do primeiro membro como consequência do processo de linearização. O segundo membro da equivalência representa o tempo de deslocamento desde uma ocorrência 'j' anterior até uma ocorrência atual, ambas atribuídas à viatura 'i' mais o tempo de atendimento total acumulado do atendimento anterior.

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} (TDI_k + moo_{k,j}) * X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1} \dots (20.3)$$

Desenvolvendo o segundo membro da equivalência denominado (20.3) e tendo uma sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) desenvolvemos:

Para a ocorrência $j = 1$:

$$\begin{aligned} & [((TDI_1 + moo[1, 1]) * X_{112} * X_{111} + (TDI_2 + moo[2, 1]) * X_{112} * X_{121} + (TDI_3 + moo[3, 1]) * X_{112} * X_{131})_{t=2} \\ & ((TDI_1 + moo[1, 1]) * X_{113} * X_{112} + (TDI_2 + moo[2, 1]) * X_{113} * X_{122} + (TDI_3 + moo[3, 1]) * X_{113} * X_{132})_{t=3}]_{i=1} + \\ & [((TDI_1 + moo[1, 1]) * X_{212} * X_{211} + (TDI_2 + moo[2, 1]) * X_{212} * X_{221} + (TDI_3 + moo[3, 1]) * X_{212} * X_{231})_{t=2} + \\ & ((TDI_1 + moo[1, 1]) * X_{213} * X_{212} + (TDI_2 + moo[2, 1]) * X_{213} * X_{222} + (TDI_3 + moo[3, 1]) * X_{213} * X_{232})_{t=3}]_{i=2} \end{aligned} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow ((TDI_2 + moo[2, 1]) * X_{112} * X_{121})_{t=2} \Rightarrow TDI_2 + moo[2, 1]$$

Para a ocorrência $j = 2$:

$$\begin{aligned} & [((TDI_1 + moo[1, 2]) * X_{122} * X_{111} + (TDI_2 + moo[2, 2]) * X_{122} * X_{121} + (TDI_3 + moo[3, 2]) * X_{122} * X_{131})_{t=2} \\ & ((TDI_1 + moo[1, 2]) * X_{123} * X_{112} + (TDI_2 + moo[2, 2]) * X_{123} * X_{122} + (TDI_3 + moo[3, 2]) * X_{123} * X_{132})_{t=3}]_{i=1} + \\ & [((TDI_1 + moo[1, 2]) * X_{222} * X_{211} + (TDI_2 + moo[2, 2]) * X_{222} * X_{221} + (TDI_3 + moo[3, 2]) * X_{222} * X_{231})_{t=2} + \\ & ((TDI_1 + moo[1, 2]) * X_{223} * X_{212} + (TDI_2 + moo[2, 2]) * X_{223} * X_{222} + (TDI_3 + moo[3, 2]) * X_{223} * X_{232})_{t=3}]_{i=2} \\ & \Rightarrow 0 \end{aligned}$$

Para a ocorrência $j = 3$:

$$\begin{aligned} & [((TDI_1 + moo[1, 3]) * X_{132} * X_{111} + (TDI_2 + moo[2, 3]) * X_{132} * X_{121} + (TDI_3 + moo[3, 3]) * X_{132} * X_{131})_{t=2} \\ & ((TDI_1 + moo[1, 3]) * X_{133} * X_{112} + (TDI_2 + moo[2, 3]) * X_{133} * X_{122} + (TDI_3 + moo[3, 3]) * X_{133} * X_{132})_{t=3}]_{i=1} + \\ & [((TDI_1 + moo[1, 3]) * X_{232} * X_{211} + (TDI_2 + moo[2, 3]) * X_{232} * X_{221} + (TDI_3 + moo[3, 3]) * X_{232} * X_{231})_{t=2} + \\ & ((TDI_1 + moo[1, 3]) * X_{233} * X_{212} + (TDI_2 + moo[2, 3]) * X_{233} * X_{222} + (TDI_3 + moo[3, 3]) * X_{233} * X_{232})_{t=3}]_{i=2} \\ & \Rightarrow 0 \end{aligned}$$

Juntando os diferentes termos e realizando uma análise segundo a sequência de atendimentos estabelecida (ver figura 26) temos:

Para a ocorrência $j = 2$, atendida na ordem $t = 1$:

$$(ta_2)_{termo\ 1'} + (mvo[1, 2])_{termo\ 2'} + (0)_{termo\ 3'} \Rightarrow TDI_2 = ta_2 + (mvo[1, 2])$$

Devido esta ocorrência ser a primeira a ser atendida, não existe acumulado um tempo total de atendimento de alguma ocorrência anterior ' TDI_j '; por tanto o tempo total de atendimento para esta ocorrência '2' será a soma do tempo de deslocamento que demora a

viatura ‘1’ em ir desde a garagem até a posição da ocorrência ‘2’ mais o tempo de atendimento próprio de dita ocorrência ‘ ta_2 ’.

Para a ocorrência $j = 1$, atendida na ordem $t = 2$:

$$(ta_1)_{termo\ 1'} + (0)_{termo\ 2'} + (TDI_2 + moo[2,1])_{termo\ 3'} \Rightarrow TDI_1 = ta_1 + (TDI_2 + moo[2,1])$$

Observa-se aqui por ser o segundo atendimento da viatura ‘1’, existe acumulado um tempo total de atendimento para esta ocorrência ‘1’ que é ‘ TDI_2 ’ que vem do primeiro atendimento feito pela viatura ‘1’ a isto lhe soma o tempo de deslocamento em ir desde a posição da ocorrência ‘2’ (primeiro atendimento) até a posição da ocorrência ‘1’ (segundo atendimento) mais o tempo de atendimento próprio desta última ocorrência ‘ ta_1 ’.

Para a ocorrência $j = 3$, atendida na ordem $t = 1$:

$$(ta_3)_{termo\ 1'} + (mvo[2,3])_{termo\ 2'} + (0)_{termo\ 3'} \Rightarrow TDI_3 = ta_3 + (mvo[2,3])$$

Aqui também devido a ser o primeiro atendimento da viatura ‘2’, não existe acumulado de tempo total de atendimento de alguma ocorrência anterior ‘ TDI_j ’ então o tempo total de atendimento para a ocorrência ‘3’ está dado pela soma do tempo de deslocamento desde a garagem da viatura ‘2’ até a posição da ocorrência ‘3’ mais o tempo próprio de atendimento da ocorrência ‘3’.

Na expressão (20.3) pode-se observar o produto de duas variáveis binárias ‘ $X_{i,j,t}$ ’ e ‘ $X_{i,k,t-1}$ ’ que geram um termo não linear, a linearização deste produto já foi feita segundo os valores da tabela 19 e as expressões propostas nessa seção, portanto a equivalência com segue:

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} (TDI_k + moo_{k,j}) * X_{i,j,t} * X_{i,k,t-1} \equiv \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} (TDI_k + moo_{k,j}) * Z_{i,j,k,t}$$

Nesta última expressão fazemos o desenvolvimento do produto termo a termo como segue:

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} (TDI_k + moo_{k,j}) * Z_{i,j,k,t} = \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} TDI_k * Z_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t > 1}} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t}$$

No desenvolvimento se observa o produto de duas variáveis ‘ TDI_k ’ variável contínua e ‘ $Z_{i,j,k,t}$ ’ variável binária que forma um termo não linear, sendo assim propõe-se a linearização do termo segundo a forma:

$$\lambda_{i,j,k,t} = TDI_k * Z_{i,j,k,t}$$

Sendo assim:

- Se $Z_{i,j,k,t} = 0$, então $\lambda_{i,j,k,t} = 0$ independentemente do valor de TDI_k , isto é, TDI_k fica livre para assumir qualquer valor permitido.
- Se $Z_{i,j,k,t} = 1$, então $\lambda_{i,j,k,t} = TDI_k$, isto é $\lambda_{i,j,k,t}$ depende do valor de TDI_k .

Segundo a análise anterior propõe-se a expressão linear seguinte:

$$0 \leq -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \leq M * (1 - Z_{i,j,k,t})$$

$$0 \leq \lambda_{i,j,k,t} \leq M * (Z_{i,j,k,t})$$

Teste segundo as expressões lineares propostas:

$$* Z_{i,j,k,t} = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} 0 \leq TDI_k \leq M \\ 0 \leq 0 \leq 0 \end{array} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{i,j,k,t} = 0$$

$$* Z_{i,j,k,t} = 1 \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} 0 \leq 0 \leq 0 \\ 0 \leq TDI_k \leq M \end{array} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{i,j,k,t} = TDI_k$$

Cabe salientar que para os dois valores de ' $Z_{i,j,k,t}$ ' obtemos sempre o tempo total e atendimento da ocorrência ' j ' dentro dos limites estabelecidos segundo seja o problema.

$$0 \leq TDI_k \leq M$$

O valor de ' M ' é dado para o modelo e pode assumir valores maiores ou iguais ao valor de horas de trabalho diários, como também considerar um valor de um dia completo (24 h) com o intuito de não limitar estritamente os valores de ' TDI_k '.

Finalmente dando forma às expressões analisadas podemos ver que adotam a forma proposta no modelo linear inteiro misto como segue:

$$TDI_j = \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t=1}} mvo_{ij} * X_{i,j,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} \lambda_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{\substack{t \in \Omega_t \\ /t>1}} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{kj} * Z_{i,j,k,t}; \forall j \in \Omega_o \dots (20)$$

$$0 \leq -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \wedge -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \leq M * (1 - Z_{i,j,k,t}); \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \dots (21)$$

$$0 \leq \lambda_{i,j,k,t} \wedge \lambda_{i,j,k,t} \leq M * (Z_{i,j,k,t}); \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \dots (22)$$

A expressão (23) limita superiormente o tempo total de atendimento a uma ocorrência 'j' de tipo emergencial ($pd_j = 1$) através do parâmetro estabelecido ' TDI_max_j ' e a variável ' EXS_j ' (penalizada na função objetivo) é utilizada no caso que o valor de ' TDI_max_j ' fosse ultrapassado pelo valor da variável ' TDI_j '.

$$TDI_j \leq TDI_max_j + EXS_j; \forall j \in \Omega_o / pd_j = 1 \dots (23)$$

A expressão (24) limita superiormente o valor calculado do ' DEC ' mediante o parâmetro ' DEC_max ' e a variável ' $ALPHA_DEC$ ' (penalizada na função objetivo) é utilizada no caso que o valor de ' DEC ' ultrapasse o valor de ' DEC_max '.

$$DEC = \frac{1}{c_s} * \sum_{j \in \Omega_o} Ca_j * TDI_j \leq DEC_max + ALPHA_DEC \dots (24)$$

4 TESTES E RESULTADOS

4.1 Introdução

Nesta seção é apresentada uma análise do modelo de PLIM proposto aplicado ao problema do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços em redes de distribuição elétrica. O modelo proposto foi modelado utilizando a linguagem de modelagem algébrica AMPL e resolvido utilizando o solver comercial CPLEX. O software livre Octave foi utilizado para mostrar de forma gráfica os resultados. O modelo proposto foi testado utilizando dois casos: (1) Análise do despacho dinâmico para um número maior de atendimentos das ocorrências (comparado com o número de viaturas) considerando 50% de atendimentos do tipo emergencial; (2) Análise do despacho dinâmico para um número maior de viaturas (comparado com o número de atendimentos) considerando 50 % de atendimentos de tipo emergencial. A metodologia proposta foi testada na área de concessão da Rede de Energia Caiuá na cidade de Presidente Prudente. Na análise de cada caso têm-se como objetivos:

- Mostrar de maneira descritiva o funcionamento do modelo de PLIM para despachos dinâmicos com a porcentagem de atendimentos emergenciais constantes nos casos (1) e (2) e igual ao 50% do total de atendimentos.
- Fazer um seguimento às sequências de atendimentos atribuídas a cada viatura com o intuito de fundamentar a escolha do trajeto por parte de cada viatura para chegar ao local de atendimento.
- Avaliar o valor de DEC tomando em conta os valores de tempo de demora em ser atendida cada ocorrência por parte da respectiva viatura e do número de consumidores atingidos por cada tipo de ocorrências tanto emergencial como não emergencial.
- Fundamentar os valores de custos adicionais devido a tempos de excesso no horário de trabalho diário das viaturas, nos prazos de limite de reparo de cada ocorrência e no valor de DEC estabelecido.

Vale salientar que os valores de tipos de atendimentos estabelecidos e os significados dos mesmos para as ocorrências tanto emergenciais como não emergenciais são apresentados na tabela 21 e são utilizados na análise dos casos.

Tabela 21: Valores Numéricos e Significados dos Tipos de Atendimentos.

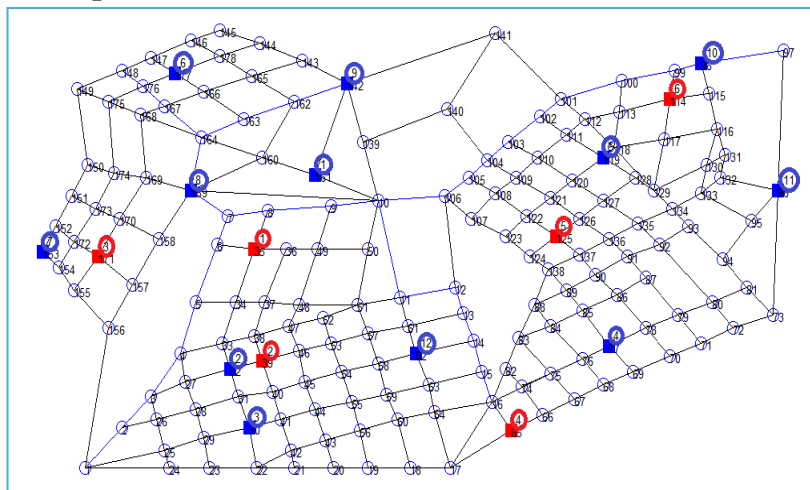
<i>pd</i>	<i>tpa</i>	<i>Significado</i>
<i>Não Emergencial</i>	1	<i>Confirmação de Leitura</i>
	2	<i>Substituição de Medidores</i>
	3	<i>Desligamento a pedido dos Clientes</i>
	4	<i>Religação de Consumidores</i>
	5	<i>Corte de Energia de Consumidores Inadimplentes</i>
	6	<i>Ligações de Unidades Consumidoras</i>
<i>Emergencial</i>	7	<i>Corte Indevido</i>
	8	<i>Roubo de Ramal de Ligação</i>
	9	<i>Fogo na Rede</i>
	10	<i>Cabos caídos ou Rompidos</i>

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.2 Caso 1:

Na figura 37 se mostra a localização (posições) das viaturas nas respectivas garagens (cor vermelho) e as posições das ocorrências (cor azul) de uma lista de atendimentos que devem ser realizados no dia de trabalho considerando o modelo simplificado da cidade e os dados das tabelas 22 e 23 para a fase 1 e 2, respectivamente.

Figura 37: Análise para 6 viaturas e 12 ocorrências – 50% atendimentos emergenciais.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 22: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

Ω_v	$pv[i]$	Ω_o	$po[j]$
1	35	1	161
2	39	2	32
3	171	3	30
4	65	4	77
5	125	5	119
6	114	6	177
-	-	7	153
-	-	8	159
-	-	9	142
-	-	10	98
-	-	11	96
-	-	12	62

Fonte: Informações da pesquisa.

Entre os dados a considerar para a fase 2 do modelo proposto vale salientar os valores de tempo de demora nos sinais de trânsito como: tempo de demora por presença de escolas ($3 \text{ min} = 0,05 \text{ hrs}$), tempo de demora por presença de faixas de pedestre ($2 \text{ min} = 0,0333 \text{ Hrs aprox.}$) e tempo de demora por presença de semáforos ($1 \text{ min} = 0,0166 \text{ hrs aprox.}$) expressos em horas. O valor da Duração Equivalente da Interrupção Máximo – DEC_max (0.1Hrs) expresso em horas, assim como o valor de multa - MULT_DEC (800 R\$/Horas) a ser penalizado na função objetivo do modelo de PLIM. Finalmente os valores de número total de consumidores existentes na área em estudo - Cs (15.000 *consumidores*) que para nosso caso é o modelo simplificado da cidade (figura 37) e o número de horas limite – M (24 Hrs).

Tabela 23: Dados a considerar para os atendimentos a ser feitos pelas Viaturas - Fase 2.

<i>ct</i>	<i>kp</i>	<i>hr</i>	Ω_v	Ω_o	Ω_t	<i>ta</i>	<i>ml</i>	<i>pd</i>	<i>tpa</i>	<i>TDI_max</i>	<i>MULT</i>	<i>Ca</i>
230	8	8	1	1	1°	2	150	0	4	0	0	44
200	5	8	2	2	2°	2	0	1	10	4	245	179
250	10	8	3	3	3°	2	130	0	2	0	0	42
190	3	8	4	4	4°	2	140	0	3	0	0	86
190	3	8	5	5	5°	2	0	1	8	5	225	57
200	5	8	6	6	6°	2	0	1	7	6	215	46
-	-	-	-	7	7°	2	0	1	10	4	245	112
-	-	-	-	8	8°	2	140	0	3	0	0	20
-	-	-	-	9	9°	2	0	1	8	5	225	49
-	-	-	-	10	10°	2	150	0	4	0	0	94
-	-	-	-	11	11°	2	130	0	2	0	0	43
-	-	-	-	12	12°	2	0	1	9	4	235	7

Fonte: Informações da pesquisa.

Com estas considerações temos os resultados fornecidos pelo Modelo de PLIM para a automação do despacho dinâmico para o atendimento das ordens de serviços em redes de distribuição como segue.

Tabela 24: Resultados Fornecidos pelo Modelo - MVO - fase 1.

<i>MVO</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.906267	0.773333	1.03667	1.74427	1.47693	1.162	1.434	0.470667	1.08067	1.69227	2.09693	1.11467
2	1.55627	0.116667	0.38	1.50667	2.12693	1.812	1.80867	1.12067	1.73067	2.34227	2.34	0.823333
3	1.56933	2.12533	2.36867	2.72093	2.4536	1.26933	0.416667	0.939333	1.54933	2.66893	3.0736	2.09133
4	1.3504	1.28667	1.04667	0.666667	1.64667	2.32533	2.59733	1.634	1.70707	1.862	1.5	0.833333
5	1.48133	1.87333	1.63333	0.646667	0.68	2.45627	2.72827	1.76493	1.838	1.02333	0.833333	1.42
6	1.438	2.09973	2.28667	1.3	0.44	2.41293	2.68493	1.7216	1.46667	0.557333	0.613333	1.6464

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 25: Resultados Fornecidos pelo Modelo - MOO - fase 1.

<i>MOO</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.32173	1.55173	1.498	1.23067	1.174	1.754	0.790667	0.927333	1.446	1.85067	0.8684
2	1.4396	0	0.808667	1.93533	2.01027	1.69533	1.692	1.004	1.614	2.2256	2.63027	1.252
3	1.68293	0.243333	0	1.61333	2.2536	1.86933	1.65733	1.178	1.788	2.46893	2.44667	0.93
4	1.79467	1.81333	1.57333	0	0.993333	2.7696	3.0416	2.07827	2.15133	1.32667	0.833333	1.36
5	1.338	1.99973	2.11667	1.13	0	2.31293	2.58493	1.6216	1.36667	0.576667	0.62	1.5464
6	1.37467	1.93067	2.174	2.52627	2.18933	0	1.48	0.744667	0.796	2.23733	2.70267	1.89667
7	1.57333	2.12933	2.37267	2.72493	2.4576	1.27333	0	0.943333	1.55333	2.67293	3.0776	2.09533
8	0.63	1.186	1.42933	1.7816	1.51427	0.691333	0.963333	0	0.61	1.7296	2.13427	1.152
9	0.5966	1.6784	1.9084	1.85467	1.39333	0.993333	1.57333	0.61	0	1.44133	1.90667	1.22507
10	1.446	2.10773	2.33773	1.55667	0.71333	2.42093	2.69293	1.7296	1.44133	0	0.57	1.6544
11	1.89467	2.55	2.31	1.32333	0.876667	2.8696	3.1416	2.17827	1.93333	0.57	0	2.09667
12	1.18373	0.926667	0.683333	0.92	1.48	2.15867	2.34067	1.46733	1.5404	1.69533	1.75333	0

Fonte: Informações da pesquisa.

**Tabela 26: Resultados Fornecidos pelo Modelo -
MOV - fase 1.**

<i>MOV</i>	1	2	3	4	5	6
1	1.09627	1.20507	1.35767	1.50173	1.05133	1.53133
2	0.533333	0.46	1.571	1.64867	1.83093	2.31093
3	0.776667	0.703333	1.57733	1.32667	2.07427	2.55427
4	2.13667	1.69667	2.64527	0.873333	0.74	1.28667
5	1.77427	1.88307	2.1886	1.41667	0.483333	0.536667
6	1.17733	1.834	1.08367	2.53	2.0796	2.32267
7	1.376	2.03267	0.737	2.72867	2.27827	2.75827
8	0.432667	1.08933	0.567	1.78533	1.33493	1.81493
9	1.04267	1.56173	1.177	1.8584	1.408	1.52667
10	1.88227	1.99107	2.2966	1.84333	1.07333	0.273333
11	2.33093	2.43333	2.74527	1.61	0.84	0.53
12	1.26667	0.826667	2.03433	0.633333	1.30067	1.78067

Fonte: Informações da pesquisa.

**Tabela 27: Resultados Fornecidos pelo
Modelo – “ $X_{i,j,t}$ ” - fase 2.**

$i \in \Omega_v$	$j \in \Omega_o$	$t \in \Omega_t$	$X_{i,j,t}$
1	5	3°	1
1	6	1°	1
1	9	2°	1
2	3	1°	1
2	8	2°	1
3	2	3°	1
3	7	1°	1
3	12	2°	1
4	4	1°	1
5	11	1°	1
6	1	2°	1
6	10	1°	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 28: Resultados Fornecidos pelo Modelo – “h”, “TDI” e “EXC”- fase 2.

<i>ct</i>	<i>kp</i>	<i>hr</i>	<i>h</i>	Ω_v	Ω_o	<i>ta</i>	<i>ml</i>	<i>pd</i>	<i>tpa</i>	<i>TDI</i>	<i>TDI_max</i>	<i>EXC</i>	<i>MULT</i>	<i>Ca</i>
230	8	8	3.1256	1	1	2	150	0	4	6.00333	0	0	0	44
200	5	8	0	2	2	2	0	1	10	9.43867	4	5.43867	245	179
250	10	8	3.00967	3	3	2	130	0	2	2.38	0	0	0	42
190	3	8	0	4	4	2	140	0	3	2.66667	0	0	0	86
190	3	8	0	5	5	2	0	1	8	9.35133	5	4.35133	225	57
200	5	8	0	6	6	2	0	1	7	3.162	6	0	215	46
-	-	-	-	-	7	2	0	1	10	2.41667	4	0	245	112
-	-	-	-	-	8	2	140	0	3	5.558	0	0	0	20
-	-	-	-	-	9	2	0	1	8	5.958	5	0.958	225	49
-	-	-	-	-	10	2	150	0	4	2.55733	0	0	0	94
-	-	-	-	-	11	2	130	0	2	2.83333	0	0	0	43
-	-	-	-	-	12	2	0	1	9	6.512	4	2.512	235	7

Fonte: Informações da pesquisa.

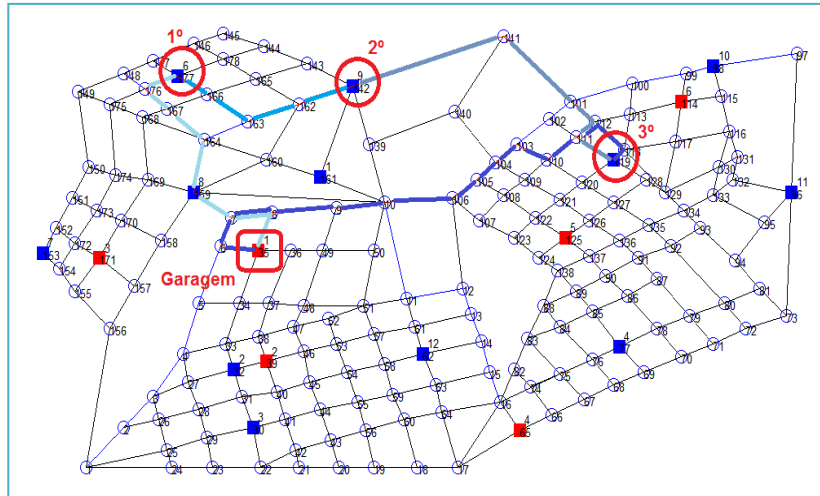
Nas tabelas 24, 25 e 26 têm-se os valores respectivos aos tempos de deslocamento: da garagem da viatura até o primeiro atendimento (MVO), da viatura saindo do local do primeiro atendimento e percorrendo as posições dos atendimentos atribuídos até o último atendimento (MOO) e da viatura desde a saída do local do último atendimento até a posição da garagem respectiva (MOV) todos os valores são expressos em horas.

Na tabela 27 é representada a sequência de atendimentos atribuídos a cada viatura numa determinada hora dentro do horário de trabalho, sendo a última coluna os valores da variável binária principal $X_{i,j,t}$ do modelo de PLIM que indica que a viatura ‘i’ atende à ocorrência ‘j’ na ordem ‘t’.

Assim também na tabela 28 têm-se os valores das variáveis contínuas fornecidas pelo modelo de PLIM (colunas cinza), a primeira variável ‘h’ representa o número de horas extras para as viaturas sobre o horário de trabalho diário no atendimento das ocorrências de prioridade emergencial, a segunda variável ‘TDI’ indica o tempo de demora da viatura atribuída a uma ocorrência para seu atendimento passando por atendimentos anteriores se houvesse e a terceira variável ‘EXC’ indica o excesso de horas feitas por uma viatura ao ultrapassar o valor de ‘TDI_max’ estabelecido para cada ocorrência de prioridade emergencial.

Já com os resultados fornecidos pelo modelo de PLIM podemos fazer uma análise detalhada sobre a sequência de atendimento atribuída a cada viatura como segue:

Figura 38: Percurso da Viatura '1' para a Sequência de Atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 38 os trajetos percorridos pela viatura '1' tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o ultimo atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 29: Viatura '1' Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	35	8	1
<i>Outros</i>	8	7	1
	7	159	1
	159	164	1
	164	167	1
167	176	1	
Destino	176	177	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 29 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '1' (vértice 35) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência '6' (vértice 177) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '1' ($kp_1 = 8$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '6' ($tpa_6 = 7$) que indica corte indevido do fornecimento da energia elétrica.

- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '6' ($tpa_6 = 7$) é de prioridade emergencial ($pd_6 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 29) obtém-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '6' ($TDI_6 = 3,162 Hrs$) o qual é menor que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_6} = 6 Hrs$) com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_6 = 0$).

**Tabela 30: Viatura '1' Primeiro Atendimento
– Segundo Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	177	166	1
<i>Outros</i>	166	163	1
	163	162	1
<i>Destino</i>	162	142	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 30 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '1' saindo do local da ocorrência '6' (vértice 177) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência '9' (vértice 142) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '1' ($kp_1 = 8$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '9' ($tpa_9 = 8$) que indica roubo de ramal de ligação na rede elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '9' ($tpa_9 = 8$) é de prioridade emergencial ($pd_9 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 30) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '9' ($TDI_9 = 5,958 Hrs$) o qual é maior que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_6} = 5 Hrs$) com o qual apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_9 = 0,958 Hrs$).

**Tabela 31: Viatura ‘1’ Segundo Atendimento
– Terceiro Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	142	141	1
<i>Outros</i>	141	101	1
	101	112	1
	112	111	1
<i>Destino</i>	111	119	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 31 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘1’ saindo do local da ocorrência ‘9’ (vértice 142) até chegar ao local do terceiro atendimento da ocorrência ‘5’ (vértice 119) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘1’ ($kp_1 = 8$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘5’ ($tpa_5 = 8$) que indica roubo de ramal de ligação na rede elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘5’ ($tpa_5 = 8$) é de prioridade emergencial ($pd_5 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 31) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘5’ ($TDI_5 = 9,35133 Hrs$) o qual é maior que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_5} = 5 Hrs$) com o qual apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_9 = 4,35133 Hrs$).

**Tabela 32: Viatura ‘1’ Terceiro Atendimento
– Garagem.**

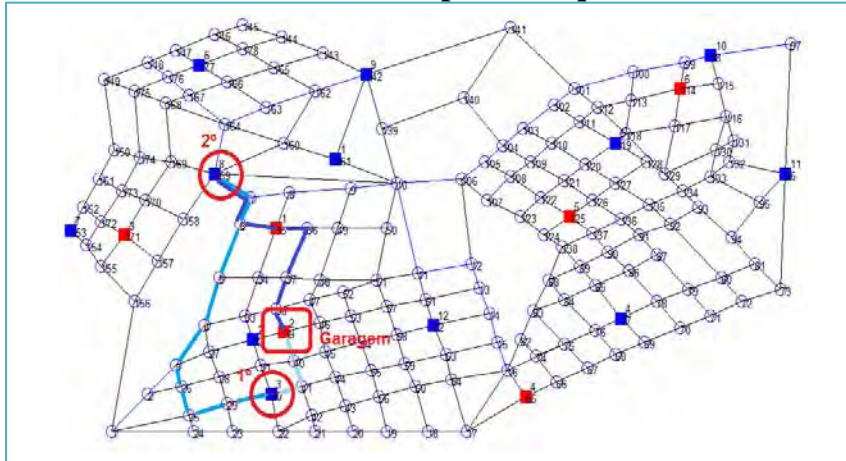
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	119	118	1
<i>Outros</i>	118	112	1
	112	111	1
	111	110	1
	110	103	1
	103	104	1
	104	105	1
	105	106	1
	106	10	1
	10	9	1
	9	8	1
	8	7	1
7	6	1	
<i>Destino</i>	6	35	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 32 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘1’ saindo do local da ocorrência ‘5’ (vértice 119) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘1’ (vértice 35) apresentando como característica principal:

- ✓ Dito tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[5,1] = 1,77427 Hrs$).
- ✓ De maneira prática pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘1’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_5 = 9,35133 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘1’ à garagem ($mov[5,1] = 1,77427 Hrs$) tendo assim um número total de ‘11,128757’ horas de trabalho da viatura ‘1’ sendo que o valor ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_1 = 8 Hrs$) gerando assim ‘3,128757’ horas extras a ser penalizadas.

Figura 39: Percurso da Viatura ‘2’ para a Sequência de Atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 39 os trajetos percorridos pela viatura ‘2’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas, segundo as cores utilizadas para identificar ditos trajetos na figura anterior.

Tabela 33: Viatura ‘2’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	39	40	1
<i>Outros</i>	40	41	1
<i>Destino</i>	41	30	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 33 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘2’ (vértice 39) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘3’ (vértice 30) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘2’ ($kp_2 = 5$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘3’ ($tpa_3 = 2$) que indica serviço de substituição de medidores de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘3’ ($tpa_3 = 2$) é de prioridade não emergencial ($pd_3 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 33) obtém-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘3’

($TDI_3 = 2,38 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido é zero ($TDI_{max_3} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_3 = 0$).

Tabela 34: Viatura ‘2’ Primeiro Atendimento – Segundo Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	30	29	1
<i>Outros</i>	29	25	1
	25	26	1
	26	3	1
	3	4	1
	4	5	1
	5	6	1
	6	7	1
<i>Destino</i>	7	159	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 34 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘2’ saindo do local da ocorrência ‘3’ (vértice 30) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência ‘8’ (vértice 159) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘2’ ($kp_2 = 5$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘8’ ($tpa_8 = 3$) que indica desligamento da rede a pedido dos clientes.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘8’ ($tpa_8 = 3$) é de prioridade não emergencial ($pd_8 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 34) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘8’ ($TDI_8 = 5,558 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido resulta zero ($TDI_{max_8} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_9 = 0 Hrs$).

Tabela 35: Viatura ‘2’ Segundo Atendimento – Garagem.

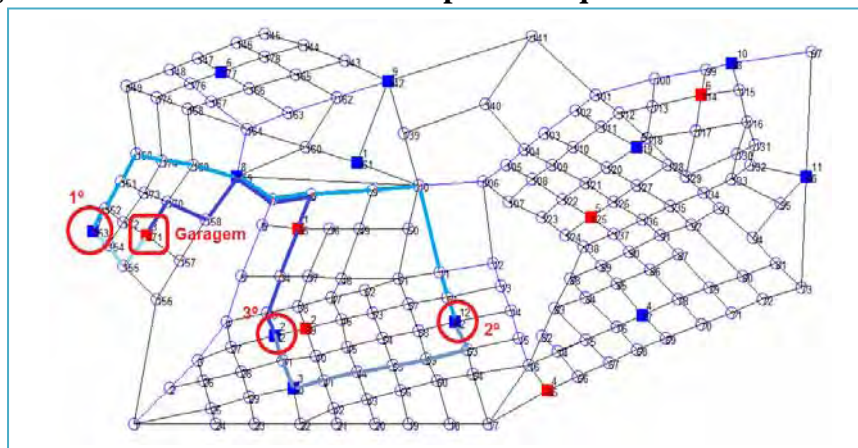
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	159	7	1
<i>Outros</i>	7	6	1
	6	35	1
	35	36	1
	36	37	1
	37	38	1
Destino	38	39	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 35 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘2’ saindo do local da ocorrência ‘8’ (vértice 159) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘2’ (vértice 39) apresentando como característica principal:

- ✓ Dito tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[8,2] = 1,08933 Hrs$).
- ✓ De maneira pratica pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘2’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a ultima ocorrência ($TDI_8 = 5,558 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘2’ à garagem ($mov[8,2] = 1,08933 Hrs$) tendo assim um número total de ‘6,64733’ horas de trabalho da viatura ‘2’ dito valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_2 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 40: Percurso da Viatura ‘3’ para a Sequência de atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 40 os trajetos percorridos pela viatura '3' tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 36: Viatura '3' Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	171	155	1
<i>Outros</i>	155	154	1
<i>Destino</i>	154	153	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 36 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '3' (vértice 171) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência '7' (vértice 153) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '3' ($kp_3 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '7' ($tpa_7 = 10$) que indica a presença de cabos caídos ou rompidos.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '7' ($tpa_7 = 10$) é de prioridade emergencial ($pd_7 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 36) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '7' ($TDI_7 = 2,41667 Hrs$) o qual é menor que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_7} = 4 Hrs$) com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_7 = 0$).

Tabela 37: Viatura ‘3’ Primeiro Atendimento – Segundo Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	153	152	1
<i>Outros</i>	152	151	1
	151	150	1
	150	174	1
	174	169	1
	169	159	1
	159	7	1
	7	8	1
	8	9	1
	9	10	1
	10	11	1
	11	61	1
Destino	61	62	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 37 apresenta-se a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘1’ saindo do local da ocorrência ‘7’ (vértice 153) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência ‘12’ (vértice 62) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘3’ ($kp_3 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘12’ ($tpa_{12} = 9$) que indica fogo na rede elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘12’ ($tpa_{12} = 9$) é de prioridade emergencial ($pd_{12} = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 37) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘12’ ($TDI_{12} = 6,512 Hrs$) o qual é maior que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_{12}} = 4 Hrs$) com o qual apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_{12} = 2,512 Hrs$).

**Tabela 38: Viatura ‘3’ Segundo Atendimento –
Terceiro Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	62	63	1
<i>Outros</i>	63	59	1
	59	55	1
	55	44	1
	44	41	1
	41	30	1
	30	31	1
<i>Destino</i>	31	32	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 38 apresenta-se a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘3’ saindo do local da ocorrência ‘12’ (vértice 62) até chegar ao local do terceiro atendimento da ocorrência ‘2’ (vértice 32) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘3’ ($kp_3 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘2’ ($tpa_2 = 10$) que indica fogo na rede elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘2’ ($tpa_2 = 10$) é de prioridade emergencial ($pd_2 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 38) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘2’ ($TDI_2 = 9,43867 Hrs$) o qual é maior que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_2} = 4 Hrs$) com o qual apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_9 = 5,43867 Hrs$).

Tabela 39: Viatura ‘3’ Terceiro Atendimento – Garagem.

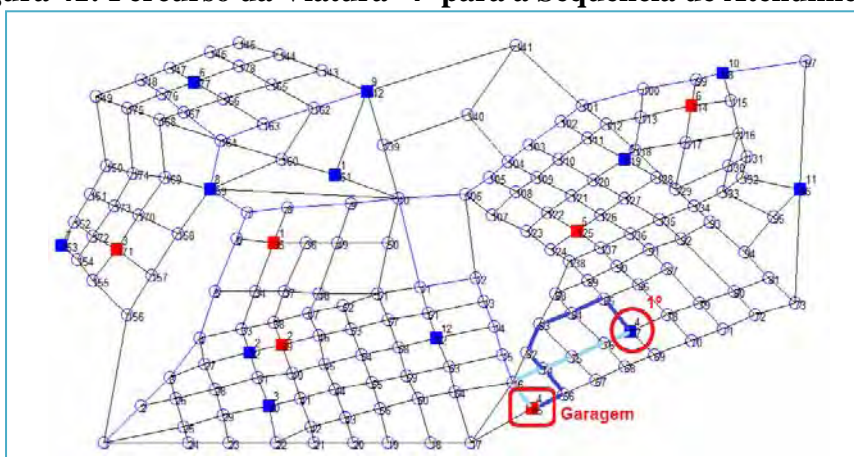
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	32	33	1
<i>Outros</i>	33	34	1
	34	35	1
	35	8	1
	8	7	1
	7	159	1
	159	158	1
Destino	170	171	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 39 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘3’ saindo do local da ocorrência ‘2’ (vértice 32) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘3’ (vértice 171) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[2,3] = 1,571 Hrs$).
- ✓ De maneira pratica pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘3’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_2 = 9,43867 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘3’ à garagem ($mov[2,3] = 1,571 Hrs$) tendo assim um numero total de ‘11,00967’ horas de trabalho da viatura ‘3’ sendo com que o valor ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_3 = 8 Hrs$) gerando assim ‘3,00967’ horas extras a ser penalizadas.

Figura 41: Percurso da Viatura ‘4’ para a Sequência de atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 41 os trajetos percorridos pela viatura ‘4’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 40: Viatura ‘4’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	65	16	1
<i>Outros</i>	16	74	1
	74	75	1
	75	76	1
<i>Destino</i>	76	77	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 40 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘4’ (vértice 65) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘4’ (vértice 77) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘4’ ($kp_4 = 3$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘4’ ($tpa_4 = 3$) que indica desligamento a pedido dos clientes da rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘4’ ($tpa_4 = 4$) é de prioridade não emergencial ($pd_4 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 40) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência ‘4’ ($TDI_4 = 2,66667 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido é zero ($TDI_{max_4} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_4 = 0$).

Tabela 41: Viatura ‘4’ Primeiro Atendimento – Garagem.

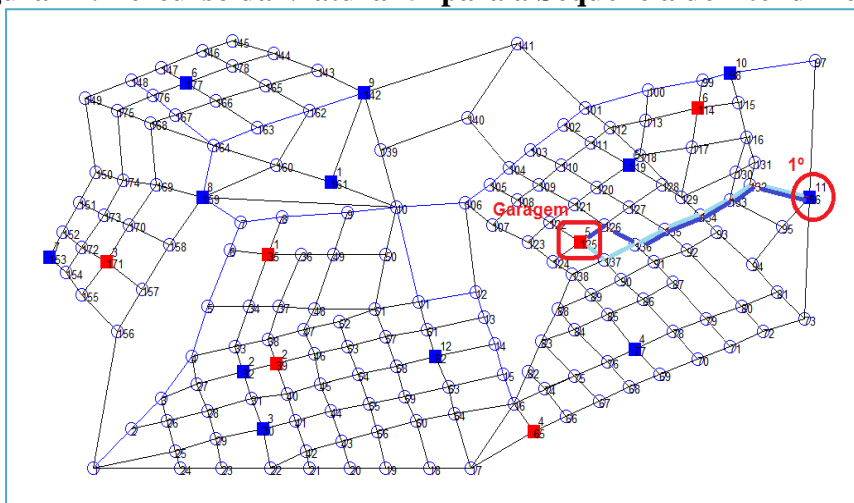
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	77	85	1
<i>Outros</i>	85	84	1
	84	83	1
	83	82	1
	82	74	1
	74	66	1
<i>Destino</i>	66	65	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 41 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘4’ saindo do local da ocorrência ‘4’ (vértice 77) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘4’ (vértice 65) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[4,4] = 0,873333 Hrs$).
- ✓ De maneira pratica pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘4’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_4 = 2,66667 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘4’ à garagem ($mov[4,4] = 0,873333 Hrs$) tendo assim um numero total de ‘3,540003’ horas de trabalho da viatura ‘4’ sendo que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_4 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 42: Percurso da Viatura ‘5’ para a Sequência de Atendimento.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 42 os trajetos percorridos pela viatura ‘5’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 42: Viatura ‘5’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		W_{ij}
Origem	125	137	1
<i>Outros</i>	137	136	1
	136	135	1
	135	134	1
	134	133	1
Destino	133	132	1
	132	96	1

Fonte: Informações da pesquisa.

A tabela 42 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘5’ (vértice 125) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘11’ (vértice 96) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘5’ ($kp_5 = 3$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘11’ ($tpa_{11} = 2$) que indica serviço de substituição de medidores de energia elétrica.

- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '11' ($tpa_{11} = 2$) é de prioridade não emergencial ($pd_{11} = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 42) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '11' ($TDI_{11} = 2,83333 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido é zero ($TDI_{max11} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_{11} = 0$).

Tabela 43: Viatura '5' Primeiro Atendimento – Garagem.

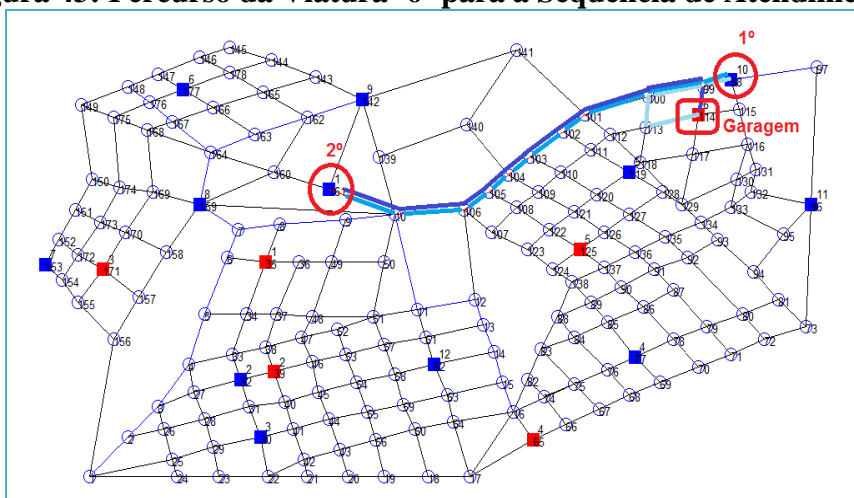
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{i,j}</i>
<i>Origem</i>	96	132	1
<i>Outros</i>	132	133	1
	133	134	1
	134	135	1
	135	136	1
	136	126	1
<i>Destino</i>	126	125	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 43 apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura '5' saindo do local da ocorrência '11' (vértice 96) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura '5' (vértice 125) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[11,5] = 0,84 Hrs$).
- ✓ De maneira pratica pode-se calcular as horas de trabalho da viatura '5' tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_{11} = 2,83333 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura '5' à garagem ($mov[11,5] = 0,84 Hrs$) tendo assim um número total de '3,67333' horas de trabalho da viatura '5' sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_5 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 43: Percurso da Viatura ‘6’ para a Sequência de Atendimento.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 43 os trajetos percorridos pela viatura ‘6’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos, como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 44: Viatura ‘6’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	114	113	1
<i>Outros</i>	113	100	1
	100	99	1
<i>Destino</i>	99	98	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 44 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘6’ (vértice 114) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘10’ (vértice 98) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘6’ ($kp_6 = 5$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘10’ ($tpa_{10} = 4$) que indica religação de consumidores na rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘10’ ($tpa_{10} = 4$) é de prioridade não emergencial ($pd_{10} = 0$).

- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 44) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '10' ($TDI_{10} = 2,55733 \text{ Hrs}$) neste caso o tempo de demora estabelecido é zero ($TDI_{max_{10}} = 0 \text{ Hrs}$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_{10} = 0$).

**Tabela 45: Viatura '6' Primeiro Atendimento
– Segundo Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	98	99	1
<i>Outros</i>	99	100	1
	100	101	1
	101	102	1
	102	103	1
	103	104	1
	104	105	1
	105	106	1
	106	10	1
<i>Destino</i>	10	161	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 45 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '6' saindo do local da ocorrência '10' (vértice 98) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência '1' (vértice 161) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '6' ($kp_6 = 5$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '1' ($tpa_1 = 4$) que indica religamento de consumidores da rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '1' ($tpa_1 = 4$) é de prioridade não emergencial ($pd_1 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 45) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '1' ($TDI_1 = 6,00333 \text{ Hrs}$) neste caso o tempo de demora estabelecido resulta zero ($TDI_{max_1} = 0 \text{ Hrs}$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_1 = 0 \text{ Hrs}$).

Tabela 46: Viatura ‘6’ Segundo Atendimento – Garagem.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{i,j}</i>
Origem	161	10	1
<i>Outros</i>	10	106	1
	106	105	1
	105	104	1
	104	103	1
	103	102	1
	102	101	1
	101	100	1
	100	99	1
Destino	99	114	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 46 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘6’ saindo do local da ocorrência ‘1’ (vértice 161) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘6’ (vértice 114) apresentando como característica principal:

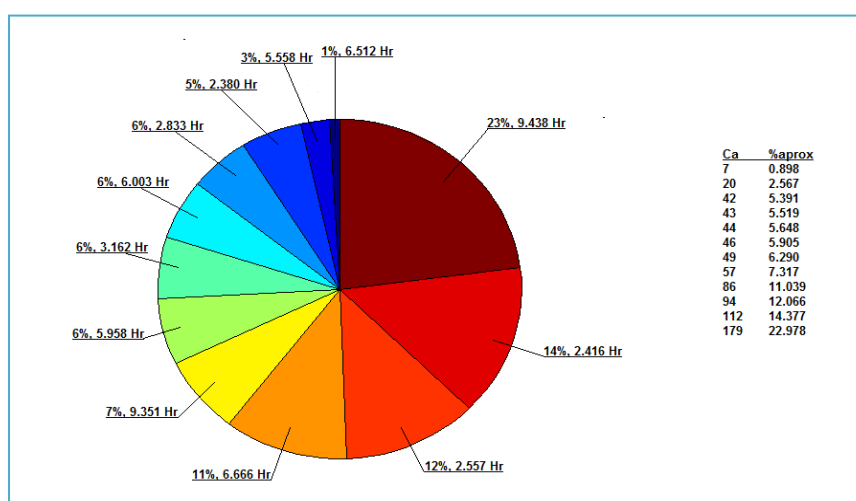
- ✓ Dito tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[1,6] = 1,53133 Hrs$).
- ✓ De maneira prática pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘6’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_1 = 6,00333 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘6’ à garagem ($mov[1,6] = 1,53133 Hrs$) tendo assim um número total de ‘7,53466’ horas de trabalho da viatura ‘6’ sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_6 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Finalmente já com os valores de tempo total de demora em atender cada ocorrência ‘ TDI_j ’ e os valores de número de consumidores atingidos por cada ocorrência (ver tabela 23) assim como o valor estabelecido do número de consumidores totais na área de estudo ($Cs = 15.000$) pode-se calcular o valor do *DEC* (Duração Equivalente da Interrupção) segundo o primeiro membro da expressão (24) do modelo proposto.

Obtendo assim um valor de $DEC = 0,270 hrs$, maior que o valor de $DEC_{max} = 0,1 hrs$ estabelecido nos dados, gerando assim um valor extra $ALPHA_{DEC} = 0,170 hrs$ a ser penalizado.

Segundo o valor de DEC obtido e para o número total de consumidores atingidos da Tabela 28 ($Ca = \sum_{j \in \Omega_o} Ca_j = 779$ consumidores) temos que estes consumidores em média ficaram 0,270 horas sem fornecimento de energia elétrica por um período de um dia, isto também representa o 1,125% do dia sem energia elétrica para ditos consumidores. Além disso, poder-se ver que todos os atendimentos foram feitos gerando as horas extras pelas viaturas e tempos de excesso nos atendimentos das ocorrências dando assim um valor na função objetivo ($fob = 4724,33$ R\$) que representa um gasto para a concessionária.

Figura 44: Consumidores Atingidos pelo Defeito vs Horas sem fornecimento de EE .



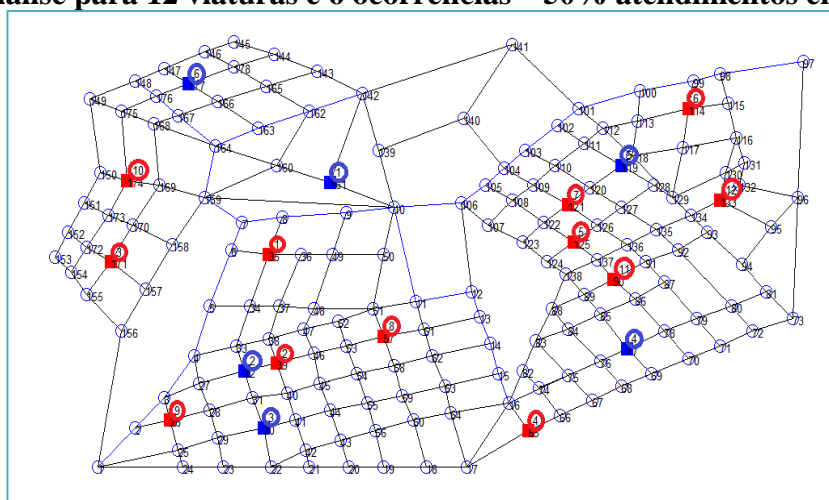
Fonte: Informação da pesquisa.

A figura 44 apresenta em detalhes os consumidores atingidos pelos defeitos (em porcentagem) com os respectivos valores de horas que ficaram sem fornecimento de energia elétrica durante o período de um dia.

4.3 Caso 2:

Na figura 46 é mostrada a localização (posições) das viaturas nas respectivas garagens (cor vermelho) e as posições das ocorrências (cor azul) de uma lista de atendimentos que devem ser realizadas no dia de trabalho considerando o modelo simplificado da cidade e os dados das tabelas 47 e 48 para a fase 1 e 2, respectivamente.

Figura 45: Análise para 12 viaturas e 6 ocorrências – 50% atendimentos emergenciais.



Fonte: Informação da pesquisa.

Tabela 47: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

Ω_v	$pv[i]$	Ω_o	$po[j]$
1	35	1	161
2	39	2	32
3	171	3	30
4	65	4	77
5	125	5	119
6	114	6	177
7	121	-	-
8	57	-	-
9	26	-	-
10	174	-	-
11	90	-	-
12	133	-	-

Fonte: Do próprio Autor.

Entre os dados a considerar para a fase 2 do modelo proposto vale salientar os valores de tempo de demora nos sinais de trânsito como: tempo de demora por presença de escolas (3 min = 0,05 hrs), tempo de demora por presença de faixas de pedestre (2min = 0,0333 hrs aprox.) e tempo de demora por presença de semáforos (1 min = 0,0166Hrs aprox.) expressos em horas. O valor da Duração Equivalente da Interrupção Máximo – DEC_max (0.1Hrs) expresso em horas, assim como o valor de multa - MULT_DEC (800 R\$/Horas) a ser penalizado na função objetivo do modelo de PLIM.

Finalmente os valores de número total de consumidores existentes na área em estudo - Cs (15.000 *consumidores*) que para nosso caso é o modelo simplificado da cidade (figura 37) e o número de horas limite – M (24 *Hrs*).

Tabela 48: Dados a considerar para os atendimentos a ser feitos pelas Viaturas - Fase 2.

<i>ct</i>	<i>kp</i>	<i>hr</i>	Ω_v	Ω_o	Ω_t	<i>ta</i>	<i>ml</i>	<i>pd</i>	<i>tpa</i>	<i>TDI_max</i>	<i>MULT</i>	<i>Ca</i>
230	8	8	1	1	1°	2	150	0	4	0	0	50
200	5	8	2	2	2°	2	0	1	10	4	245	79
250	10	8	3	3	3°	2	130	0	2	0	0	23
190	3	8	4	4	4°	2	140	0	3	0	0	27
190	3	8	5	5	5°	2	0	1	8	5	225	12
200	5	8	6	6	6°	2	0	1	7	6	215	97
250	10	8	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	8	8	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	10	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	3	8	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	8	8	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	10	8	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Informação da pesquisa.

Com estas considerações temos os resultados fornecidos pelo Modelo de PLIM para a automação do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços em redes de distribuição elétrica como segue:

Tabela 49: Resultados Fornecidos pelo Modelo - MVO - fase 1.

<i>MVO</i>	1	2	3	4	5	6
1	0.906267	0.773333	1.03667	1.74427	1.47693	1.162
2	1.55627	0.116667	0.38	1.50667	2.12693	1.812
3	1.56933	2.12533	2.36867	2.72093	2.4536	1.26933
4	1.3504	1.28667	1.04667	0.666667	1.64667	2.32533
5	1.48133	1.87333	1.63333	0.646667	0.68	2.45627
6	1.438	2.09973	2.28667	1.3	0.44	2.41293
7	1.04467	1.7064	1.9364	1.14333	0.243333	2.0196
8	0.895067	0.476667	0.74	1.42333	1.46573	1.87
9	1.50133	0.482	0.725333	1.852	2.1056	1.56267
10	1.00333	1.55933	1.80267	2.15493	1.8876	0.703333
11	1.45467	1.87333	1.63333	0.5733333	0.653333	2.4296
12	1.62133	2.27667	2.03667	1.05	0.603333	2.59627

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 50: Resultados Fornecidos pelo Modelo - MOO - fase 1.

<i>MOO</i>	1	2	3	4	5	6
1	0	1.32173	1.55173	1.498	1.23067	1.174
2	1.4396	0	0.808667	1.93533	2.01027	1.69533
3	1.68293	0.243333	0	1.61333	2.2536	1.86933
4	1.79467	1.81333	1.57333	0	0.993333	2.7696
5	1.338	1.99973	2.11667	1.13	0	2.31293
6	1.37467	1.93067	2.174	2.52627	2.18933	0

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 51: Resultados Fornecidos pelo Modelo - MOV - fase 1.

<i>MOV</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1.09627	1.20507	1.35767	1.50173	1.05133	1.53133	1.04133	0.845067	1.70227	1.50333	1.21133	1.59733
2	0.533333	0.46	1.571	1.64867	1.83093	2.31093	1.82093	1.23533	0.563333	1.71667	1.99093	2.37693
3	0.776667	0.703333	1.57733	1.32667	2.07427	2.55427	2.06427	0.913333	0.306667	1.89067	1.95333	2.47667
4	2.13667	1.69667	2.64527	0.873333	0.74	1.28667	0.75	1.33667	1.88	2.79093	0.34	0.863333
5	1.77427	1.88307	2.1886	1.41667	0.483333	0.536667	0.493333	1.52307	2.38027	2.33427	0.64333	0.366666
6	1.17733	1.834	1.08367	2.53	2.0796	2.32267	2.0696	1.87333	1.78333	1.22933	2.2396	2.47933

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 52: Resultados Fornecidos pelo Modelo – “ $X_{i,j,t}$ ” - fase 2.

$i \in \Omega_p$	$j \in \Omega_o$	$t \in \Omega_t$	$X_{i,j,t}$
7	1	1°	1
7	4	2°	1
9	2	1°	1
9	3	2°	1
11	6	1°	1
12	5	1°	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Tabela 53: Resultados Fornecidos pelo Modelo - fase 2.

<i>ct</i>	<i>kp</i>	<i>hr</i>	<i>h</i>	Ω_v	Ω_o	<i>ta</i>	<i>ml</i>	<i>pd</i>	<i>tpa</i>	<i>TDI</i>	<i>TDI_max</i>	<i>EXC</i>	<i>MULT</i>	<i>Ca</i>
230	8	8	0	1	1	2	150	0	4	3.04467	0	0	0	50
200	5	8	0	2	2	2	0	1	10	2.482	4	0	245	79
250	10	8	0	3	3	2	130	0	2	5.29067	0	0	0	23
190	3	8	0	4	4	2	140	0	3	6.54267	0	0	0	27
190	3	8	0	5	5	2	0	1	8	2.60333	5	0	225	12
200	5	8	0	6	6	2	0	1	7	4.4296	6	0	215	97
250	10	8	0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	8	8	0	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	10	8	0	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	3	8	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
230	8	8	0	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	10	8	0	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Informações da pesquisa.

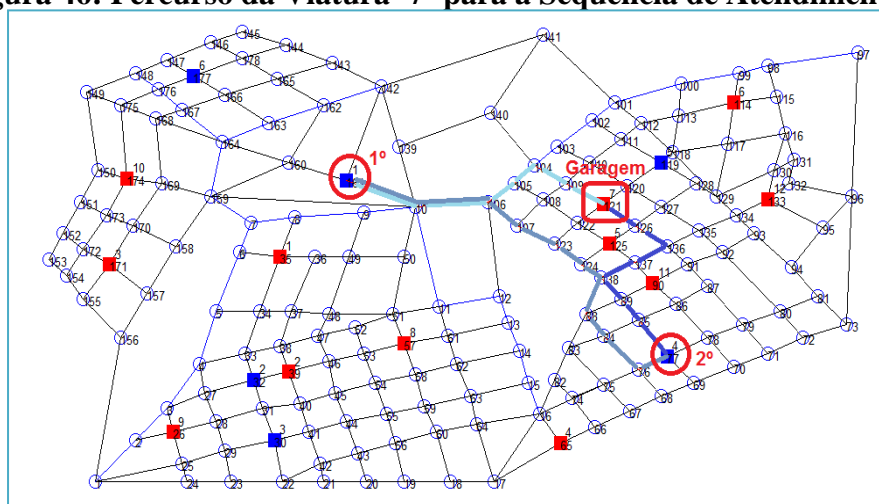
Nas tabelas 49, 50 e 51 têm-se os valores respectivos aos tempos de deslocamento: da garagem da viatura até o primeiro atendimento (MVO), da viatura saindo do local do primeiro atendimento e percorrendo as posições dos atendimentos atribuídos até o último atendimento (MOO) e da viatura desde a saída do local do último atendimento até a posição da garagem respectiva (MOV) todos os valores são expressos em horas.

Na tabela 52 é apresentada a sequência de atendimentos atribuídas a cada viatura numa determinada hora dentro do horário de trabalho, sendo a última coluna os valores da variável binária principal ' $X_{i,j,t}$ ' do modelo de PLIM que indica que a viatura '*i*' atende à ocorrência '*j*' na ordem '*t*'.

Assim também na tabela 53 têm-se os valores das variáveis contínuas fornecidas pelo modelo de PLIM (colunas cinza), a primeira variável '*h*' representa o número de horas extras para as viaturas sobre o horário de trabalho diário no atendimento das ocorrências de prioridade emergencial, a segunda variável '*TDI*' indica o tempo de demora da viatura atribuída a uma ocorrência para seu atendimento passando por atendimentos anteriores se houvessem e a terceira variável '*EXC*' indica o excesso de horas feitas por uma viatura ao ultrapassar o valor de '*TDI_max*' estabelecido para cada ocorrência de prioridade emergencial.

Já com os resultados fornecidos pelo modelo de PLIM podemos fazer uma análise detalhada sobre a sequência de atendimentos atribuída a cada viatura como segue:

Figura 46: Percurso da Viatura '7' para a Sequência de Atendimento.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 46 os trajetos percorridos pela viatura '7' tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 54: Viatura '7' Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	121	109	1
<i>Outros</i>	109	104	1
	104	105	1
	105	106	1
	106	10	1
Destino	10	161	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 54 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '7' (vértice 121) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência '1' (vértice 161) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '7' ($kp_7 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '1' ($tpa_1 = 4$) que indica religação de consumidores na rede de energia elétrica.

- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '1' ($tpa_1 = 4$) é de prioridade não emergencial ($pd_1 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 54) obtem-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '1' ($TDI_1 = 3,04467 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido é zero ($TDI_{max_1} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_1 = 0$).

**Tabela 55: Viatura '7' Primeiro Atendimento
– Segundo Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	161	10	1
<i>Outros</i>	10	106	1
	106	107	1
	107	123	1
	123	124	1
	124	138	1
	138	88	1
	88	84	1
	84	76	1
<i>Destino</i>	76	77	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 55 é apresenta a sequência de ligações a seguir pela viatura '7' saindo do local da ocorrência '1' (vértice 161) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência '4' (vértice 77) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '7' ($kp_7 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '4' ($tpa_4 = 3$) que indica desligamento a pedidos dos clientes da rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '4' ($tpa_4 = 3$) é de prioridade não emergencial ($pd_1 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 55) obtem-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '4' ($TDI_4 = 6,54267 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido resulta zero

($TDI_{max_4} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_4 = 0 Hrs$).

Tabela 56: Viatura ‘7’ Segundo Atendimento – Garagem.

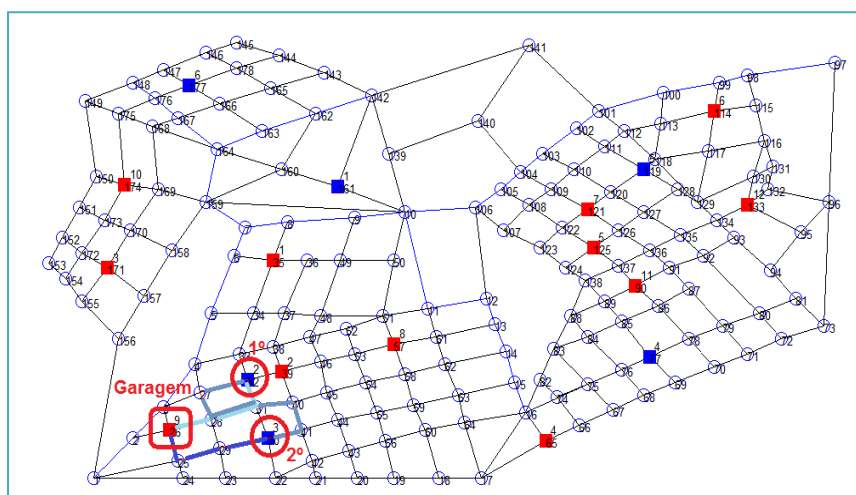
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	77	85	1
<i>Outros</i>	85	89	1
	89	138	1
	138	137	1
	137	136	1
	136	126	1
Destino	126	121	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 56 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘7’ saindo do local da ocorrência ‘4’ (vértice 77) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘7’ (vértice 121) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[4,7] = 0,7500 Hrs$).
- ✓ De maneira pratica pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘7’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a ultima ocorrência ($TDI_4 = 6,54267 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘7’ à garagem ($mov[4,7] = 0,7500 Hrs$) tendo assim um número total de ‘7,29267’ horas de trabalho da viatura ‘7’ sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_7 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 47: Percurso da Viatura ‘9’ para a Sequência de Atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 47 os trajetos percorridos pela viatura ‘9’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 57: Viatura ‘9’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
<i>Origem</i>	26	28	1
<i>Outros</i>	28	31	1
<i>Destino</i>	31	32	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 57 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘9’ (vértice 26) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘2’ (vértice 32) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘9’ ($kp_9 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘2’ ($tpa_2 = 10$) que indica a presença de cabos caídos ou rompidos.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘2’ ($tpa_2 = 10$) é de prioridade emergencial ($pd_2 = 1$).

- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 57) obtem-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '2' ($TDI_2 = 2,4820 Hrs$) o qual é menor que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_2} = 4 Hrs$) com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_2 = 0$).

**Tabela 58: Viatura '9' Primeiro Atendimento
– Segundo Atendimento.**

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	32	27	1
<i>Outros</i>	27	28	1
	28	31	1
	31	40	1
	40	41	1
Destino	41	30	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 58 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '9' saindo do local da ocorrência '2' (vértice 32) até chegar ao local do segundo atendimento da ocorrência '3' (vértice 30) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '9' ($kp_9 = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '3' ($tpa_3 = 2$) que indica substituição de medidores dos clientes.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '3' ($tpa_3 = 2$) é de prioridade não emergencial ($pd_3 = 0$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 58) obtem-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '3' ($TDI_3 = 5,29067 Hrs$) neste caso o tempo de demora estabelecido resulta zero ($TDI_{max_3} = 0 Hrs$) devido a ser não emergencial com o qual não apresenta horas de excesso a ser penalizadas ($EXC_3 = 0 Hrs$).

Tabela 59: Viatura ‘9’ Segundo Atendimento – Garagem.

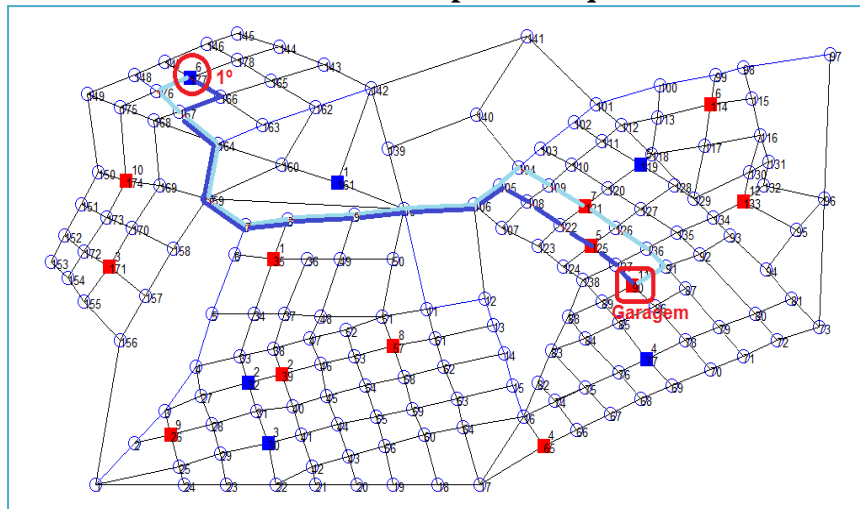
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		W_{ij}
<i>Origem</i>	30	29	1
<i>Outros</i>	29	25	1
<i>Destino</i>	25	26	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 59 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘9’ saindo do local da ocorrência ‘3’ (vértice 30) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘9’ (vértice 26) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[3,9] = 0,306667 Hrs$).
- ✓ De maneira prática pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘9’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a última ocorrência ($TDI_3 = 5,29067 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘9’ à garagem ($mov[3,9] = 0,306667 Hrs$) tendo assim um número total de ‘5,597337’ horas de trabalho da viatura ‘9’ sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_9 = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 48: Percurso da Viatura ‘11’ para a Sequência de atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 48 os trajetos percorridos pela viatura '11' tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 60: Viatura '11' Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	90	91	1
<i>Outros</i>	91	136	1
	136	126	1
	126	121	1
	121	109	1
	109	104	1
	104	105	1
	105	106	1
	106	10	1
	10	9	1
	9	8	1
	8	7	1
	7	159	1
	159	164	1
	164	167	1
	167	176	1
Destino	176	177	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 60 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '11' (vértice 90) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência '6' (vértice 177) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura '11' ($kp_{11} = 8$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência '6' ($tpa_6 = 7$) que indica corte indevido aos clientes na rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência '6' ($tpa_6 = 7$) é de prioridade emergencial ($pd_6 = 1$).
- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 60) obtém-se o tempo total de demora em atender à ocorrência

‘6’ ($TDI_6 = 4,4269 Hrs$) o qual é menor que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_6} = 6 Hrs$) com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_6 = 0$).

Tabela 61: Viatura ‘11’ Primeiro Atendimento – Garagem.

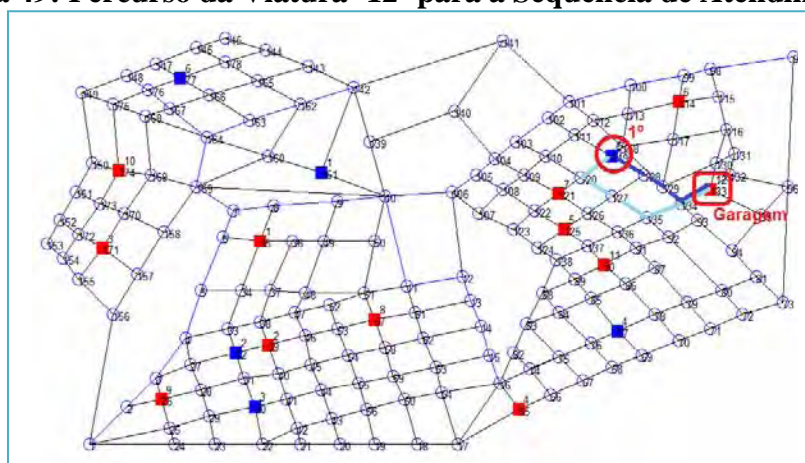
<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{i,j}</i>
Origem	177	166	1
<i>Outros</i>	166	167	1
	167	164	1
	164	159	1
	159	7	1
	7	8	1
	8	9	1
	9	10	1
	10	106	1
	106	105	1
	105	108	1
	108	122	1
	122	125	1
125	137	1	
Destino	137	90	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 61 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘11’ saindo do local da ocorrência ‘6’ (vértice 177) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura ‘11’ (vértice 90) apresentando como característica principal:

- ✓ O tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[6,11] = 2,2396 Hrs$).
- ✓ De maneira prática pode-se calcular as horas de trabalho da viatura ‘11’ tomando em conta o tempo total de demora em atender a ultima ocorrência ($TDI_6 = 4,4296 Hrs$) mais o tempo de demora no retorno da viatura ‘11’ à garagem ($mov[6,11] = 2,2396 Hrs$) tendo assim um numero total de ‘6,6692’ horas de trabalho da viatura ‘11’ sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_{11} = 8 Hrs$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Figura 49: Percurso da Viatura ‘12’ para a Sequência de Atendimentos.



Fonte: Informação da pesquisa.

Da figura 49 os trajetos percorridos pela viatura ‘12’ tanto desde a saída da garagem até o primeiro atendimento, entre atendimentos como também desde o último atendimento até a garagem são apresentados nas seguintes tabelas segundo as cores utilizadas para identificar os trajetos na figura anterior.

Tabela 62: Viatura ‘12’ Garagem – Primeiro Atendimento.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{ij}</i>
Origem	133	134	1
<i>Outros</i>	134	135	1
	135	127	1
Destino	127	120	1
	120	119	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 62 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura ‘12’ (vértice 133) até chegar ao local do primeiro atendimento a ocorrência ‘5’ (vértice 119) cuja escolha tem como características principais:

- ✓ A capacidade de atendimento da viatura ‘12’ ($kp_{12} = 10$) sobre o tipo de atendimento à ocorrência ‘5’ ($tpa_5 = 8$) que indica roubo de ramal da ligação dos clientes da rede de energia elétrica.
- ✓ O tipo de atendimento da ocorrência ‘5’ ($tpa_5 = 8$) é de prioridade emergencial ($pd_5 = 1$).

- ✓ Com as características anteriores de tipo de atendimento, prioridade e sequência de ligações (ver Tabela 62) obtêm-se o tempo total de demora em atender à ocorrência '5' ($TDI_5 = 2,60333 \text{ Hrs}$) o qual é menor que o tempo de demora estabelecido ($TDI_{max_5} = 5 \text{ Hrs}$) com o qual não apresenta horas de excesso ($EXC_5 = 0$).

Tabela 63: Viatura '12' Primeiro Atendimento – Garagem.

<i>Tipo de Vértice</i>	<i>Ligações</i>		<i>W_{i,j}</i>
<i>Origem</i>	119	128	1
<i>Outros</i>	128	129	1
	129	134	1
<i>Destino</i>	134	133	1

Fonte: Informações da pesquisa.

Na tabela 63 é apresentada a sequência de ligações a seguir pela viatura '12' saindo do local da ocorrência '5' (vértice 119) até chegar ao local da garagem posição inicial da viatura '12' (vértice 133) apresentando como característica principal:

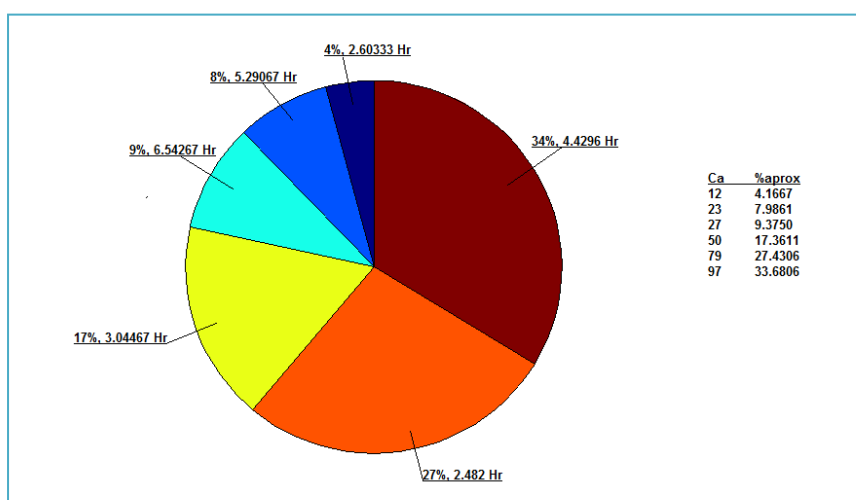
- ✓ Dito tempo de demora empregado foi calculado como elemento da matriz MOV ($mov[5,12] = 0,36666 \text{ Hrs}$).
- ✓ De maneira prática pode-se calcular as horas de trabalho da viatura '12' tomando em conta o tempo total de demora em atender a ultima ocorrência ($TDI_5 = 2,60333 \text{ Hrs}$) mais o tempo de demora no retorno da viatura '11' à garagem ($mov[5,12] = 0,36666 \text{ Hrs}$) tendo assim um número total de '2,96999' horas de trabalho da viatura '12' sendo com que o valor não ultrapassa o valor de horas de trabalho normais estabelecidas ($hr_{12} = 8 \text{ Hrs}$) não gerando assim horas extras a ser penalizadas.

Finalmente já com os valores de tempo total de demora em atender cada ocorrência ' TDI_j ' e os valores de número de consumidores atingidos por cada ocorrência (ver tabela 48) assim como o valor estabelecido do número de consumidores totais na área de estudo ($Cs = 15.000$) pode-se calcular o valor do *DEC* (Duração Equivalente da Interrupção) segundo o primeiro membro da expressão (24) do modelo proposto.

Obtendo assim um valor de $DEC = 0,074 \text{ hrs}$, menor ao valor de $DEC_{\text{max}} = 0,1 \text{ hrs}$ estabelecido nos dados, não gerando assim um valor extra a ser penalizado ($ALPHA_{DEC} = 0 \text{ hrs}$).

Segundo o valor de DEC obtido e para o número total de consumidores atingidos da Tabela 48 ($Ca = \sum_{j \in \Omega_o} Ca_j = 288$ consumidores) temos que estes consumidores em média ficaram 0,074 horas sem fornecimento de energia elétrica por um período de um dia, isto também representa 0,308% do dia sem energia elétrica para ditos consumidores. Além disso, pode-se ver que todos os atendimentos foram feitos sem a necessidade de gerar as horas extras pelas viaturas e tempos de excesso nos atendimentos das ocorrências dando assim um valor na função objetivo ($fob = 0,00 \text{ R\$}$) que representaria o valor do gasto para a concessionária neste caso em específico.

Figura 50: Consumidores Atingidos pelo Defeito vs Horas sem Fornecimento de EE .



Fonte: Informação da pesquisa.

A figura 50 mostra em detalhes o número de consumidores atingidos pelos defeitos (em porcentagem) com os respectivos valores de horas que ficaram sem fornecimento de energia elétrica durante o período de um dia.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho de dissertação de mestrado foi apresentado um modelo matemático de programação linear inteiro misto para resolver o problema de automação do despacho dinâmico das viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de DEE. O modelo proposto visa hierarquizar o conjunto de ordens de serviços e atribuí-las a todas as viaturas disponíveis, no período de trabalho diário considerando os seguintes aspectos: mapa georeferenciado da cidade, vias disponíveis da cidade, sentido do trânsito, saída de escolas, semáforos, faixas de pedestres, velocidade máxima no trânsito, número de viaturas e equipes disponíveis para cada tipo de serviço, tempo de reparo de cada ocorrência, grau de prioridades de cada ocorrência, origem do serviço (empresa ou consumidor), prazo de limite de reparo, valor de multa, gravidade da ocorrência e o tempo de deslocamento entre a localização da viatura e o local de atendimento.

O modelo proposto foi modelado utilizando a linguagem de modelagem algébrica AMPL (*A Modeling Language for Mathematical Programming*) e resolvido utilizando o solver comercial CPLEX. O *software* livre Octave foi utilizado para mostrar de forma gráfica os resultados. A metodologia proposta foi testada na área de concessão na Rede de Energia Caiuá na cidade de Presidente Prudente.

O modelo proposto é adaptável para outros casos mais específicos em matéria de tempos, capacidades ou inclusão de outros indicadores além do DEC (p.e. Frequência Equivalente de Interrupção por Consumidor - *FEC*, Duração Equivalente por Potência Instalada - *D*, Duração média por Consumidor - *d*, Confiabilidade por Consumidor - *C*, Energia não Distribuída - *END* entre outros) para gerenciar os despachos dinâmicos para os atendimentos às ocorrências.

O cálculo dos trajetos com menor tempo de demora nos deslocamentos das viaturas na fase '1' permitiu uma maior facilidade para o tempo de cálculo na fase '2' do modelo proposto podendo assim atribuir uma determinada sequência de atendimentos a cada uma das viaturas disponíveis segundo as características apresentadas pelas ocorrências e as viaturas.

Os resultados obtidos para o caso '1' (ver Tabelas 24, 25, 26 – fase '1' e Tabelas 27 e 28 – fase '2') mostram que ante um número maior de atendimentos (ocorrências) o modelo proposto em função dos parâmetros estabelecidos cumpre com a totalidade de atendimentos com um conseqüente excesso de tempos tanto para viaturas (tempo extra sobre o horário de trabalho) como para ocorrências (tempo de demora em ser atendidas) ocasionando gastos mínimos (obtidos pelo modelo proposto) para a concessionária de energia elétrica. Este caso é um reflexo do que aconteceria quando em cada instante do dia dentro das horas de trabalho se acrescentar o número de atendimentos a ser feitos dispondo só de um número limitado de unidades de atendimento (viaturas) com as equipes necessárias. Enquanto o caso '2' (ver Tabelas 49, 50, 51- fase '1' e Tabelas 52 e 53 – fase '2') mostra que para um número maior de unidades de atendimento (viaturas) as poucas ocorrências são atendidas pelas viaturas mais capacitadas (com a equipe necessária e com o trajeto com menor tempo de demora no percurso) abrangendo assim todos os atendimentos apresentados nesse instante do dia sem apresentar valores de excesso que possam ser penalizados com um conseqüente gasto para a concessionária.

Finalmente, os resultados mostram claramente o potencial da abordagem apresentada, onde as soluções ótimas são obtidas para nosso modelo proposto considerando um número significativo de unidades de atendimento tanto como atendimentos a serem feitos. Cabe salientar que devido à flexibilidade do modelo proposto, este pode ser utilizado para um número maior de situações (p.e. cidades de maior área geográfica, zonas dentro das cidades com grande número de sinais de trânsito, grandes números de atendimentos com graus de prioridade entre 80% e 100%, etc). Deduzindo-se que o objetivo geral de desenvolver uma opção que permita melhorar o planejamento e atribuição de unidades de atendimento das concessionárias é resolvido cabalmente.

5.1 Trabalhos futuros

A partir do presente trabalho tem-se um grande campo de pesquisa a ser explorado, como uma extensão do modelo proposto neste trabalho é possível fazer a implementação considerando os sistemas de informações geográficas das cidades com características mais reais assim como também considerar o mapa das redes elétricas (número de subestações, ramos de linhas elétricas, etc) do sistema de distribuição, ambos com bases de dados de conteúdo específico sobre o endereço geográfico (detalhes de avenidas na área, números de ruas, rotas alternativas, etc) tanto como o ponto (cabo ou fio, transformador ou subestação de distribuição) na rede de distribuição onde foi atingido o sistema de energia elétrica.

Outra possibilidade seria a utilização do modelo proposto implementando variáveis na função objetivo relacionadas ao custo de manutenção das unidades de atendimento para um determinado período (seja uma semana, um mês ou um ano).

Poderia propôr-se uma forma de análise rigorosa para uma área de concessão específica com o intuito de determinar dentro da área geográfica a posição mais provável a ser considerada como uma garagem, isto baseado no modelo proposto neste trabalho com conhecimento do histórico de defeitos ocorridos nesta área para estudo, otimizando assim os tempos de demora em atender-se às diversas ocorrências ou defeitos que possam ocorrer na rede elétrica na área de concessão.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, M. L. F. de. **Otimização de atendimentos de emergência em redes de distribuição de energia elétrica**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.
- BELFIORE, P. P.; FÁVERO, L. P. Problema de roteirização de veículos com entregas fracionadas. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DA PRODUÇÃO - SIMPEP, 13., 2006, Bauru. **Anais...** Bauru: Unesp, 2006. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais_simpep_aux.php?e=13>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- BOAVENTURA NETO, P. O.; JURKIEWICZ, S. **Grafos: introdução e prática**. São Paulo: Blucher 2009.
- CAIUÁ REDE ENERGIA. Presidente Prudente, 2012. Disponível em: <www.redenergia.com/caiua/>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- FOURER, R.; GAY, D.; KERNIGHAN, B. W. **AMPL: a mathematical programming language**. 2. ed. Pacific Grove: Thomson/Books/Cole, 2003.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- GOOGLE. **Google Maps**. Menlo Park, 2012. Disponível em: <<http://maps.google.com.br>>. Acesso em: 10 abr. 2012.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2. ed. rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.
- KAGAN, N.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. B. de; KAGAN, H. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Blucher, 2009.
- KORTE, B.; VYGEN, J. **Combinatorial optimization: theory and algorithms**. 5. ed. Berlin: Springer, 2012.
- LAMBERT, G.; SILVA, L. E. B. da; AOKI, A. R.; MORAES, C. H. V.; COSTA, B. R.; BARBOSA, J. A. Sistema inteligente de locomoção de viaturas para atendimentos na rede de distribuição. In: SEMINARIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI, 16., 2004, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: CEB, 2004.
- LIU, C. L.; RAVI, R.; SINGH, M. **Iterative methods in combinatorial optimization**. Cambridge : Cambridge University Press, 2011.
- MAURI, G. R. **Uma nova abordagem para o problema de roteirização e programação de veículos**. 2006. 39 f. Monografia (Qualificação do Curso de Doutorado em Computação Aplicada) - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, São José dos Campos, 2006.

PATIAS, N.; CARNIERI, R; COSTA, V. Designação de serviços em uma empresa de distribuição de energia elétrica. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, 2011. Disponível em: <<http://www.podesenvolvimento.org.br/inicio/index.php?journal=podesenvolvimento&page=article&op=view&path%5B%5D=118&path%5B%5D=117>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

POTTER, S. **An introductory tutorial for AMPL with examples from Winston:** operations reserch: applications an algorithms. 3. ed. Atlanta: School of Industrial and System Engineering of Georgia Intitute Technology, 2012.

PRATA, B.; GOMES, F. A.; BARROSO, G. C.; FURTADO, J. B. Análise de desempenho de sistemas de atendimento emergencial em redes de distribuição de energia elétrica: uma aplicação de Redes Petri Coloridas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABEPRO, 2008.

PRESIDENTE PRUDENTE. Prefeitura Municipal. **Mapas e informações geográficas:** mapa da cidade. Presidente Prudente, 2006. Disponível em: <http://www.presidenteprudente.sp.gov.br/site/central_mapas.xhtml>. Acesso em: 10 abr. 2012.

SANTOS, H. G. **Formulações e algoritmos para o problema de programação de horarios em escolas.** 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

STEINER, M. T.; COSTA, C. E. da S.; BERTHODI, D. M.; ANDRETTA, E. Técnicas da pesquisa operacional aplicadas à logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica. **Sistema e Gestão: Revista Eletrônica**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 3, p. 229-243, 2006. Disponível em: <<http://www.uff.br/sg/index.php/sg/article/view/SGV1N3A4/22>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

TELES, R. M.; IVAMOTO, M.; MELLO, L. H. S.; GRACIANO, V.; CARVALHO, C. Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para tratamento de ocorrências no setor elétrico. **Revista de Informática Teórica e Aplicada - RITA**, v. 17, n. 2, p. 139-153, 2010. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br/rita/article/view/rita_v17_n2_p139/11206>. Acesso em: 10 abr. 2012.

TELLES, C.; RODRIGUES, L. E.; COUTO, A.; SILVEIRA, M. **Sistema integrado de Gerenciamento da Manutenção de Redes de Distribuição (SGM).** Salvador, 2005. Projeto de pesquisa desenvolvido para implantação de Software na COELBA. Disponível em: <www.buscatexual.cnpq.br>. Acesso em: 10 abr. 2012.

THULASIRAMAN, K.; SWAMY, M. N. S. **Graphs:** theory and algorithms. New York: Wiley-Interscience, 1992.

APÊNDICE A: TÓPICOS EM TEORIA DOS GRAFOS

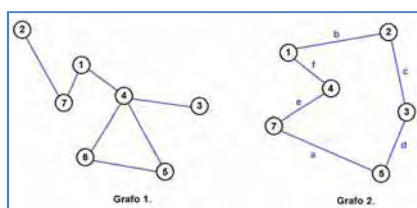
O conceito de Grafo é simples e até mesmo intuitivo. Podemos considerar que um Grafo nada mais é que uma representação gráfica de interdependência entre elementos que são representados por nós (vértices). Os elementos que atendem à relação imaginada são simbolicamente unidos através de um traço denominado aresta (ligação).

A1 Definições Básicas

Definição de Grafo.

Um Grafo é uma estrutura de abstração que representa um conjunto de elementos denominados nós (vértices) e suas relações de interdependência ou arestas (Ligações). Seja N conjunto de Vértices e M conjunto das arestas ou ligações dos vértices, então temos: $G = (N, M)$

Figura 51: Exemplo de grafos



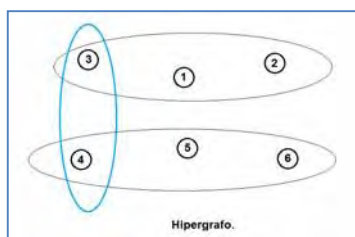
Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

O Conjunto $N = \{1, 2, \dots, n\}$ será composto dos 'n' nós do grafo, e $M = \{1, 2, \dots, m\}$ conterá as 'm' arestas. No grafo 2, da figura 1.1, $N = \{1, 2, 3, 4, 5, 7\}$ e $M = \{a, b, c, d, e, f\}$.

A2 Tipos de Grafos

A2.1 Hipergrafo

Um hipergrafo H é um par $H = (N, \xi)$ onde N representa o conjunto dos nós de H e ξ é uma família das partes de N .

Figura 52: Exemplo de Hipergrafo

Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

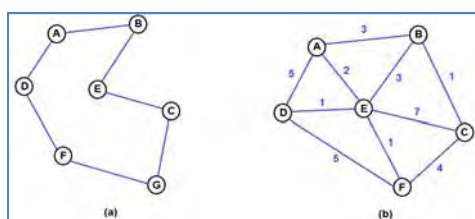
Na figura 1.2 temos $N=\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ e $\xi=\{(1, 2, 3); (3, 4); (4, 5, 6)\}$. Como podemos observar nas figuras dos exemplos, um grafo pode conter informações associadas aos seus vértices e arestas. Definimos essas informações como rótulos ou pesos.

A2.2 Ponderado

Um Grafo $G=(N,M)$ é ponderado se existem valores numéricos associados a suas ligações ou vértices.

A2.3 Rotulado

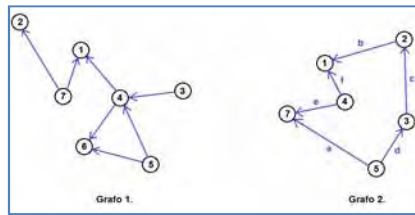
Um Grafo $G=(N,M)$ é rotulado se existem atribuições associadas a seus nós (sejam números tanto como letras).

Figura 53: Exemplo de Grafo Rotulado (a) e Grafo Ponderado(b)

Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A2.4 Direcionado

Um grafo $G=(N,M)$ é direcionado quando o sentido das ligações entre os vértices é importante, Nesse caso normalmente as arestas são chamadas por arcos.

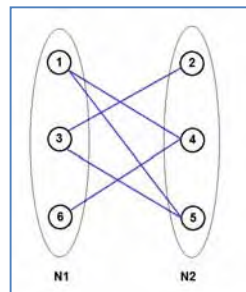
Figura 54: Exemplo de Grafo Direcionado

Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

Os Grafos aqui denominados por direcionados são igualmente chamados de orientados.

A2.5 Bipartido

Um Grafo $G=(N,M)$ é Bipartido quando seu conjunto de nós, N , pode ser dividido em dois conjuntos N_1 e N_2 tais que $N_1 \cap N_2 = \Phi$ e $N_1 \cup N_2 = N$ e somente existem arestas em G ligando algum nó de N_1 com algum nó de N_2 e vice-versa.

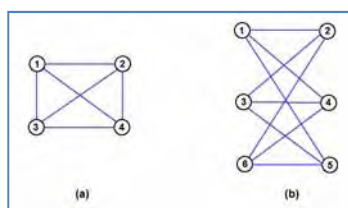
Figura 55: Exemplo de Grafo Bipartido

Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A2.6 Completo

Um Grafo $G=(N,M)$ é Completo se existe ao menos uma ligação associada a cada par de vértices. Os Grafos completos não orientados são também denominados cliques e denotados como K_n onde 'n' representa o número de nós do grafo completo.

Figura 56: Exemplo de Grafo Completo K_4 (a) e K_{33} (b)



Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A3 Representação do Modelo

Além da representação geométrica, um grafo pode ser representado minimamente em quatro outras formas diferentes:

- ✓ Matriz de Adjacência.
- ✓ Matriz de Incidência.
- ✓ Listas Encadeadas.
- ✓ Representação Vetorial.

A3.1 Representação Matriz de Adjacência

Trata-se de uma representação bastante simples. O grafo é expresso em uma matriz $A = [a_{ij}]$ através dos nós e de suas relações de vizinhança. As linhas e as colunas da matriz estão associadas aos nós do grafo. A matriz é, normalmente, booleana, ou seja, seus elementos são 0 e 1. Quando existem arestas paralelas, o valor de a_{ij} pode passar a representar o número de arcos paralelos.

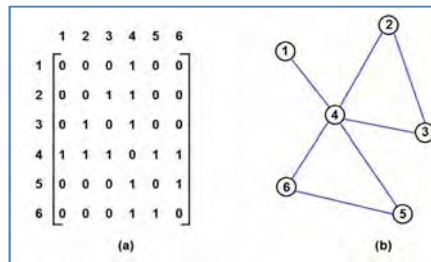
Definição de Matriz de Adjacência.

Uma matriz $n \times n$, $A = [a_{ij}]$ é denominada como de adjacência do grafo $G = (N, M)$ se:

$$a_{ij} = 1 \leftrightarrow \exists \text{ Ligação } (i, j)$$

$$a_{ij} = 0 \leftrightarrow \nexists \text{ Ligação } (i, j)$$

Figura 57: (a) Matriz de Adjacência do Grafo 'G', (b) Grafo 'G'.



Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A3.2 Representação Matriz de Incidência

Nesse caso as colunas da matriz correspondem às arestas do grafo e as linhas aos nós.

Definição de Matriz de Adjacência.

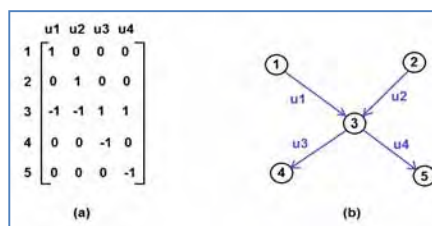
Uma matriz $n \times n$, $A = [a_{ij}]$ é denominada como de Incidência do grafo $G = (N, M)$ se, para todo arco j que liga o nó k ao nó l temos:

$$a_{ij} = +1 \leftrightarrow i = k$$

$$a_{ij} = -1 \leftrightarrow i = l \text{ (para grafo direcionado, senão } a_{ij} = 1)$$

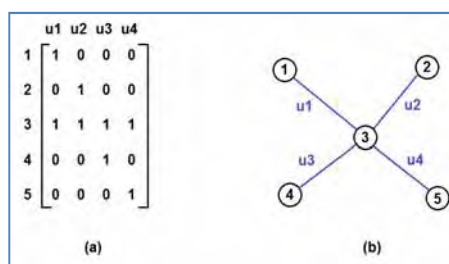
$$a_{ij} = 0 \text{ nos outros casos}$$

Figura 58: (a) Matriz de Incidência do Grafo 'G', (b) Grafo Direcionado 'G'.



Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

Figura 58: (a) Matriz de Incidência do Grafo 'G', (b) Grafo Não-Direcionado 'G'.

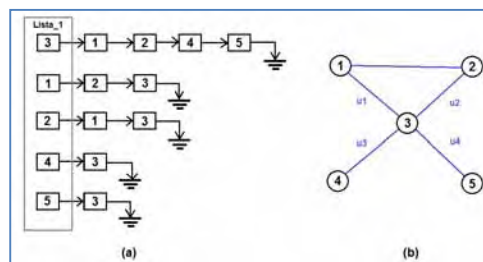


Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A3.3 Representação através de Listas Encadeadas

A representação utilizando listas encadeadas é extremamente conveniente para a eficiência computacional de alguns algoritmos, mais ainda para a economia da memória de armazenamento.

Figura 59: (a) Lista Encadeada do Grafo ‘G’, (b) Grafo Não-Direcionado ‘G’.

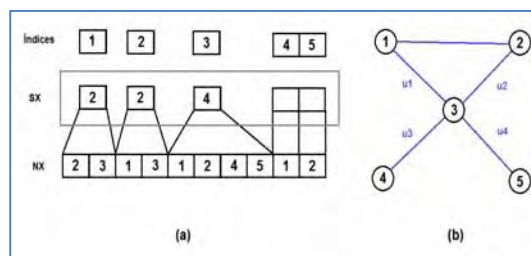


Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

A3.4 Representação Vetorial

Essa representação é útil para o caso de grafos esparsos, ou seja, com poucas arestas. São utilizados dois vetores para resumir as informações de vizinhança. O vetor SX registra o número de vizinhos do nó correspondente à posição x, enquanto o vetor NX os enumera.

Figura 60: (a) Representação Vetorial do Grafo ‘G’, (b) Grafo Não-Direcionado ‘G’.



Fonte: Adaptado de Godbarg e Luna (2000).

APÊNDICE B: PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA E LINEAR INTEIRA MISTA

A programação inteira surge com a necessidade da modelagem dos problemas através de variáveis inteiras (discretas) e, conseqüentemente, não contínuas. Os problemas de programação inteira podem ser classificados em problemas de programação inteira pura e programação inteira mista. A primeira classe consiste em problemas em que todas as variáveis do problema assumem valores inteiros. Nesta classe podem-se destacar os problemas de programação binária em que as variáveis correspondem a “não ou sim” ou (0,1). A programação inteira mista trata de problemas nos quais algumas variáveis são inteiras e as demais são contínuas reais.

A programação inteira é fundamentada na programação linear e requer em alguns casos da resolução de vários subproblemas de programação linear. Um problema de programação linear apresenta a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= cx \\ \text{s.a.} \\ x &\in S && \dots (2.1) \\ S &= \{x \mid Ax = b; x \geq 0\} \end{aligned}$$

(2.1) é um problema de ‘n’ variáveis e ‘m’ restrições. A é uma matriz de dimensão $m \times n$, x um vetor de dimensão ‘n’, b um vetor de dimensão ‘m’, c um vetor de dimensão ‘n’ e S é um conjunto convexo chamado Poliedral.

Se $S \subseteq Z^n \subseteq R^n$ em que Z^n é o conjunto dos números inteiros então temos um problema de programação linear inteira e pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) & \\ \text{s.a.} & \\ x &\in S \subseteq Z^n && \dots (2.2) \end{aligned}$$

Um problema de programação linear inteiro misto (PLIM) é aquele que além de ter valores contínuos reais tem valores inteiros.

Um PLI assume a forma seguinte:

$$\begin{aligned}
 &\text{Min } f(x) = cx \\
 &\text{s.a.} \\
 &\quad Ax = b \quad \dots (2.3) \\
 &\quad x \geq 0 \text{ e inteiro}
 \end{aligned}$$

Outra forma de expressar o modelo matemático é:

$$\begin{aligned}
 &\text{Min } f(x) = \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \\
 &\text{s.a.} \\
 &\quad \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j = b_i; \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \dots (2.4) \\
 &\quad x_j \geq 0 \text{ e inteiro}; \quad j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

Observações:

- Em (2.3) todos os valores de A, b e c devem ser inteiros. Se os dados são números racionais é muito fácil transformar o problema para um equivalente com dados inteiros, por tanto, (2.3) somente pode apresentar desvantagens quando alguns valores de A, b e c são irracionais.
- Se a função objetivo fosse de maximização, pode-se usar a seguinte equivalência:

$$\max f(x) = -[\min - f(x)] \quad \dots (2.5)$$

- Um PL obtido de (2.3) logo de relaxar a exigência de intragrabilidade é chamado de PL correspondente.

Também podemos chamar de PL obtido do PLI logo da relaxação:

Relaxação:

$$\begin{aligned}
 &\text{Seja: } P_1: \max f(x) \quad \dots (2.6) \\
 &\text{s.a: } x \in S_1
 \end{aligned}$$

$$\text{Seja: } P_2: \max f(x) \quad \dots (2.7)$$

$$\text{s.a: } x \in S_2$$

Se $S_2 \subseteq S_1$ então P_1 é uma relação de P_2 .

- Problema binário: Se em (2.3) as variáveis x_j estão estritas para assumir somente valores binários, $x_j \in \{0,1\}$ então temos o PLI binário.

$$\text{Min } f(x) = cx$$

s.a.

$$Ax = b \quad \dots (2.8)$$

$$x \in \{0,1\}$$

- Problema linear inteiro misto (PLIM): Quando uma parte das variáveis assumem valores inteiros temos o seguinte:

$$\text{Min } f(x, v) = c_1x + c_2v$$

s.a.

$$A_1x + A_2v = b \quad \dots (2.9)$$

$$v \geq 0, x \geq 0 \text{ e inteiro}$$

- Métodos para resolver um PLIM: Existem dois grandes métodos.
 - ✓ Enumeração (Branch-and-Bound).
 - ✓ Planos de Corte.

B1 Método de Enumeração (Branch-and-Bound)

A técnica de solução Branch & Bound se utiliza para resolver problemas de programação linear inteiro misto (PLIM). Os problemas que se encontram nesta categoria são representados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j \\ \text{s.a.} \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j &\leq b_i; \quad i = 1, 2, \dots, m \\ x_j &\geq 0 \text{ e inteiro; } j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad \dots (2.10)$$

A ideia básica desta metodologia de Branch & Bound é aplicar a estratégia de dividir e conquistar. Como o problema original é bastante difícil de resolver diretamente então o problema original se divide em subproblemas menores, sucessivamente, até que os problemas possam resolver-se completamente.

A primeira fase (branching) se realiza dividendo a região fatível de um problema em subregiões menores. A conquista (fathoming) se realiza encontrando um limite (bounding) da melhor solução que pode ter um subproblema (solução ótima parcial) que garanta que neste subproblema não se encontra a solução ótima global.

i. Branching (Divisão ou Separação):

Quando a solução de um problema ou um subproblema de PL não é inteira então se deve selecionar uma variável para realizar a separação.

Se x_j é a variável selecionada a dividir, então se utilizara x_j^* para representar o valor que assume esta variável na solução do subproblema de PL atual.

Usando a notação:

$$[x_j^*] = \text{Maior inteiro menor ou igual a } x_j^*$$

O subproblema atual se divide em outros dois subproblemas adicionando as restrições:

$$x_j \leq [x_j^*] \quad e \quad x_j \geq [x_j^*] + 1$$

Cada restrição gerada é uma restrição adicional ao subproblema.

ii. Bounding (Limitação):

Para cada subproblema necessitamos obter a informação de uma limitante inferior, tão boa como seja possível, da melhor solução inteira que existe no subproblema. A forma mais simples de obter uma limitante é resolver um problema relaxado, ou seja, o PL correspondente do subproblema. Assim, se a solução de um PL correspondente produz uma função objetivo ξ então se pode afirmar que a melhor solução inteira que existe nesse problema, que chamaremos $z(x)$, deve satisfazer:

$$z(x) \geq \xi \quad \text{problema de minimização}$$

iii. Fathoming (Sondagem):

Um subproblema pode ser conquistado (sondado), ou removido para futuras avaliações, no caso em que a solução do PL relaxado seja inteira ou no caso em que a limitante do subproblema seja maior que a incumbente ou no caso em que a solução do PL seja infatível.

Teste de sondagem: Um problema pode admitir sondagem se satisfaz um dos seguintes testes:

- Teste 1: Se a limitante δ satisfaz $\delta \geq z^*$ onde z^* é a chamada incumbente, a qual é a melhor inteira já encontrada (problema de minimização).
- Teste 2: Se o PL correspondente é INFACTÍVEL.
- Teste 3: Se a solução do PL correspondente é inteira. Neste caso se a solução inteira é a melhor que a incumbente, então se deve atualizar a incumbente e aplicar novamente o teste 1.

B2 Método Planos de Corte

Este método se aplica adicionando cortes conformados com as partes fracionárias observadas nos quadros de resultados de cada iteração, permitindo assim encontrar a solução inteira de problemas cujo modelo matemático seja do tipo PLIM, este método apresenta limitações na convergência na medida em que o número de variáveis aumenta.

Devemos começar resolvendo o problema de maneira tradicional, isto é, sem ter em conta que algumas ou todas as variáveis do problema devem ser inteiras. Quando a solução obtida x^* , é inteira, então temos a solução do problema original.

Em caso contrário se utiliza um plano de corte (hiperplano $\alpha^t x = \beta$), para dividir o espaço de soluções em dois subconjuntos. Um deles contém a solução não inteira x^* , e o outro um conjunto de soluções inteiras do problema. Assim começando de uma solução não inteira se vão construindo planos de corte, de tal forma que os cortes associados aos mesmos geram de forma iterada solução inteira procurada, se existesse.

Dado um número real, k , se define a parte inteira de k , $[k]$, ao inteiro mais próximo a k , que cumpra $[k] \leq k$. Além, $k = [k] + f$, onde f é a parte fracionária de k , $f \in [0,1)$.

Dado o seguinte problema:

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x) &= c^t x \\ \text{s.a.} \\ Ax &= b && \dots (2.11) \\ x &> 0, x \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

Resolvemos:

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x) &= c^t x \\ \text{s.a.} \\ Ax &= b && \dots (2.12) \\ x &> 0 \end{aligned}$$

Se a solução obtida x^* , é inteira, esta é a solução do PLIM. Se, pelo contrário, resulta não ser faríamos o seguinte:

Suponha-se que ao resolver o problema pelo método SIMPLEX, a base final, \mathbf{B} , esta composta pelos 'm' primeiros vetores:

$$B = \{P_1, P_2, \dots, P_m\} \quad \dots (2.13)$$

Descompõe-mos as componentes de x^* , x_i^* , e os coeficientes técnicos do problema na tabela final na sua parte inteira e a sua parte fracionária:

$$x_i^* = [x_i^*] + f_i$$

$$a_{ij} = [a_{ij}] + f_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = m + 1, \dots, n \quad \dots (2.12)$$

Onde f_i e f_{ij} são as partes fracionárias de x_i^* e a_{ij} , respectivamente, que cumprem $0 < f_i < 1$ e $0 < f_{ij} < 1$.

Uma vez obtidas todas as partes fracionárias da solução x^* , f_i , escolhemos a maior de todas:

$$f_i = \max f_k, \quad 1 \leq k \leq m.$$

Para essa componente do vetor x^* , aplicamos a seguinte equação:

$$x_i^* = x_i + \sum_{j=m+1}^n a_{ij} \cdot x_j \quad \dots (2.14)$$

Fazendo a decomposição dos dois lados de (2.14) em parte inteira e fracionária temos:

$$[x_i^*] + f_i = x_i + \sum_{j=m+1}^n [a_{ij}] \cdot x_j + \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \quad \dots (2.15)$$

Juntando a parte inteira a um lado da equação temos:

$$f_i - \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j = x_i - [x_i^*] + \sum_{j=m+1}^n [a_{ij}] \cdot x_j \quad \dots (2.16)$$

Sabendo que $0 < f_i < 1$ e $\sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \geq 0$, dado que $0 < f_{ij} < 1$:

$$f_i - \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \leq f_i \leq 1 \quad \dots (2.17)$$

E dado que o lado direito (2.15) é inteiro, temos que:

$$f_i - \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \leq f_i \leq 0 \Rightarrow f_i - \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \leq 0 \quad \dots (2.18)$$

Esta condição é a restrição de Gomory para x_i^* e será incluída como a restrição à última tabela do simplex para que a solução obtida seja inteira.

Dado então que a restrição a incluir na tabela seja:

$$- \sum_{j=m+1}^n f_{ij} \cdot x_j \leq -f_i \quad \dots (2.19)$$

E $-f_i < 0$, a solução passa a ser não admissível e temos que aplicar o método dual simplex.

Uma vez obtida nova solução, se esta tem todas as suas componentes inteiras.

Neste caso de que o algoritmo Dual simplex reflete o fato de não existir solução admissível, o problema não teria solução.

APÊNDICE C: TÓPICOS DE CONTINUIDADE DE FORNECIMENTO

A continuidade de fornecimento é avaliada pelas empresas de distribuição, a partir das ocorrências na rede de distribuição. Por exemplo, uma determinada falha num equipamento da rede pode causar a interrupção de vários consumidores. A contabilização da qualidade do serviço a estes consumidores é avaliada após um determinado período mensalmente, trimestralmente ou anualmente.

Em algumas outras situações, é importante realizar uma estimação da qualidade do serviço. Tal estimação é feita com base em alguns parâmetros estatísticos, como valores históricos de taxas de falha dos equipamentos, os tempos médios para o atendimento de uma determinada ocorrência na rede, entre outros.

A cada interrupção no fornecimento de energia por manutenção, seja ela corretiva ou preventiva, pode-se determinar o tempo em que a energia não foi distribuída, o número de consumidores atingidos pela interrupção e a demanda não atendida.

Assim, definem-se as seguintes variáveis:

C_{ai} : Número de consumidores atingidos na interrupção 'i';

C_s : Número total de consumidores existentes na área em estudo;

t_i : Duração da Interrupção de suprimento 'i', usualmente em minutos;

P_i : Demanda não Atendida na contingência 'i';

P_s : Demanda Total do sistema.

T : Período de estudo;

N : Número de Ocorrências no Período de Estudo.

Define-se, para um determinado período, por exemplo, o ano, os índices operativos a seguir:

- A Duração Equivalente por Consumidor (DEC), que é o espaço de tempo em que, em média, cada consumidor na área de estudo considerada ficou privado de fornecimento de energia elétrica no período considerado, formalmente:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ai} \cdot t_i}{C_s} \quad \dots (3.1)$$

- Duração equivalente por potência instalada, D_k , é o espaço de tempo que, em média, a potência instalada de cada uma das cargas do conjunto considerado ficou privada do fornecimento de energia elétrica no período considerado, formalmente:

$$D_k = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot t_i}{P_s} \quad \dots (3.2)$$

O indicador D_k , que tem dimensão de tempo, representa o tempo médio em que a potência instalada na área em estudo teve seu suprimento interrompido.

- A duração média por consumidor (d) representa o tempo médio de interrupção para os consumidores que sofreram interrupção, isto é:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ai} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N C_{ai}} \quad \dots (3.3)$$

- Duração média por potência instalada, d_k , que representa o tempo médio de interrupção para a potência instalada que sofreu interrupção, isto é:

$$d_k = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad \dots (3.4)$$

- A Frequência equivalente de interrupção por consumidor (FEC) é o número de interrupções que, em média, cada consumidor considerado sofreu a interrupção, no período considerado, o FEC é um parâmetro adimensional, isto é:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ai}}{C_s} \quad \dots (3.5)$$

- Frequência equivalente de interrupção por potência instalada (f_k) representa o número de interrupções sofridas pela potência média instalada na área, isto é:

$$f_k = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{P_s} \quad \dots (3.6)$$

- Confiabilidade por consumidor, C, que é dada pela relação dos consumidores x horas efetivamente atendidos no período e o total de consumidores x horas na hipótese de não haver contingências no período, isto é:

$$C = \frac{C_s \cdot T - \sum_{i=1}^N C_{ai} \cdot t_i}{C_s \cdot T} = 1 - \frac{DEC}{T} \quad \dots (3.7)$$

- Energia não distribuída (END) corresponde à energia não fornecida aos consumidores (ou a um consumidor individual) de um sistema, durante o período de observação T:

$$END = \sum_{i=1}^N P_{mi} \cdot t_i \quad \dots (3.7)$$

Onde P_{mi} corresponde à potência média que seria fornecida ao sistema durante a interrupção 'i'.

Observa-se que todos os indicadores da operação da rede, apresentados anteriormente, representam valores médios ou coletivos de uma área de estudo.

Exemplo (Introdução aos SDEE - Kagan; Oliveira; Robba, 2009, p. 289):

Seja uma área que conta com 100.000 consumidores e, durante um ano, 100 desses consumidores sofreram 100 horas de interrupção, ou seja, 6.000 minutos de interrupção no ano. Ora, nessas condições o DEC será dado por:

$$DEC = \frac{100 \times 6000}{100.000} = 6 \text{ minutos}$$

Isto é, o DEC global da área, de 6 minutos/ano, está aparentemente muito bom. Porém, os 100 consumidores que sofreram interrupções, ficaram durante 1,14% do ano sem fornecimento de energia. A duração média por consumidor exprime melhor o desempenho da rede no atendimento aos consumidores, isto é:

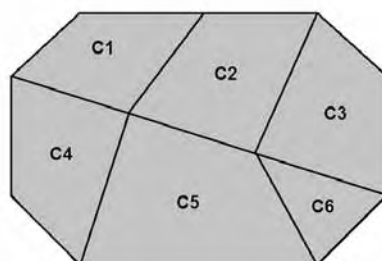
$$d = \frac{100 \cdot 6000}{100} = 6000 \text{ minutos}$$

Para um melhor controle da qualidade de serviço das empresas de distribuição, a ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, no uso de suas atribuições emitiu a Resolução nº 24, de 27 de janeiro de 2000, que teve por finalidade rever, atualizar e consolidar as disposições referentes à continuidade da distribuição de energia elétrica.

Um dos conceitos introduzidos nesta resolução diz respeito ao conjunto de unidades consumidoras, que representa "... qualquer agrupamento de unidades consumidoras, global ou parcial, de uma mesma área de concessão de distribuição, definido pela concessionária ou

permissionária e aprovado pela ANEEL”. A figura 3.1 ilustra o estabelecimento de um conjunto de unidades consumidoras na área de concessão de uma empresa de DEE.

Figura 61: Definição de Conjuntos de Unidades Consumidoras.



Fonte: Adaptado de Kagan e Oliveira (2009).

A ideia de definição de um conjunto parte da suposição que agrupamentos de consumidores, principalmente em áreas contíguas, devem ter seu nível de qualidade de serviço estabelecido em função de características físicas da rede (por exemplo, extensão da rede, área de cobertura etc.) e de características do mercado de energia (por exemplo, potência instalada, consumo médio etc.).

São definidos três indicadores importantes, relacionados à duração e frequência de interrupções em um dado consumidor, para ter um controle maior sobre cada um.

- Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC) é o intervalo de tempo que, no período de observação, em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição da energia elétrica:

$$DIC = \sum_{i=1}^N t_i \quad \dots (3.8)$$

- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC) – é o número de interrupções ocorridas, no período de observação em cada unidade consumidora:

$$FIC = N \quad \dots (3.9)$$

- A Duração Máxima de Interrupção Contínua (DMIC) por unidade consumidora é o tempo máximo de interrupção contínua, da distribuição de energia elétrica, para uma unidade consumidora qualquer:

$$DMIC = \max_{i=1, \dots, N}(t_i) \quad \dots (3.10)$$