

## **Automação do Despacho Dinâmico de Viaturas para o Atendimento das Ordens de Serviços nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica.**

**Fernando Vladimir Cerna Ñahuis.**

Aluno de Doutorado.

Faculdade de Engenharia UNESP- Ilha Solteira, Av. Brasil 56 Centro, 15385000-Ilha Solteira, SP - Brasil.

[fvcerna@aluno.feis.unesp.br](mailto:fvcerna@aluno.feis.unesp.br); [vlad\\_unesp\\_sp@hotmail.com](mailto:vlad_unesp_sp@hotmail.com)

**Dr. Marcos Julio Rider Flores.**

Professor Assistente Doutor.

Faculdade de Engenharia UNESP - Ilha Solteira, Av. Brasil 56 Centro, 15385000-Ilha Solteira, SP - Brasil.

[mjrider@dee.feis.unesp.br](mailto:mjrider@dee.feis.unesp.br); [mjrider@ieee.org](mailto:mjrider@ieee.org)

### **RESUMO**

Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma formulação linear inteira mista para resolver o problema de automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica, que visa hierarquizar o conjunto de ordens de serviços e atribuí-las às viaturas disponíveis, segundo os critérios considerados pela empresa de distribuição de energia elétrica no período de trabalho diário e horas extras 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) segundo as metas estipuladas pela ANEEL. A formulação proposta é modelada usando expressões lineares em duas fases: (1) Modelo de geração de matrizes de tempos de demora e (2) Modelo para o atendimento das ocorrências. Dois sistemas testes são utilizados para mostrar a precisão do modelo matemático.

**PALAVRAS CHAVE.** Ordens de serviços comerciais nas redes de distribuição de energia elétrica, programação linear inteira mista, automação do despacho dinâmico de viaturas.

**ÁREA PRINCIPAL:** Pesquisa operacional.

### **ABSTRACT**

This paper presents the development of a formulation mixed integer linear to solve the problem of automation dynamic dispatch of vehicles for meeting the service orders in distribution networks of electricity, aims to hierarchize the set of work orders and assign them to vehicles available, according to the criteria considered by the company distributing electricity in daily work period and overtime required thus covering the largest possible amount of attendances and the consequent reduction in the duration of interruptions and improves collective DEC indicator (Duration of Interruptions per Consumer Unit) according to the targets set by ANEEL. The proposed system is modeled using linear expressions in two phases: (1) model generation matrixes delay times and (2) model for the care of the occurrences. Two test systems are used to show the accuracy of the mathematical model.

**KEYWORDS.** Orders of commercial services in the networks of electricity distribution, mixed integer linear programming, automation of the dispatch of dynamic vehicles.

**MAIN AREA:** Operations research.

## **1. Introdução**

A manutenção é um processo vital para o bom desempenho do sistema elétrico de distribuição e 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 como a área de atendimento, comercial, construção, operação e engenharia [19]. 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 melhora do processo. O desempenho da empresa concessionária de distribuição, quanto à continuidade do serviço de energia elétrica é avaliado pela ANEEL com base em indicadores. Sendo que o DEC (Duração Equivalente da Interrupção por Unidade Consumidora) o número de horas em média que o consumidor fica sem energia durante um período, geralmente um mês ou um ano; e 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 de tempo, indicadores coletivos.

Um dos problemas das empresas em cumprir ou mesmo melhorar seus índices de DEC é o tempo de atendimento das ordens de serviços pelas suas viaturas ao longo da jornada de trabalho diário [11], sendo assim devem levar em conta fatores como:

- Nem sempre a viatura mais próxima, mesmo possuindo todos os equipamentos necessários para o atendimento é a melhor; devido ao tempo já trabalhando (horas extras) ou outro atendimento de maior prioridade;
- Assim também; nem sempre a viatura mais próxima no trajeto retilíneo chegara à área de atendimento mais rapidamente; devido à presença dos sinais de trânsito;
- Problemas como o engarrafamento ou simples aglomeração em horários de picos podem alterar a escolha da melhor viatura;
- Características como o grau de prioridade de cada atendimento no horário de trabalho será um fator determinante para atribuir atendimentos às viaturas disponíveis;
- O limite de tempo de reparo estabelecido para cada atendimento prioritário terá influência na escolha da melhor viatura, devido a que se dispõe de um tempo marcado para resolver o problema;
- Valores de multa por não realizar os atendimentos ou por ultrapassar os valores limites de reparo fazem que mude a atribuição dos atendimentos às viaturas disponíveis.

A metodologia de solução apresentada para resolver o problema de automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica mediante um modelo matemático de programação linear inteiro misto considera aspectos como: mapa geo referenciado da cidade, vias disponíveis, sentido do trânsito, número de viaturas com as equipes disponíveis para cada tipo de serviço, tempos de atendimento, graus de prioridade, limite de tempo de reparo, valores de multa e o tempo de deslocamento entre a localização da viatura e o local de atendimento. Sendo que a cada nova ordem de serviço é realizando um reordenamento e assim uma nova atribuição às viaturas disponíveis.

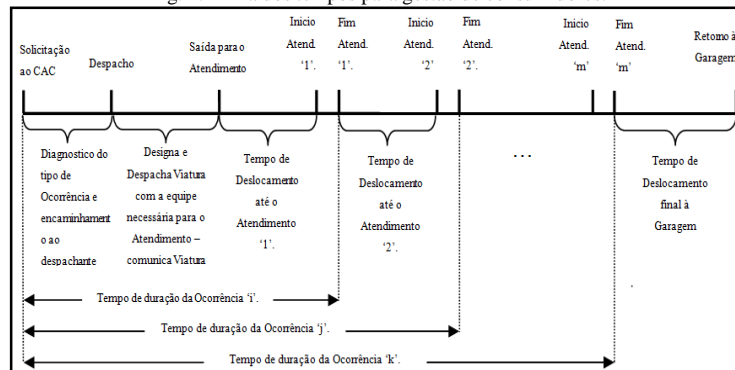
## **2. O Problema de Automação do Despacho Dinâmico das Viaturas para o Atendimento das Ordens de Serviços nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica.**

### **2.1 Gestão de Atendimento ao Cliente:**

Dentre as principais atividades da empresa concessionária de energia 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 pronta para atender as solicitações. Os serviços comerciais envolvem: ligações de unidades consumidoras, religação de consumidores, confirmação de leitura, corte de energia a consumidores inadimplentes, dentre outros que são solicitados dentro do horário comercial (08:00hrs às 20:00hrs). Já os serviços emergenciais envolvem: serviços como cabos caídos ou rompidos, corte indevido, fogo na rede, falta de fase, roubo de ramal de ligação, dentre outros cujo atendimento é feito nas 24 horas do dia.

Fig. 1. Linha dos tempos para gestão de consumidores.



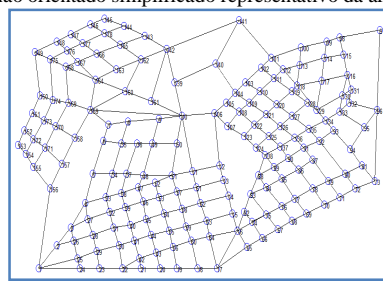
Fonte: Próprio autor.

O atendimento ao usuário de energia elétrica é feito mediante a linha dos tempos (Ver Fig. 1). Começa quando um cliente (usuário residencial, comercial e industrial) percebe a interrupção do serviço de energia elétrica e telefona para o CAC, recebendo este último a reclamação do usuário; 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; 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, atribuindo e despachando cada viatura disponível com a respectiva sequência de atendimentos no dia, para um final retorno à garagem no horário de trabalho estabelecido.

## 2.2 Modelagem da Área de Concessão:

O estudo de toda área de concessão apresenta um grau de complexidade na representação, portanto baseando-nos na teoria dos grafos podemos realizar uma simplificação e um modelo mais adaptado aos fins aplicativos da metodologia apresentada obtendo assim um grafo não orientado simplificado representativo de 178 vértices (Ver Fig. 2).

Fig. 2. Grafo não orientado simplificado representativo da área de concessão.



Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 2, a cada interseção das vias disponíveis é um vértice e cada via (rua, avenida, passeio), ainda sem considerar o sentido do trânsito, é uma aresta do grafo.

### 2.3 Modelagem dos Elementos da Área de Concessão:

Uma vez modelada a área de concessão como um grafo, começam a ser modelados os demais elementos, como: Sentido do trânsito (mão única e mão dupla), valores de distâncias das vias (ruas, avenidas e passeios), valor de velocidade media permitido no trânsito, presença dos sinais de trânsito que podem atrasar o deslocamento das viaturas (consideram-se os semáforos, saídas de escolas e faixas de pedestre). Um número representativo de vértices de referência ('1' ao '10') é modelado como se mostram nas tabelas 1, 2, 3 e 4 a seguir.

#### 2.3.1 Sentido do trânsito (mão única e mão dupla) – Lista de adjacência.

Considera-se o modelo simplificado representativo como um grafo orientado onde o sentido do trânsito esta dado pela orientação da ligação de um vértice (vértice de referência) a seus vértices adjacentes (Ver Fig. 3) segundo a Tabela 1.

Tabela 1: Lista de adjacência do vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.

Vértice Referência	Vértices Adjacentes
1	2,24,25,156
2	1,3,26
3	2,4
4	3,5,27,33
5	4,6,34
6	5,7,35
7	6,8,159
8	7,9
9	8,10
10	9,11,106,139,161,159

Fonte: Próprio autor.

Tabela 2: Lista de distância do vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.

Vértice Referência	Vértices Adjacentes	Distância (Km)
1	2, 24, 25, 156	4.2, 7.2, 7.0, 18.4
2	1, 3, 26	4.2, 3.7, 3.5
3	2, 4	3.7, 3.7
4	3, 5, 27, 33	3.7, 6.4, 2.2, 3.8
5	4, 6, 34	6.4, 6.4, 3.44
6	5, 7, 35	6.4, 3.9, 3.44
7	6, 8, 159	3.9, 3.20, 4.5
8	7, 9	3.20, 6.48
9	8, 10	6.38, 6.60
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	6.60, 9.42, 7.4, 8.80, 8.40, 19.30

Fonte : Próprio autor.

#### 2.3.2 Valor de distância das vias (ruas, avenidas e passeios) – Lista de distâncias.

Os valores de distâncias entre vértice e vértice do modelo simplificado representativo são expressos como lista segundo a Tabela 2, tendo como ponto de partida um vértice de referência até seus vértices adjacentes (Ver Fig. 4).

Fig. 3. Sentido do trânsito: desde o vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.

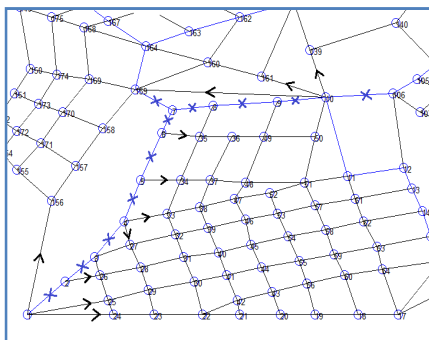
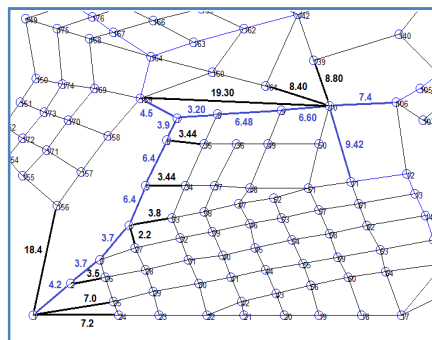


Fig. 4. Valores de distância das ligações: desde o vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.



Fonte: Próprio autor.

Fonte: Próprio autor.

### 2.3.3 Valor de velocidade média permitido no trânsito (mão única e mão dupla) – Lista de adjacência.

Dependendo do tipo de via a considerar como vias principais (avenidas) e alternas (ruas e passeios) têm-se os valores de 50 e 30 Km/h respectivamente para cada ligação (Ver Fig. 5) segundo a Tabela 3.

Tabela 3: Lista de velocidades do vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.

Vértice Referência	Vértices Adjacentes	Velocidade (Km/h)
1	2, 24, 25, 156	50, 30, 30, 30
2	1, 3, 26	50, 50, 30
3	2, 4	50, 50
4	3, 5, 27, 33	50, 50, 30, 30
5	4, 6, 34	50, 50, 30
6	5, 7, 35	50, 50, 30
7	6, 8, 159	50, 50, 50
8	7, 9	50, 50
9	8, 10	50, 50
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	50, 50, 50, 30, 30, 30

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4: Lista dos sinais de trânsito do vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.

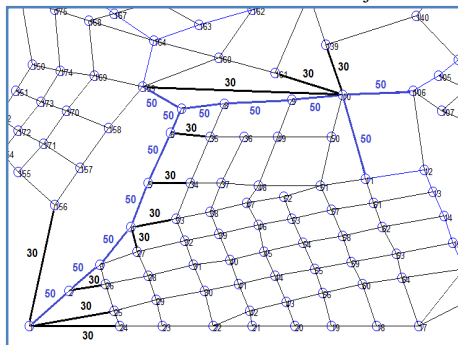
Vértice Referência	Vértices Adjacentes	[ne, nf, ns]
1	2, 24, 25, 156	011, 011, 011, 011
2	1, 3, 26	011, 011, 011
3	2, 4	011, 011
4	3, 5, 27, 33	011, 011, 011, 011
5	4, 6, 34	011, 011, 011
6	5, 7, 35	011, 011, 011
7	6, 8, 159	011, 011, 011
8	7, 9	011, 011
9	8, 10	011, 011
10	9, 11, 106, 139, 161, 159	011, 011, 011, 011, 011, 000

Fonte: Próprio autor.

### 2.3.4 Presença dos sinais de trânsito (consideram-se os semáforos, saída de escolas e faixas de pedestre) – Lista dos sinais.

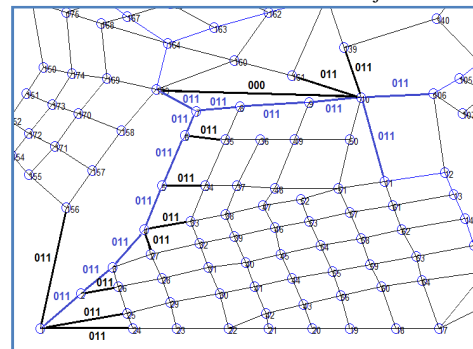
Caracteriza-se a presença dos sinais de trânsito mediante um vetor de três componentes (Ver Fig. 7) primeiro o número de escolas, segundo o número de faixas de pedestres e terceiro número de semáforos presentes num mesmo trecho. Cada vetor representa um elemento da lista dos sinais de trânsito (Ver Fig. 6) segundo a tabela 4.

Fig. 5. Valores de velocidades nas ligações: desde o vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.



Fonte: Próprio autor.

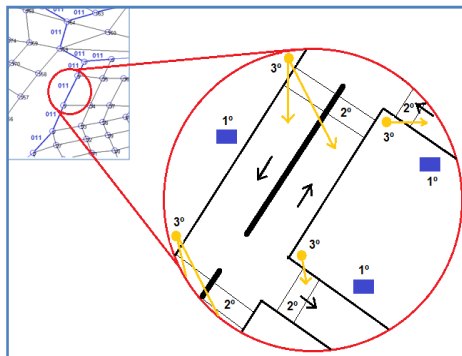
Fig. 6. Vetor dos sinais de trânsito nas ligações: desde o vértice de referência '1' ao '10' a cada vértice adjacente.



Fonte: Próprio autor.

Fig. 7. Vetor característico para cada ligação do modelo simplificado representativo da área de concessão.

Tabela 5: Valores característicos dos tipos de atendimentos 'tpa' e graus de prioridades.



Fonte: Próprio autor.

	<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: Próprio autor.

Vale mencionar que para cada presença de sinal de trânsito esta sendo especificado no modelo proposto o tempo que demoraria uma viatura no percorrido de cada trecho dentro de um trajeto.

## 2.4 Formulação Matemática do Modelo Proposto:

O problema de automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica pode ser modelado como um problema de programação linear inteiro misto em duas fases levando em conta um conjunto de supostos e considerações.

### 2.4.1 Suposições e Considerações.

Estão baseados principalmente no modelo simplificado da área de concessão, sobre a qual se assume:

- Inicialmente um conjunto de viaturas localizadas em vértices específicos (garagens).
- Um conjunto de ocorrências localizadas em vértices específicos. Cada vértice significará a nova posição da viatura no deslocamento, segundo a sequência de atendimentos a ser feita.
- Toda viatura após de realizar o último atendimento volta à posição inicial (garagem).
- Consideram-se dois valores de velocidade media permitida, segundo o tipo de via (Ver Fig. 5).
- É considerado um número maior de semáforos e faixas de pedestre nas avenidas, como em ruas e passeios próximos a elas.
- Da linha dos tempos para a gestão de consumidores (Ver Fig. 1) considera-se como ponto de partida o “despacho”. Vale salientar que devido ao tempo tão curto que leva passar da “solicitação ao CAC” ao “despacho” e também do “despacho” até “saída para o atendimento”, ditos tempos se consideram zero com fins práticos de aplicação.
- O tempo de atendimento ( $ta_j$ ) a cada ocorrência é considerado desde a chegada da viatura ao local da ocorrência.
- Os parâmetros que indicam penalidades ou multas, e tempos de demora são expressos em reais e horas respectivamente.
- A cada tipo de ocorrência se lhe atribuí um valor numérico que caracteriza o tipo falha que atingiu à rede elétrica.
- Considera-se que o valor de multa por ultrapassar o tempo máximo de demora em atender a ocorrência emergencial é maior ou igual ao dobro do valor estabelecido sobre a multa por não atender a ocorrência em caso fosse considerada não emergencial, exigindo assim um esforço pela melhora na qualidade de serviço por parte da concessionária.

- Consideram-se dois valores numéricos para caracterizar a prioridade dos atendimentos às ocorrências. Para atendimentos emergenciais "1" e não emergenciais ou comerciais "0".

### 2.4.2 Fase 1: Modelo de Geração de matrizes de tempos de demora.

Apresenta-se o modelo matemático 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:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,l) \in \Omega_a} W_{kl} = 1; \quad tipo_i + ntipo_i = 1, \forall i \in \Omega_n \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,l) \in \Omega_a} W_{kl} = 0; \quad tipo_i + ntipo_i = 0, \forall i \in \Omega_n \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_a} W_{ij} - \sum_{(k,l) \in \Omega_a} W_{kl} = -1; \quad tipo_i + ntipo_i = -1, \forall i \in \Omega_n \quad (4)$$

A função objetivo (1) permite obter o caminho com o menor tempo de percorrido desde o vértice origem até o destino dentro do modelo simplificado. Nas restrições (2, 3 e 4) caracterizam os tipos de vértices como: vértice da origem (2), vértice de destino (3) e outros tipos de vértices (4) segundo as condições respectivas. A formulação do modelo fase '1' é executada no processo iterativo para o calculo dos elementos de cada matriz *mvo*, *moo*, *mov*.

### 2.4.3 Fase 2: Modelo para o Atendimento das ocorrências.

O modelo matemático nesta fase relaciona-se com a linha dos tempos da gestão do consumidor (Ver Fig. 1) tendo o seguinte:

Minimizar:

$$fob: \sum_{j \in \Omega_o} ml_j * \left( 1 - \sum_{i \in \Omega_o} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \right) + \sum_{i \in \Omega_v} ct_i * h_i + \sum_{j \in \Omega_o} MULT_j * EXS_j + MULT\_DEC * ALPHA\_DEC \quad (5)$$

Sujeito a:

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

$$\sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 0; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o / tpa_j > kp_i \quad (7)$$

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

$$\sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (9)$$

$$\sum_{i \in \Omega_o} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in \Omega_o} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} = 1; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 1 \quad (11)$$

$$\sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} \leq \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t-1}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (12)$$

$$\beta_{i,t} = \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t \quad (13)$$

$$\delta_{i,t} = \beta_{i,t} - \beta_{i,t+1}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \quad (14)$$

$$\sum_{i \in \Omega_v} \sum_{j \in \Omega_o} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{j \in \Omega_o} mvo_{i,j} * X_{i,j,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{j \in \Omega_o} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{j \in \Omega_o} mov_{j,i} * \alpha_{i,j,t} \quad \forall i \in \Omega_v \quad (15)$$

$$\leq hr_i + h_i;$$

$$0 \leq Z_{i,j,k,t} \wedge Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (16)$$

$$0 \leq Z_{i,j,k,t} \wedge Z_{i,j,k,t} \leq X_{i,j,t-1}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (17)$$

$$(X_{i,j,t} + X_{i,j,t-1}) - 1 \leq Z_{i,j,k,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (18)$$

$$Z_{i,j,k,t} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t > 1 \quad (19)$$

$$0 \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq X_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \quad (20)$$

$$0 \leq \alpha_{i,j,t} \wedge \alpha_{i,j,t} \leq \delta_{i,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \quad (21)$$

$$(\delta_{i,t} + X_{i,j,t}) - 1 \leq \alpha_{i,j,t}; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \quad (22)$$

$$\alpha_{i,j,t} \leq 1; \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t / t < |\Omega_t| \quad (23)$$

$$TDI_j = \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} X_{i,j,t} * ta_j + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} mvo_{i,j} * X_{i,j,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{k \in \Omega_o} \lambda_{i,j,k,t} + \sum_{i \in \Omega_v} \sum_{t \in \Omega_t} \sum_{k \in \Omega_o} moo_{k,j} * Z_{i,j,k,t}; \quad \forall j \in \Omega_o \quad (24)$$

$$0 \leq -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \wedge -\lambda_{i,j,k,t} + TDI_k \leq M * (1 - Z_{i,j,k,t}); \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \quad (25)$$

$$0 \leq \lambda_{i,j,k,t} \wedge \lambda_{i,j,k,t} \leq M * (Z_{i,j,k,t}); \quad \forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t \quad (26)$$

$$TDI_j \leq TDI_{max_j} + EXS_j; \quad \forall j \in \Omega_o / pd_j = 1 \quad (27)$$

$$\frac{1}{CS} * \sum_{j \in \Omega_o} Ca_j * TDI_j \leq DEC_{max} + ALPHA_{DEC}; \quad (28)$$

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

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

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

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



$$\forall \alpha_{i,j,t}, \text{ binario};$$

$$\forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall \lambda_{i,j,k,t}, \text{ binario};$$

$$\forall i \in \Omega_v, \forall j \in \Omega_o, \forall k \in \Omega_o, \forall t \in \Omega_t$$

$$\forall h_i \geq 0;$$

$$\forall i \in \Omega_v$$

$$\forall TDI_j \geq 0;$$

$$\forall j \in \Omega_o$$

$$\forall EXS_j \geq 0;$$

$$\forall j \in \Omega_o$$

$$\forall ALPHA\_DEC \geq 0;$$

A função objetivo (5) nesta fase '2' esta formada por quatro termos que na totalidade representam os cobros a ser feitos à concessionária por não cumprir com: o atendimento às ocorrências com determinada prioridade, excesso de horas de trabalho pelas viaturas, ultrapasso de limites de tempo de reparo e valores de excesso do DEC para um período considerado segundo a ANEEL. A restrição (6) garante que a viatura 'i' com capacidade de atendimento ' $kp_i$ ' pode atender uma ocorrência 'j' com valor de tipo de atendimento ' $tpa_j$ ' menor ao valor ' $kp_i$ ' numa determinada ordem 't'. Já a restrição (7) garante que para um tipo de atendimento ' $tpa_j$ ' maior ao ' $kp_i$ ' o atendimento não seja feito. A restrição (8) garante que a ocorrência 'j' pode ser atendida numa determinada ordem 't' por somente uma viatura 'i', além a restrição (9) garante que a viatura 'i' pode atender numa determinada ordem 't' a somente uma ocorrência 'j'. As restrições (10) e (11) são complementarias entre si condicionam o atendimento segundo o valor de prioridade de cada ocorrência 'j', sendo assim a restrição (10) garante o atendimento (nesse mesmo dia dentro do horário de trabalho) ou não atendimento (deixar para o dia seguinte) da ocorrência 'j' de prioridade não emergencial por só uma viatura 'i' numa determinada ordem 't'. Já a restrição (11) garante o atendimento obrigatório (dentro do horário de trabalho) nesse dia da ocorrência 'j' de prioridade emergencial por só uma viatura 'i' numa determinada ordem 't'. Na restrição (12) garante a ordem cronológica dos atendimentos, isto é, que um atendimento na ordem 't' com  $t > 1$ , deve ser realizado logo de um atendimento na ordem 't - 1'.

Já as restrições (13), (14), (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23) são utilizadas para representar a restrição (15) que garante para cada viatura 'i' a soma dos tempos de atendimento a cada ocorrência 'j' e o tempo de deslocamento entre as posições de cada ocorrência 'j' da sequência atribuída no horário de trabalho à viatura 'i' seja menor ou igual ao horário de trabalho estabelecido ' $hr_i$ ' mais o tempo de excesso 'h' por atendimentos de prioridade emergencial. As restrições (25) e (26) são utilizadas para representar a restrição (24) na qual calcula o tempo total para o atendimento de cada ocorrência 'j' que inclui os tempos de deslocamento ' $mvo_{i,j}$ ' e ' $moo_{k,j}$ ' e também os tempos de atendimentos próprios a cada ocorrência 'j' como ' $ta_j$ '.

A restrição (27) limita superiormente o tempo total de atendimento a uma ocorrência 'j' de tipo emergencial a traves do parâmetro estabelecido ' $TDI\_max_j$ ' e a variável ' $EXS_j$ ' (penalizada na função objetivo) é utilizada no caso ' $TDI\_max_j$ ' fosse ultrapassada pelo valor de ' $TDI_j$ '.

Na restrição (28) limita-se superiormente o valor de '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 ' $DEC\_max$ '.

### 3. Testes e Resultados.

Apresentam-se dois casos: (1) Um número maior de atendimentos sendo o 50% emergenciais; (2) número maior de viaturas com 50% de atendimentos emergenciais. Utiliza-se uma linguagem de modelagem algébrica - *AMPL*, sendo resolvido com o solver *CPLEX* obtendo a saída

gráfica com o *software livre Octave*. A tabela 5 mostra os valores numéricos para os tipos de atendimentos e prioridades a ser considerar no teste. Os dados pela presença de escolas (3min. = 0,05 hrs.), faixas de pedestres (2 min. = 0,0333 hrs.) e presença de semáforos (1 min. = 0,0166 hrs.). O  $DEC_{max} = 0,1$  hrs, assim como o valor de multa ( $MULT\_DEC = 800$  R\$/hrs), número total de consumidores na área em estudo ( $Cs = 15.000$ ) e número de horas limite ( $M = 24$  hrs.).

### 3.1 Caso 1.

Tabela 6: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

$\Omega_v$	$pv[i]$	$\Omega_o$	$po[j]$
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

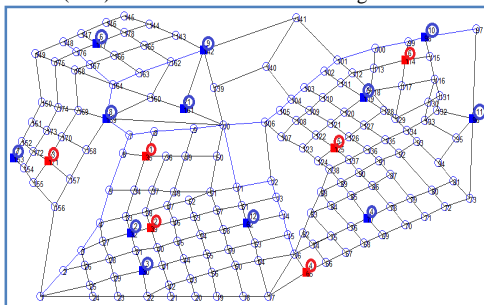
Fonte: Próprio autor.

Tabela 7: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

$ct$	$kp$	$hr$	$\Omega_v$	$\Omega_o$	$\Omega_t$	$ta$	$ml$	$pd$	$tpa$	$TDI_{max}$	$MULT$	$Ca$
230	8	8	1	1	1º	2	150	0	4	0	0	44
200	5	8	2	2	2º	2	0	1	10	4	245	179
250	10	8	3	3	3º	2	130	0	2	0	0	42
190	3	8	4	4	4º	2	140	0	3	0	0	86
190	3	8	5	5	5º	2	0	1	8	5	225	57
200	5	8	6	6	6º	2	0	1	7	6	215	46
-	-	-	-	7	7º	2	0	1	10	4	245	112
-	-	-	-	8	8º	2	140	0	3	0	0	20
-	-	-	-	9	9º	2	0	1	8	5	225	49
-	-	-	-	10	10º	2	150	0	4	0	0	94
-	-	-	-	11	11º	2	130	0	2	0	0	43
-	-	-	-	12	12º	2	0	1	9	4	235	7

Fonte: Próprio autor.

Fig. 8. Posições das 6 viaturas (vermelho) e 12 ocorrências (azul) – 50% de atendimentos emergenciais.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8: Resultados fornecidos pelo modelo – “h”, “TDI” e “EXC” – fase

$hr$	$h$	$\Omega_v$	$\Omega_o$	$ta$	$ml$	$pd$	$TDI$	$TDI_{max}$	$EXC$	$MULT$
8	3.1256	1	1	2	150	0	6.00333	0	0	0
8	0	2	2	2	0	1	9.43867	4	5.43867	245
8	3.00967	3	3	2	130	0	2.38	0	0	0
8	0	4	4	2	140	0	2.66667	0	0	0
8	0	5	5	2	0	1	9.35133	5	4.35133	225
8	0	6	6	2	0	1	3.162	6	0	215
-	-	-	7	2	0	1	2.41667	4	0	245
-	-	-	8	2	140	0	5.558	0	0	0
-	-	-	9	2	0	1	5.958	5	0.958	225
-	-	-	10	2	150	0	2.55733	0	0	0
-	-	-	11	2	130	0	2.83333	0	0	0
-	-	-	12	2	0	1	6.512	4	2.512	235

Fonte: Próprio autor.

Com os dados considerados (Tabelas 6 e 7) na resolução da metodologia proposta para a fase ‘1’ obtêm-se as matrizes de tempos de deslocamento  $mvo$ ,  $moo$  e  $mov$  a ser usados como dados para a resolução da fase ‘2’. Já na fase ‘2’ (Ver Tabela 8) as sequências de atendimentos obtidas são para a viatura ‘1’:  $\{(1^\circ, 6), (2^\circ, 9), (3^\circ, 5)\}$ ; viatura ‘2’:  $\{(1^\circ, 3), (2^\circ, 8)\}$ ; viatura ‘3’:  $\{(1^\circ, 7), (2^\circ, 2)\}$ ; viatura ‘4’:  $\{(1^\circ, 4)\}$ ; viatura ‘5’:  $\{(1^\circ, 11)\}$ ; viatura ‘6’:  $\{(1^\circ, 10), (2^\circ, 1)\}$ . Com os valores de tempo total de demora em atender cada ocorrência ‘ $TDI_j$ ’ (Ver Tabela 8) e número de consumidores atingidos por cada ocorrência ‘ $Ca_j$ ’ (Ver Tabela 7) assim como o número de consumidores totais na área em estudo ( $Cs = 15.000$ ) calcula-se o DEC segundo a expressão (28) na fase ‘2’, obtendo assim o  $DEC = 0,270$  hrs, maior ao  $DEC_{max} = 0.1$  hrs nos dados, gerando assim um valor extra  $ALPHA\_DEC = 0,170$  hrs a ser penalizado, obtendo finalmente uma função objetivo ( $fob = 4724,33$  R\$) que representa o gasto para a concessionária de energia.

### 3.2 Caso 2.

Tabela 9: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

$\Omega_v$	$pv[i]$	$\Omega_o$	$po[j]$
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	-	-

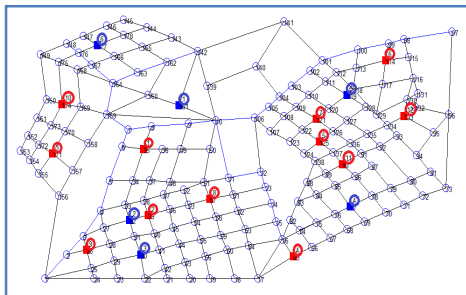
Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Dados das posições das Viaturas e Ocorrências – Fase 1.

$ct$	$kp$	$hr$	$\Omega_v$	$\Omega_o$	$\Omega_t$	$ta$	$ml$	$pd$	$tpa$	$TDI_{max}$	$MULT$	$Ca$
230	8	8	1	1	1 <sup>o</sup>	2	150	0	4	0	0	50
200	5	8	2	2	2 <sup>o</sup>	2	0	1	10	4	245	79
250	10	8	3	3	3 <sup>o</sup>	2	130	0	2	0	0	23
190	3	8	4	4	4 <sup>o</sup>	2	140	0	3	0	0	27
190	3	8	5	5	5 <sup>o</sup>	2	0	1	8	5	225	12
200	5	8	6	6	6 <sup>o</sup>	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: Próprio autor.

Fig. 9. Posições das 12 viaturas (vermelho) e 6 ocorrências (azul) – 50% de atendimentos emergenciais.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 11: Resultados fornecidos pelo modelo – “h”, “TDI” e “EXC” – fase ‘2’.

$hr$	$h$	$\Omega_v$	$\Omega_o$	$ta$	$ml$	$pd$	$TDI$	$TDI_{max}$	$EXC$	$MULT$	$Ca$
8	0	1	1	2	150	0	3.044	0	0	0	50
8	0	2	2	2	0	1	2.482	4	0	245	79
8	0	3	3	2	130	0	5.290	0	0	0	23
8	0	4	4	2	140	0	6.542	0	0	0	27
8	0	5	5	2	0	1	2.60	5	0	225	12
8	0	6	6	2	0	1	4.42	6	0	215	97
8	0	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	0	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor.

Com os dados considerados (Tabelas 9 e 10) na resolução da metodologia proposta para a fase ‘1’ obtêm-se as matrizes de tempos de deslocamento  $mvo$ ,  $moo$  e  $mov$  a ser usados como dados para a resolução da fase ‘2’. Já nesta fase (Ver Tabela 11) as seqüências de atendimentos obtidas são para a viatura ‘7’:  $\{(1^o, 1), (2^o, 4)\}$ ; viatura ‘9’:  $\{(1^o, 2), (2^o, 3)\}$ ; viatura ‘11’:  $\{(1^o, 6)\}$ ; viatura ‘12’:  $\{(1^o, 5)\}$ . Com os valores de tempo total de demora em atender cada ocorrência ‘ $TDI_j$ ’ (Ver Tabela 11) e número de consumidores atingidos por cada ocorrência ‘ $Ca_j$ ’ (Ver Tabela 10) assim como o número de consumidores totais na área em estudo ( $Cs = 15.000$ ) calcula-se o DEC segundo a expressão (28) na fase ‘2’, obtendo assim o  $DEC = 0,074 \text{ hrs}$ , maior ao  $DEC_{max} = 0.1 \text{ hrs}$  nos dados, não gerando valor extra ( $ALPHA_{DEC} = 0 \text{ hrs}$ ), obtendo finalmente uma função objetivo ( $fob = 0,00 \text{ R\$}$ ) que representa o gasto para a concessionária de energia.

#### 4. Conclusões.

Para o caso ‘1’ (Ver Tabela 8) mostram-se para um número maior de atendimentos o modelo proposto de PLIM cumpre a totalidade de atendimentos com excesso de tempos das viaturas (tempo extra sobre o horário de trabalho) e das ocorrências (tempo de demora em ser atendidas) ocasionando gastos mínimos para a concessionária de energia elétrica. Já no caso ‘2’ os resultados (Ver Tabela 11) mostram um número maior de unidades de atendimento (viaturas) as ocorrências são atendidas pelas viaturas mais capacitadas abrangendo assim os atendimentos apresentados nesse instante do dia sem valor de excesso que represente um gasto para a concessionária de energia; finalmente os resultados mostram o potencial do modelo de PLIM apresentada. A partir do presente trabalho tem-se um grande campo de pesquisa a ser explorado considerando sistemas de informação geográficas das cidades, mapas das redes elétricas, números de sub estações, linhas, bases de dados com informação

específicas de endereços dos clientes, além na função objetivo incluir variáveis relacionadas a custos de manutenção das unidades de atendimentos, entre outros.

## 5. Referências.

- [1] BELFIORE, P. e FÁVERO, L. “*Problema de Roteirização de Veículos com Entregas Fracionadas*”, XIII SIMPER, Bauru, 2006.
- [2] BOAVENTURA, P. e JURKIEWICZ, S. “*Grafos: Introdução e Prática*”, Edit. Blucher, 2009.
- [3] CAIUÁ, REDE DE ENERGIA, [www.redenergia.com/caiua/](http://www.redenergia.com/caiua/).
- [4] FERREIRA DE AMORIM, M. “*Otimização de Atendimentos de Emergência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica*”, Niterói, 2010.
- [5] FOURER, R., GAY, D., KERNIGHAN, W., “*AMPL: A Mathematical Programming Language*”, Edit. Thomson, 2002.
- [6] GAMBINI SANTOS, H. “*Formulações e Algoritmos para o Problema de Programação de Horários em Escolas*”, Niterói, 2007.
- [7] GOLDBARG, M. e LUNA, H. “*Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*”, RJ Campus, 2000.
- [8] KAGAN, N., SCHMIDT, H., BARIONI DE OLIVEIRA, C. e ROBBA, E. “*Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia elétrica*”, Editorial Blucher, 2009.
- [9] KAGAN, N., SCHMIDT, H., BARIONI DE OLIVEIRA, C. e KAGAN, H. “*Métodos de Otimização Aplicados aos Sistemas Elétricos de Potência*”, Edit. Blucher, 2009.
- [10] KORTE, B. e VYGEN, J. “*Combinatorial Optimization: Theory and Algorithms*”, Springer 5ª Ed, 2012.
- [11] LAMBERT, G., BORGES DA SILVA, L., AOKI, R., MORAES, C., COSTA, B. e BARBOSA, J. “*Sistema Inteligente de Locomoção de Viaturas para Atendimentos na Rede de Distribuição*”, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Brasília, 2004.
- [12] LIU, C., RAVI, R. e SINGH, M. “*Iterative Methods in Combinatorial Optimization*”, Cambridge University Press, 2011.
- [13] PATIAS VOLPI, N., WILHEM, V., CARNIERI, R., ZAMBENETTI, V. e GROSS, J. “*Designação de Serviços em uma Empresa de Distribuição de Energia Elétrica*”, Revista Eletrônica e Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, Rio de Janeiro, 2011.
- [14] POTTER, S., “*An Introductory Tutorial for AMPL with Examples Winston, Operations Research: Applications and Algorithms, 3ª Ed*”.
- [15] PRATA, B., ABREU GOMES, F., BARROSO, G. e FURTADO, J. (2008) “*Análise de Desempenho de Sistemas de Atendimento Emergencial em Redes de Distribuição de Energia Elétrica: Uma Aplicação de Redes Petri Coloridas*”, Fortaleza, 2008, XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008.
- [16] REGIS MAURI, G. “*Uma Nova Abordagem para o Problema de Roteirização e Programação de Veículos*”, INPE São José dos Campos, 2006.
- [17] STEINER, M., DA SILVA COSTA, C., BERTHODI, D., e ANDRETTA, E. “*Técnicas da Pesquisa Operacional Aplicada à Logística de Atendimento aos Usuários de uma Rede de Distribuição de Energia Elétrica*”, Paraná, 2006.
- [18] TELES, R., IVAMOTO, M., MELLO, L., GRACIANO, V. e CARVALHO, C. “*Um Sistema de Apoio à Decisão Baseado em Agentes para Tratamento de Ocorrências no Setor Elétrico*”, Goiás, 2010.
- [19] TELLES, C., RODRIGUES, L., COUTO, A. e SILVEIRA, M. “*Sistema Interligado de Gerenciamento da Manutenção de Redes de Distribuição (SGM)*”, Bahia, 2005.
- [20] THULASIRAMAN, K. e SWAMY, M. “*Graphs: Theory and Algorithms*”, A Wiley-Interscience Publication, University Montreal, Canada, 1992.