

Técnicas da pesquisa operacional aplicadas à logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica

Maria Teresinha Arns Steiner¹, tere@mat.ufpr.br

Clarice Einhardt da Silva Costa, clarices@copel.com

Deise Maria Berthodi Costa², deise@ufpr.br

Élsio Andretta Filho, elsio@mat.ufpr.br

Vóldi C. Zambenedetti³, voldi@lactec.org.br

¹Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná

²Departamento de Desenho, Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia

³Instituto Tecnológico para o Desenvolvimento – LACTEC

Curitiba, Paraná, Brasil

*Recebido: Novembro, 2006 / Aceito: Dezembro, 2006

RESUMO

O presente trabalho trata da otimização da logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica, aplicada à agência do Portão, localizada em Curitiba, PR, Brasil, de responsabilidade da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL). Através de técnicas da área de Pesquisa Operacional, um modelo Matemático de Programação Inteira e o algoritmo de Floyd, definiu-se uma metodologia que permite determinar de forma otimizada o dimensionamento de equipes de atendimento para a referida agência e o despacho otimizado das mesmas aos locais das ocorrências, visando um atendimento satisfatório aos usuários, e, além disso, a execução dos serviços emergenciais, de imediato, e dos comerciais, de acordo com as metas estipuladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) juntamente com a COPEL. A metodologia aqui apresentada é genérica, podendo ser aplicada a qualquer rede (ou parte dela) de distribuição elétrica, sendo que a mesma apresentou resultados bastante satisfatórios para o caso aqui abordado.

Palavras-Chave: Dimensionamento e Despacho de Equipes; Otimização da Logística de Atendimento; Programação Inteira; Algoritmo de Floyd.

1. INTRODUÇÃO

O volume de solicitações dos usuários das concessionárias de energia elétrica é bastante significativo e, 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 usuário (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.

Diante deste contexto, as tarefas de se dimensionar as equipes de trabalho das concessionárias para uma cidade/agência/setor/rota, assim como a de se despachar/designar a equipe mais próxima disponível e com o equipamento necessário para atender a uma determinada ocorrência, tornam-se extremamente árduas e complexas para os operadores das referidas concessionárias. O número de equipes deverá mudar de acordo com as variações das solicitações, ou seja, será dependente da hora do dia, do mês, da estação do ano e outros e o despacho deverá considerar os "melhores" trajetos de acordo com as distâncias (entre os locais das ocorrências e das equipes), tráfego, semáforos e outros.

Alguns trabalhos correlatos ao tema aqui proposto são os seguintes: Aoki (2003) apresenta um projeto do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da Companhia Energética de Brasília (CEB), onde foi desenvolvida uma metodologia para determinar a "melhor" viatura e o "melhor" caminho que este deve efetuar para atender a uma ocorrência. Takeda *et al.* (2004) apresentam uma análise dos efeitos da descentralização de ambulâncias que operam no sistema de atendimento médico-emergencial (SAMU-192) de Campinas, SP, o qual é tratado por meio do modelo hipercubo de filas espacialmente distribuídas.

Já Barboza *et al.* (2003) propõem uma solução para a elaboração e designação de jornadas de trabalho em uma central telefônica de atendimento 24 horas, utilizando três técnicas da Pesquisa Operacional, aplicadas seqüencialmente: Simulação; um modelo de Programação Linear Inteira e o algoritmo do Matching de Peso Máximo. Siqueira *et al.* (2004) mostram a aplicação do Algoritmo do Matching de Peso Máximo na elaboração de jornadas de trabalho para motoristas e cobradores de ônibus, o qual deve ser resolvido levando-se em consideração o maior aproveitamento possível das tabelas de horários, com o objetivo de minimizar o número de funcionários, de horas extras e de horas ociosas. Carnieri e Arns Steiner (1997) utilizam algoritmos heurísticos, que são baseados na construção manual das tabelas de horários para motoristas e cobradores de ônibus, além da técnica da Programação Dinâmica.

Jaumard *et al.* (1998) propuseram a geração de horários de enfermeiros atendendo as regras requeridas pela categoria e a demanda de pessoal objetivando minimizar os custos envolvidos e maximizar a preferência dos enfermeiros por horários e, também, a qualidade dos serviços. Thompson (1997) desenvolveu um método para designar atendentes aos horários de suas preferências, levando em consideração o tempo de serviço, priorizando os funcionários mais antigos. O problema de escala de horários para tripulação de empresas aéreas tem sido abordado por diversos pesquisadores, dentre os quais pode-se destacar: Gamache *et al.* (1999), Hoffman e Padgerg (1993) e Graves *et al.* (1993).

Rousseau (2000) comenta sobre sua experiência em utilizar um sistema computacional (Hastus) em um contexto regional, onde o transporte público é normalmente caracterizado pelo alto nível de inter-relação entre os horários dos veículos e condutores; casos estudados na França e na Alemanha usando a abordagem são relatados apresentando economias de 3 a 5%. Kwan *et al.* (2000) comentam em seu trabalho sobre um sistema (Tracs II) usado para a construção de horários para condutores, desenvolvido principalmente para a indústria de trens na Inglaterra; o trabalho em questão descreve os problemas de construção de horários para condutores de ônibus e condutores de trens.

Em Wren e Gualda (1997) é apresentada a aplicação de sistemas desenvolvidos na Universidade de Leeds para a construção de jornadas de trabalho de motoristas de ônibus; estes sistemas foram aplicados nas cidades de Fortaleza, São Paulo e Sorocaba, sendo que cada jornada deve ter duração próxima do padrão ideal de cada cidade. FORES et al. (2000) apresentam um modelo de Programação Linear Inteira flexível "dirigida pelo usuário" para a otimização do sistema Tracs II que executa a construção de horários para condutores de ônibus e de trem. Em Caprara *et al.* (2002) tem-se o problema da construção de jornadas de trabalho para a tripulação ferroviária assemelha-se ao problema de jornadas para motoristas de ônibus; considera-se inicialmente uma tabela de serviços a ser cumprida diariamente em certos períodos de tempo, definindo-se alguns segmentos de jornadas de trabalho, os tempos inicial e final de uma jornada, além das estações de entrada e de saída para um funcionário.

O presente trabalho utiliza técnicas da área de Pesquisa Operacional, para sugerir uma metodologia:

- que permita dimensionar o número ideal/ótimo de equipes de trabalho por agência e, conseqüentemente, as suas localizações (por agência), visando um atendimento satisfatório aos clientes;
- para fazer o despacho/designação das equipes aos locais das ocorrências, de maneira a executar os serviços emergenciais, de imediato, e os serviços comerciais, de acordo com os prazos (metas) estipulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela concessionária, a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), no caso deste trabalho.

Além dos objetivos anteriormente especificados, o trabalho visa o desenvolvimento de soluções que priorizem o atendimento ao maior número possível de usuários, procurando reduzir o tempo e os custos envolvidos, melhorando os índices de qualidade (DEC/FEC; DIC/FIC; DMIC).

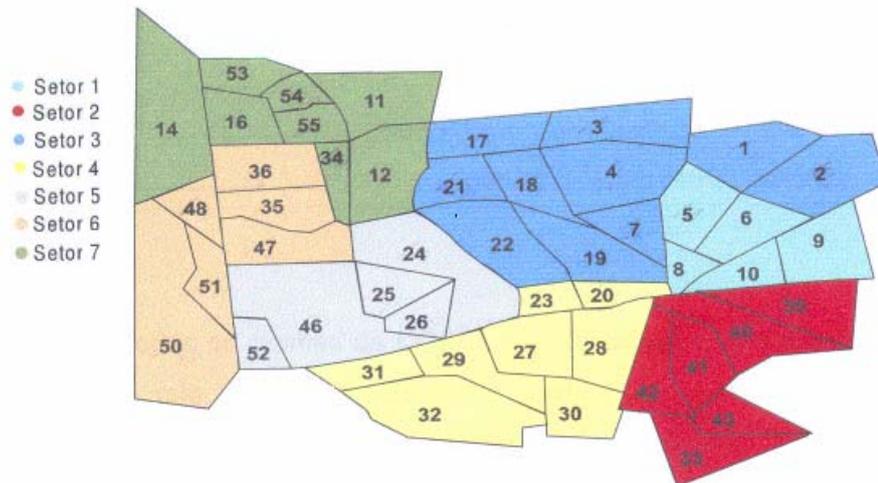
Neste trabalho é apresentada na seção 2, a descrição do problema como um todo, dando uma visão geral do mesmo; na seção 3 são apresentados os dados/registros históricos levantados junto a concessionária para ilustrar a metodologia proposta; na seção 4 são apresentadas as técnicas da área de Pesquisa Operacional que compõem a metodologia; na seção 5 são apresentados alguns dos resultados obtidos e a análise dos mesmos e, finalmente, na seção 6 são apresentadas as conclusões.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A COPEL, no estado do Paraná, está dividida em cinco regionais: Cascavel; Maringá; Londrina; Ponta Grossa e Curitiba. Não existe envolvimento entre as regionais, sendo que cada regional possui seus conjuntos de consumidores que, por sua vez, possuem as suas metas de atendimento.

Os consumidores de energia elétrica da regional de Curitiba, por sua vez, estão distribuídos em seis agências: Centro; Portão; Sítio Cercado; Vila Hauer; Bacacheri e Santa Felicidade, cada uma atendendo um conjunto de bairros adjacentes. Cada agência é dividida em setores/regiões, e, estas, em rotas de leitura. A agência do Portão, selecionada para o desenvolvimento e ilustração da metodologia aqui apresentada, possui sete setores contendo 48 rotas de leitura, conforme figura 1 a seguir. Observe-se que estas rotas estão numeradas de 1 a 55, não constando desta relação as rotas de números 13, 15, 37, 38, 44, 45 e 49 totalizando, assim, as 48 rotas mencionadas.

Cada rota de leitura possui, em média, 2.000 consumidores, fazendo com que um bairro com alta densidade demográfica contenha várias rotas de leitura com áreas de abrangência pequenas e um bairro com baixa densidade demográfica seja atendido por



*

Figura 1. Mapa da agência do portão enfatizando os sete setores de atendimento, contendo 48 rotas de leitura. Fonte: Costa (2005)

Dentre as principais atividades de uma agência encontra-se o atendimento às solicitações de serviços comerciais e emergenciais. Os serviços comerciais envolvem serviços como ligações de unidades consumidoras monofásica, bifásica, trifásica, temporária sem medição, confirmação de leitura, religação de consumidores desligados, corte de energia de consumidores inadimplentes, desligamento a pedido do cliente, padronização de entrada de serviço, aumento de carga, substituição de medidores, vistorias em geral, dentre outros. Já os serviços emergenciais envolvem serviços como, cabos caídos, atendimento a clientes VIPs, corte indevido, falta geral de luz, ramal "derretendo", roubo de ramal de ligação, dentre outros. Vale salientar que as chamadas emergenciais, de caráter estocástico, podem ser típicas (emergências) ou atípicas (urgências ou "super-emergências") e que as chamadas comerciais, são de caráter determinístico, podem ser classificadas de acordo com suas metas.

Os serviços comerciais podem ser sem impedimentos, ou seja, são serviços que puderam ser executados ou, então, com impedimentos, ou seja, 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.

A ANEEL impõe às concessionárias de energia elétrica, prazos de atendimento às diversas solicitações dos consumidores (DEC-FEC), sendo que a COPEL trabalha com as interrupções individuais (DIC-FIC). Para que a concessionária atinja tais metas, faz-se necessário dimensionar as equipes de trabalho para a execução dos serviços de maneira otimizada, para que não haja excesso (acarretando prejuízos à COPEL) ou escassez (multas junto a ANEEL) de equipes por agência, visando um atendimento satisfatório aos usuários. Além disso, faz-se necessário despachar/designar as 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/COPEL.

Quando um cliente solicita um atendimento à COPEL, é gerado um documento em um software gerenciador de solicitações, chamado Gestão de Consumidores (GCO). Neste documento constam o tipo de serviço solicitado e os dados de identificação do cliente, que permitem a localização geográfica do mesmo, conforme esquema apresentado na figura 2 a seguir (COSTA (2005)).

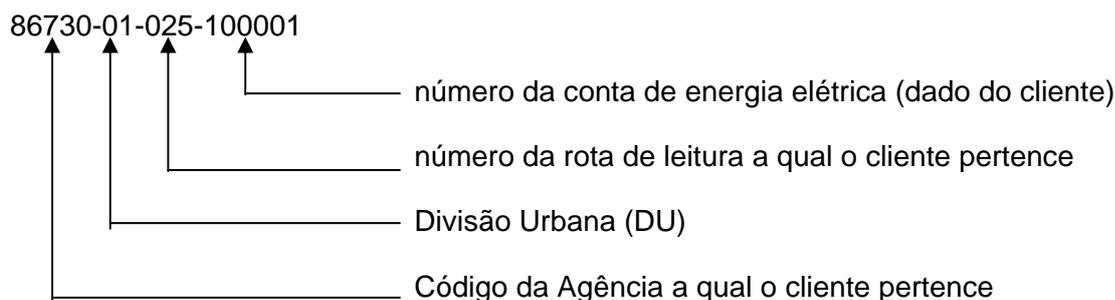


Figura 2. Número de identificação do consumidor pela COPEL

Após a geração deste documento, o mesmo é enviado automaticamente para o despachante através de um outro software chamado Sistema de Operações de Distribuição (SOD), onde é feito o despacho do serviço ao eletricista.

O repasse de serviços entre o call center e o despachante é feito automaticamente via software, não necessitando de intervenção humana. O envio dos serviços aos eletricistas, no entanto, requer que o despachante identifique a qual rota de leitura o solicitante pertence, a qual setor esta rota está subordinada e qual(is) equipe(s) de eletricistas presta(m) atendimento a este setor.

De posse destas informações, o despachante gera um documento e o envia ao eletricista que o receberá em seu celular ou no computador de seu veículo, dependendo dos equipamentos disponíveis. Assim sendo, atualmente, a designação das tarefas às equipes de atendimento é feita manualmente, procedimento que pode ser otimizado.

Ao concluir a execução do serviço, a conclusão do documento deve ser feita pelos eletricistas: via celular, situação em que o eletricista, imediatamente após a execução da tarefa, liga ou envia mensagem para o escritório comunicando a conclusão do serviço; ou via computador, situação em que o veículo utilizado na execução da tarefa possui computador interligado à rede de computadores da COPEL.

Cada etapa do serviço (agendamento da distribuição/serviço; enviado; reconhecido; equipe em curso; em execução; deslocamento final; aguardando equipe; aguardando cancelamento; reenvio; aguardando verificação; execução encerrada pendente; pendência de inclusão) é mostrada na tela do operador. Na figura 3 a seguir, tem-se a ilustração dos diversos tempos considerados no decorrer do processo de uma chamada, desde a sua solicitação até o retorno do atendimento.

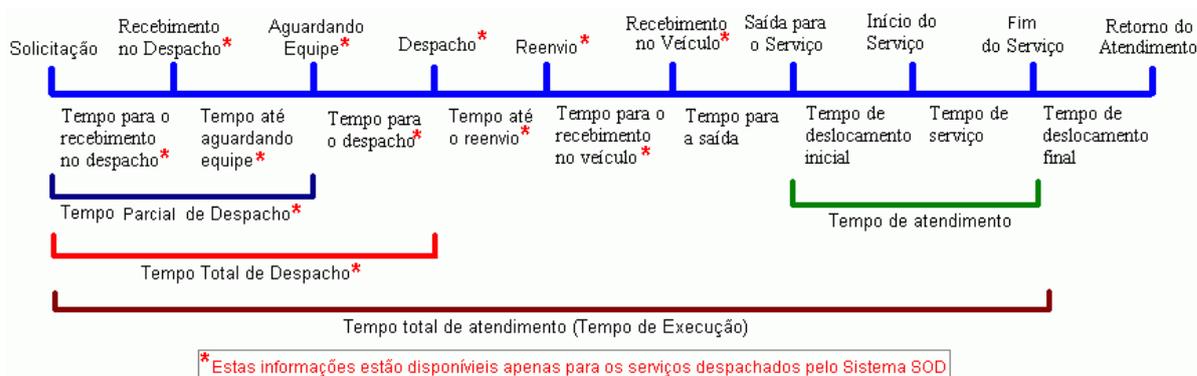


Figura 3. Linha dos Tempos. Fonte: Azoni *et al.* (2004)

3. COLETA DE DADOS

Atualmente, a agência do Portão é atendida por 18 funcionários da COPEL com cargo de eletricista, que possuem 10 carros e 2 motos a sua disposição para a execução dos trabalhos e 14 eletricistas terceirizados, com 14 carros.

Neste trabalho são consideradas apenas as equipes que fazem serviços comerciais (com e sem impedimentos) e emergenciais, embora existam outros tipos de equipes (leituristas, administração e outras). Dentre estes serviços, é considerado o tempo de atendimento (figura 3), em minutos, a cada hora do dia no decorrer de um mês. Foram considerados os registros históricos do mês de outubro de 2004, totalizando 21.358 registros, sendo 20.443 ocorrências comerciais (9.170 executadas e 11.273 com impedimento) e 915 ocorrências emergenciais. Tais registros podem ser observados na tabela 1 a seguir, em quantidade e em total de minutos, a cada hora do dia, para os serviços citados.

Nesta tabela 1 tem-se, por exemplo, que no intervalo das 14:00 hs. às 15:00 hs. foram realizados 1.179 atendimentos comerciais com impedimento; 1.046 atendimentos comerciais sem impedimento e 52 atendimentos emergenciais, totalizando 2.277 atendimentos. Os correspondentes tempos de atendimento, em minutos, a estes serviços, foram de 8.949; 7.486 e 1.194, respectivamente, totalizando 17.629 minutos. Da mesma forma, tem-se a interpretação para os demais intervalos.

4. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi dividida em duas fases distintas. Na 1ª fase objetiva-se o dimensionamento das equipes para a agência, tendo-se, assim a localização das mesmas; para isto, basicamente, construiu-se um modelo matemático de Programação Linear Inteira (MURTY (1985)). Já na 2ª fase, como o objetivo é o despacho das equipes às ocorrências, pode-se empregar o Algoritmo de Floyd, reportado em Lapin (1994) e Ahuja *et al.* (1993). Vale salientar que as técnicas mencionadas, modelo matemático e algoritmo de Floyd, são técnicas da área de Pesquisa Operacional.

4.1 DIMENSIONAMENTO DAS EQUIPES:

Para o dimensionamento das equipes na referida agência do Portão, são consideradas as seguintes informações:

- tempo de atendimento, em minutos, dos serviços comerciais (com e sem impedimentos) e emergenciais ocorridos na agência a cada hora do dia durante o referido mês de outubro de 2004. Estes dados estão apresentados na tabela 1 anterior;
- possibilidade das equipes terem turnos/jornadas de 4 e/ou 6 e/ou 8 horas, podendo iniciar a cada hora "cheia" do dia, ou seja, 0:00, 1:00, 2:00, ..., 23:00 horas.

Vale salientar que o número de solicitações e tipos de serviços solicitados variam bastante de um mês para outro, pois, conforme já comentado, o mesmo depende de vários fatores como, dia da semana (dia útil, final de semana, feriado), sazonalidade (época de chuvas ou não), período de férias escolares, dentre outros. Deste modo, seria interessante que o referido dimensionamento e a conseqüente localização das equipes fossem elaborados, por exemplo, a cada mês.

Sendo:

- i = horas "cheias" do dia ($i = 0, 1, 2, \dots, 23$);
- j = os possíveis turnos de trabalho das equipes ($j = 4; 6; 8$),
- T_i = tempo total (em minutos) necessário para realizar todos os serviços (comerciais, com e sem impedimento; emergenciais), durante a hora i .

Tabela 1. Resumo das ocorrências (comerciais, com e sem impedimento; emergenciais) do

mês de agosto de 2004

Serviços	Comercial com Imped.		Comercial sem Imped.		Emergencial		TOTAL	
	Quantidade ocorrências	Tempo de Atend. (minutos)	Quantidade ocorrências	Tempo de Atend. (minutos)	Quantidade ocorrências	Tempo de Atend. (minutos)	Quantidade Ocorrências	Tempo de Atend. (minutos) T_i ($i = 0, 23$)
0 - 1	1.192	36	546	22	7	178	1.745	236
1 - 2	1	7	1	7	4	209	6	223
2 - 3	---	---	---	---	9	477	9	477
3 - 4	1	---	---	---	5	130	6	130
4 - 5	---	---	---	---	4	155	4	155
5 - 6	19	---	7	---	11	543	37	543
6 - 7	157	---	151	---	13	563	321	563
7 - 8	70	121	64	108	21	673	155	902
8 - 9	292	2.893	232	2.348	51	1.333	575	6.574
9 - 10	717	6.985	584	5.648	71	1.737	1.372	14.370
10 - 11	865	9.793	743	7.931	81	2.139	1.689	19.863
11 - 12	692	7.200	599	6.268	78	1.950	1.369	15.418
12 - 13	471	1.719	434	1.542	63	1.470	968	4.731
13 - 14	840	5.145	707	4.436	52	1.234	1.599	10.815
14 - 15	1.179	8.949	1.046	7.486	52	1.194	2.277	17.629
15 - 16	1.458	7.689	1.285	6.894	49	1.594	2.792	16.177
16 - 17	1.377	7.347	1.219	6.033	46	1.227	2.642	14.607
17 - 18	841	1.034	658	939	48	1.219	1.547	3.192
18 - 19	386	1.632	310	1.507	50	1.342	746	4.481
19 - 20	264	1.484	216	1.308	52	1.677	746	4.469
20 - 21	236	1.600	205	1.468	57	1.740	498	4.808
21 - 22	162	449	122	322	40	1.129	324	1.900
22 - 23	40	215	31	122	27	767	98	1.104
23 - 0	13	271	10	239	24	822	47	1.332
Total	11.273	64.569	9.170	54.628	915	25.502	21.358	144.699

Então, a quantidade/demanda de equipes na hora i , D_i , em uma determinada agência (Portão, no caso deste trabalho), é dada por: $D_i = T_i / (60 \times 31)$, já que deseja-se o número de equipes por hora (60 minutos) e o mês de outubro possui 31 dias, considerando-se a soma de todos os tempos de atendimento T_i , em minutos, a cada hora do dia, de todos os serviços os quais são apresentadas na tabela 1 anterior, última coluna. Fazendo este cálculo para cada hora i "cheia" do dia, tem-se as demandas horárias ($D_0, D_1, D_2, \dots, D_{23}$) por equipes para o referido mês em estudo.

Assim, sendo as variáveis de decisão x_{ij} = número de equipes de jornada j que inicia seu trabalho na hora i ; considerando que cada equipe trabalhe 4 e/ou 6 e/ou 8 horas por dia ininterruptamente e, ainda, que as equipes possuem custos c_{ij} diferenciados como, por exemplo, as que trabalham 6 horas por dia possuem um custo 1,5 maior do que as equipes que trabalham 4 horas por dia, e, analogamente, as que trabalham 8 horas por dia possuem o dobro do custo, o modelo matemático, constituído da função objetivo, 24 restrições e 72 variáveis x_{ij} , $i = 0, 1, \dots, 23$ e $j = 4, 6, 8$, fica:

Função Objetivo:

- Minimizar (número e custo de equipes) = $\sum_{j=4} x_{ij} + \sum_{j=6} 1,5 x_{ij} + \sum_{j=8} 2 x_{ij}$
 Sujeito às seguintes restrições:

- as equipes que estarão atendendo no intervalo (0:00-1:00) são:

$$X_{0,4} + X_{23,4} + X_{22,4} + X_{21,4} + X_{0,6} + X_{23,6} + X_{22,6} + X_{21,6} + X_{20,6} + X_{19,6} + X_{0,8} + X_{23,8} + X_{22,8} + X_{21,8} + X_{20,8} + X_{19,8} + X_{18,8} + X_{17,8} \geq D_0$$

- as equipes que estarão atendendo no intervalo (1:00-2:00) são:

$$X_{1,4} + X_{0,4} + X_{23,4} + X_{22,4} + X_{1,6} + X_{0,6} + X_{23,6} + X_{22,6} + X_{21,6} + X_{20,6} + X_{1,8} + X_{0,8} + X_{23,8} + X_{22,8} + X_{21,8} + X_{20,8} + X_{19,8} + X_{18,8} \geq D_1$$

... e assim, analogamente, para os demais horários, até:

- as equipes que estarão atendendo no intervalo (23:00-0:00) são:

$$X_{23,4} + X_{22,4} + X_{21,4} + X_{20,4} + X_{23,6} + X_{22,6} + X_{21,6} + X_{20,6} + X_{19,6} + X_{18,6} + X_{23,8} + X_{22,8} + X_{21,8} + X_{20,8} + X_{19,8} + X_{18,8} + X_{17,8} + X_{16,8} \geq D_{23}$$

- $x_{ij} \geq 0$ e inteiras

Vale salientar que os resultados do modelo matemático fornecem o dimensionamento de equipes por agência, pois os valores das demandas utilizados para a execução do mesmo, foram os da agência. De modo análogo, poder-se-ia obter o dimensionamento e localização das equipes por setor, por rota, para a cidade toda, ou outro. O modelo matemático poderia considerar, ainda, as demandas dos dias úteis e dos finais de semana, separadamente, por exemplo. Além disso, o modelo poderia ser executado semanalmente (ao invés de mensalmente) ou, ainda, a cada três meses, levando-se em consideração a sazonalidade. Assim, obter-se-ia vários cenários visando encontrar aquele que mais se adaptasse à situação.

Deve-se observar que se o dimensionamento e localização das equipes for adequado, ter-se-á mais eficiência nos atendimentos, deixando-se menos tarefas pendentes para o dia seguinte, assim como, reduzir-se-á os tempos de atendimentos dos serviços prestados aos clientes da COPEL, além de atender os índices de qualidade requisitados pela ANEEL.

4.2 DESPACHO DAS EQUIPES ÀS OCORRÊNCIAS

Para determinar a equipe mais adequada para fazer o atendimento a uma determinada ocorrência, pode-se utilizar, por exemplo, o Algoritmo de Floyd que determina a mínima distância entre todos os pares de nós (os locais onde se encontram as equipes e os locais das ocorrências) e os seus correspondentes trajetos. Pode-se considerar como locais das equipes e das ocorrências como sendo os centróides das rotas (das 48 rotas no caso da agência do Portão estudada, ver figura 1).

Pode-se, assim, ter-se já a priori, todos os "melhores" caminhos, em termos de distâncias e trajetos, entre quaisquer dois pontos com o uso do referido algoritmo. Assim, dada uma ocorrência, localizada em determinada rota e conhecendo-se as posições das equipes, localizadas, por sua vez, em suas respectivas rotas, basta fazer a leitura na matriz de Floyd, já previamente executada, das possíveis alternativas (tantas quantas forem o número de equipes disponíveis e que possuam o equipamento necessário para executar o serviço) para fazer o "melhor" despacho, ou seja, o despacho otimizado.

Deve-se observar que pode-se levar em consideração muitas variantes ao se utilizar o Algoritmo de Floyd para cada rota, setor, agência ou cidade toda, inserindo-se penalizações "negativas" (aumentando) ou "positivas" (diminuindo) as distâncias dos trechos viários da cidade, de acordo com o trânsito/tráfego; horário do dia; locais de escolas; e outros que se façam necessários.

4.2.1 Algoritmo de Floyd

Fornece os caminhos de mínimo custo/distância para todos os pares de nós de um grafo $G(X, A)$ (AHUJA ET AL. (1993) E LAPIN (1994)). Seja $C = [c_{ij}]$, de dimensão $n \times n$, a matriz de custos associada a um grafo $G(X, A)$ definida como:

$$c_{ij} = \begin{cases} \text{custo associado ao arco } (x_i, x_j) \in A \\ 0, \forall (x_i, x_j) \in A \\ \infty, \text{ se } (x_i, x_j) \notin A \end{cases}$$

1. Faça $k = 0$
2. $k = k + 1$
3. Para todo $i \neq k$ tal que $c_{ik} \neq \infty$ e todo $j \neq k$ tal que $c_{kj} \neq \infty$ faça a operação:
 $c_{ij} = \min [c_{ij}, (c_{ik} + c_{kj})]$.
4. a. Se $k = n$, pare. A solução foi alcançada e $[c_{ij}]$ fornece os custos mínimos para cada par de nós.
 b. Se $k < n$, volte a 2.

O algoritmo pode ser complementado a fim de apresentar, além dos custos mínimos, os trajetos nos quais estes custos foram obtidos. Para tanto é feito o armazenamento de uma segunda matriz $\theta = [\theta_{ij}]$, de dimensão $n \times n$, onde θ_{ij} é o vértice predecessor do vértice x_j no caminho mínimo entre os vértices x_i e x_j . Inicialmente, $\theta_{ij} = x_i, \forall j$. A atualização desta matriz será feita da seguinte forma:

$$\theta_{ij} = \begin{cases} \theta_{kj} & \text{se } (c_{ik} + c_{kj}) < c_{ij} \\ \theta_{ij} & \text{se } (c_{ik} + c_{kj}) \geq c_{ij} \end{cases}$$

5. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O modelo matemático apresentado na seção 4.1 anterior pode ser resolvido utilizando, por exemplo, o software livre GLPK (Gnu Linear Program Kit). Os resultados fornecidos a cada hora do dia para o mês de outubro de 2004, estão apresentados a seguir e sintetizados na tabela 2, onde são apresentadas duas simulações. Para a 1ª simulação (valores com "*") considerou-se todos os c_{ij} iguais a "1"; já para a 2ª simulação (valores sem "*") considerou-se os c_{ij} iguais a "1"; "1,5" e "2", para as equipes com jornadas de 4, 6 e 8 horas de trabalho, respectivamente, conforme discutido na seção 4.1.

Os valores obtidos para as variáveis x_{ij} para a 1ª simulação são: $x_{0,6} = 1$; $x_{18,6} = 1$; $x_{4,8} = 1$; $x_{8,8} = 3$; $x_{9,8} = 7$; $x_{14,8} = 2$, totalizando 15 equipes a um custo de \$29; já para a 2ª simulação, são: $x_{8,4} = 3$; $x_{10,6} = 2$; $x_{22,6} = 1$; $x_{4,8} = 1$; $x_{9,8} = 5$; $x_{14,8} = 3$, totalizando 15 equipes também, a um custo de \$25,5.

Na tabela 2, em "Nec." tem-se o número necessário de equipes a cada hora do dia, ou seja, são os valores de D_i ; em "Oti." tem-se o número otimizado de equipes para cada hora do dia, obtido através do modelo matemático e, finalmente, em "Dif." tem-se a diferença entre os valores otimizados e os necessários de equipes. Várias simulações variando-se os custos, as jornadas de trabalho, o tamanho dos intervalos e outros que se façam necessários podem ser efetuadas.

Já para o algoritmo de Floyd, tem-se que as matrizes iniciais, assim como as matrizes finais de custos e de trajetos, são simétricas e da ordem 48×48 , já que o número de rotas (figura 1) é 48. A figura 1 gera um grafo $G(X, A)$, onde X é o conjunto de nós (centróides de cada rota) e A é o conjunto de arestas (ligações entre os centróides das rotas adjacentes), sendo que as cardinalidades de X e A são, respectivamente, $|X| = 48$ e $|A| = 254$ (117×2 , ou seja, para cada ligação entre os centróides, são considerados os dois sentidos entre os mesmos, "ida" e "volta").

Tabela 2. Dimensionamento/distribuição das equipes a cada hora do dia no decorrer do mês de agosto de 2004

H \ H	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	
0-1	1*	1*	1*	1*	1*	1*																			
1-2																									
2-3																									
3-4																									
4-5					1*/1	1*/1	1*/1	1*/1	1*/1	1*/1	1*/1	1*/1													
5-6																									
6-7																									
7-8																									
8-9									3*/3	3*/3	3*/3	3*/3	3*/3	3*/3	3*/3	3*/3									
9-10										7*/5	7*/5	7*/5	7*/5	7*/5	7*/5	7*/5	7*/5								
10-11											2	2	2	2	2	2									
11-12																									
12-13																									
13-14																									
14-15															2*/3	2*/3	2*/3	2*/3	2*/3	2*/3	2*/3	2*/3	2*/3		
15-16																									
16-17																									
17-18																									
18-19																			1*	1*	1*	1*	1*	1*	
19-20																									
20-21																									
21-22																									
22-23	1	1	1	1																			1	1	
23-0																									
Nec	1	1	1	1	1	1	1	1	4	8	11	9	3	6	10	9	8	2	3	3	3	3	2	1	1
Oti	1*/1	1*/1	1*/1	1*/1	2*/1	2*/1	1*/1	1*/1	4*/4	11*/9	11*/11	11*/11	10*/10	10*/10	12*/11	12*/13	9*/8	2*/3	3*/3	3*/3	3*/3	3*/3	1*/1	1*/1	
Dif	0*/0	0*/0	0*/0	0*/0	1*/0	1*/0	0*/0	0*/0	0*/0	3*/2	0*/0	2*/2	7*/7	4*/4	2*/1	3*/4	1*/0	0*/1	0*/0	0*/0	0*/0	0*/0	1*/1	0*/0	0*/0

Assim sendo, as referidas matrizes possuem 2.304 elementos. Na matriz inicial de custos, dos 2.304 elementos, 254 são unitários (iguais a "1"), apontando as rotas que são adjacentes; os 48 elementos da diagonal principal são nulos e os demais 2002 elementos, iniciam com um valor considerado alto em relação aos demais, por exemplo, "99". Já a matriz inicial de trajetos, conforme apresentado no algoritmo de Floyd, na seção 4.2.1, possuem os valores de cada linha, iguais ao número da própria rota; assim a linha 1, por exemplo, possui todos os 48 elementos iguais a "1", a linha 2, todos iguais a "2" e assim por diante.

Aplicando-se o referido algoritmo aos dados do problema (figura 1), através de um programa desenvolvido em *Visual Basic 6.0*, obtém-se as valores constantes das tabelas 3 e 4, com os custos e trajetos respectivamente entre todas as 48 rotas. Apenas algumas linhas destas tabelas são apresentadas.

Tabela 3. Matriz de Custos final, entre rotas, obtida através da aplicação do Algoritmo de Floyd

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	5	5	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5
2	1	0	2	2	1	1	2	2	1	2	4	4	6	6	3	3	3	3	4	4	4	5	6	6
3	1	2	0	1	2	2	2	3	3	3	2	2	4	4	1	1	2	3	2	2	3	3	4	4
...
...
54	4	5	3	3	4	5	4	5	6	6	1	2	2	1	2	3	4	4	3	3	4	3	4	4
55	4	5	3	3	4	5	4	4	6	5	1	1	2	1	2	3	3	2	2	3	2	3	2	3

(segue)

	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	39	40	41	42	43	46	47	48	50	51	52	53	54	55
1	5	4	5	5	5	6	5	4	5	5	3	3	4	4	5	5	4	5	6	5	6	4	4	4
2	5	4	6	5	6	6	5	5	6	6	2	3	4	4	5	6	5	6	7	6	7	5	5	5
3	4	4	4	5	4	5	6	3	4	4	4	4	5	5	6	4	3	4	5	4	5	3	3	3
...
...
54	4	5	4	5	4	5	7	2	3	2	6	5	6	6	7	4	3	3	3	4	4	1	0	1
55	3	4	3	4	3	4	6	1	2	1	5	4	5	5	6	3	2	2	3	3	4	2	1	0

Tabela 4. Matriz de Trajetos final, através das rotas, obtida através da aplicação do Algoritmo de Floyd

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1	1	1	1	1	1	1	4	5	2	6	17	17	53	53	3	3	7	8	17	18	19	12	24	24
2	2	2	1	1	2	2	5	5	2	6	17	17	53	53	3	3	7	8	17	18	19	12	24	24
3	3	1	3	3	1	1	4	5	2	6	17	17	53	53	3	3	18	19	17	18	19	12	24	24
...
...
54	3	1	17	17	4	1	4	5	2	6	54	11	16	54	11	17	18	21	12	12	22	12	24	24
55	3	1	17	17	4	1	4	20	2	8	55	55	16	55	11	17	22	21	12	12	22	12	24	24

(segue)

	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	39	40	41	42	43	46	47	48	50	51	52	53	54	55
1	23	20	24	28	47	29	42	11	34	34	9	8	40	40	41	24	12	47	48	47	46	11	11	11
2	23	20	24	28	47	30	42	11	34	34	9	8	40	40	41	24	12	47	48	47	46	11	11	11
3	23	20	24	27	47	29	42	11	34	34	9	8	40	28	41	24	12	47	48	47	46	11	11	11
...
...
54	24	20	24	27	47	29	42	11	34	16	40	20	40	28	41	24	12	14	14	47	50	54	54	54
55	24	20	24	27	47	29	42	55	34	55	40	20	40	28	41	24	12	36	14	47	46	11	55	55

Assim tem-se, por exemplo, que o custo da rota 2 à rota 48 é $c(2, 48) = 6$, através da tabela 3, ou seja, dada uma ocorrência na rota 48 e dada uma equipe disponível, com o equipamento necessário, na rota 2, sabe-se que a mesma terá que passar por seis rotas para alcançar o seu objetivo (rota 48). Para conhecer-se quais são as seis rotas em questão, basta analisar-se a tabela 4, ou seja, no caminho da rota 2 à rota 48 tem-se a rota 47; no caminho da rota 2 à rota 47 tem-se a rota 12; já no caminho da rota 2 à rota 12 está a rota 17; da rota 2 à rota 17 está a rota 3; da rota 2 à rota 3 tem-se a rota 1 e, finalmente, da rota 2 à rota 1 está a própria rota 2, finalizando o processo de leitura. Deste modo, obtém-se o trajeto de 2 à 48, contendo as seis rotas: 2-1-3-17-12-47-48. As células correspondentes às rotas que compõem custo e o trajeto estão hachuradas nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Analogamente, tem-se o custo e o trajeto entre quaisquer duas rotas. Se, por exemplo, a ocorrência está na rota 33 e as equipes disponíveis e equipadas estão nas rotas 35, 1 e 17, tem-se que os correspondentes custos são, respectivamente: $c(35, 33) = 6$; $c(1, 33) = 5$; $c(17, 33) = 5$. Assim, escolhe-se entre as equipes 1 ou 17 que apresentam o mesmo custo. Se a equipe da rota 1 for escolhida, tem-se que o trajeto entre as rotas 1 e 33 é definido pelas seguintes rotas: 1-5-8-40-42-33.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a otimização da logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica. A metodologia é composta por duas técnicas da área de Pesquisa Operacional: um modelo matemático de Programação Linear Inteira e o Algoritmo de Floyd.

O modelo matemático otimiza o número de equipes necessárias e seus conseqüentes custos para atender aos serviços comerciais (com e sem impedimentos) e emergenciais. Este modelo pode ser aplicado a cada cidade, agência, setor, rota ou, ainda, a seus grupos (duas ou mais agências, por exemplo) e às equipes trabalhando, ininterruptamente, nos mais diversos turnos como, por exemplo, 4, 5, 6, 7, 8 horas. Ainda, o modelo pode ser elaborado de formas variadas como, diariamente, semanalmente, mensalmente, separando-se finais de semana e feriados e outros que se façam necessário.

O algoritmo de Floyd, por sua vez, define as matrizes de custos e de trajetos entre um conjunto de nós (centróides de cada rota de leitura), considerando as ligações entre os mesmos. Desta forma, tem-se como despachar de forma ótima, as equipes às ocorrências. Pode-se, inclusive, obter-se as matrizes de custos e trajetos preliminarmente aos despachos, considerando diversos horários do dia, penalizando ora alguns trechos, ora, outros, dependendo do tráfego horário de uma forma geral. Assim, dada uma determinada ocorrência, em um determinado horário, basta fazer a leitura das correspondentes matrizes.

Para uma melhor compreensão das técnicas propostas, todo o trabalho foi desenvolvido levando-se em consideração os dados da agência do Portão, pertencente à regional de Curitiba, que contém sete setores e 48 rotas e para a qual foi feito um levantamento de dados no decorrer do mês de outubro de 2004. No modelo matemático são considerados turnos de 4, 6 e 8 horas para as equipes, para o mês todo e, além disso, a necessidade de equipes a cada intervalo de hora através dos registros históricos dos tempos de atendimento. São apresentadas duas simulações, sendo que em ambas, a solução ótima é de 15 equipes (lembrando que o número utilizado na ocasião era de 18 equipes) as quais devem ser distribuídas entre os setores, proporcionalmente ao número de ocorrências em cada um deles.

Com relação ao algoritmo de Floyd, conforme já mencionado, tem-se uma forma de obter o despacho das equipes às ocorrências de forma otimizada. Nas situações em que ocorrem duas ou mais ocorrências simultaneamente, devido a tempestades e/ou outras causas, faz-se a leitura das matrizes de Floyd correspondentes ao horário em questão e o despacho ocorre em seqüência, de acordo com a prioridade de cada ocorrência (hospitais, maior número de consumidores e outros).

Como conseqüência da aplicação desta metodologia, espera-se obter melhores índices de qualidade junto à COPEL e à ANEEL e uma maior satisfação por parte dos usuários da energia elétrica.

AGRADECIMENTOS:

Este trabalho é parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da COPEL que está sendo desenvolvido em parceria com a UFPR e LACTEC. Agradecemos aos engenheiros Cleverson L. da Silva Pinto e Nereu de Azevedo, da COPEL e ao engenheiro M. Klimkoski, do LACTEC pelo fornecimento de dados e esclarecimento dos procedimentos atuais.

REFERÊNCIAS

AHUJA, R.K.; MAGNANTI, T.L. e ORLIN, J.B. **Networks flows - theory, algorithms and applications.** . Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1993. p.

AOKI, A. R. **Sistema multi-agente para o atendimento de ocorrências na rede de distribuição de energia elétrica.** VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Baurú, Brasil, 2003. p.

AZONI, E.G.; KLOSTER, J.M. e AZEVEDO, N. **Relatórios de serviços** Divulgação Interna da COPEL. COPEL. Curitiba, Brasil. 2004

BARBOZA, A.O.; CARNIERI, C.; ARNS STEINER, M.T. e SIQUEIRA, P. Técnicas da pesquisa operacional na otimização de horários de atendentes em centrais telefônicas. **Gestão & Produção**, v.10, n.1, p.109-127. 2003.

CAPRARA, A.; MONACI, M. e TOTH, P. Models and algorithms for staff scheduling problems. **IV ALIO/EURO Workshop, Abstracts Applied Combinatorial Optimization.** Pucón, Chile 2002.

CARNIERI, C. e ARNS STEINER, M.T.A. A System for bus drivers scheduling. **Euro XV / XXIV Inform.** Barcelona, Espanha 1997.

COSTA, EINHARDT DA SILVA **Aplicação de técnicas de pesquisa operacional na determinação de setores de atendimento em uma concessionária de energia.** Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Brasil, 2005.

GAMACHE, M.; SOUMIS, F.; MARQUIS, G. e DESROSIERS, J A Column generations approach for large-scale aircrew rostering problems. **Operations Research**, v.47, n.2, p.247-263. 1999.

GRAVES, G.W.; MCBRIDE, R.D.; GERSHKOFF, I.; ANDERSON, D. e MAHIDHARA, D. Flight crew scheduling. **Management Science**, v.39, n.6, p.736-745. 1993.

HOFFMAN, K.L. e PADGERG, M. Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut. **Management Science**, v.39, n.6, p.657-683. 1993.

JAUMARD, B.; SEMET, F. e VOVOR, T. A generalized linear programming model for nurse scheduling. **European Journal of Operational Research**, v.107, p.1-18. 1998.

KWAN, A.S.K.; KWAN, R.S.K.; PARKER, M.E. e WREN, A. **Proving the versatility of automatic driver scheduling on difficult train & bus problems.** Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT) Berlin, Germany, 2000. p.

LAPIN, L. . **Quantitative methods for business decisions with cases.** New York, USA: Harcourt Brace Jovanivich Publishers, 1994. p.

MURTY, K. **Linear and Combinatorial Programming.** Malabar, Florida, USA: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985. p.

ROUSSEAU, J.M. **Scheduling Regional Transportation with Hastus**. Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT) Berlin, Germany, 2000. p.

SIQUEIRA, P.H.; CARNIERI, C.; ARNS STEINER, M.T. e BARBOZA, A. Uma proposta de solução para o problema da construção de escalas de motoristas e cobradores de ônibus através do algoritmo do matching de peso máximo. **Gestão & Produção**, v.11, n.2, p.187-196. 2004.

TAKEDA, R.A.; WIDMER, J.A. e MORABITO, R. Aplicação de modelo hipercubo de filas para avaliar descentralização de ambulâncias de um sistema urbano de atendimento médico de urgência. **Pesquisa Operacional**, v.24, n.1, p.39-71. 2004.

THOMPSON, G. M. Assigning telephone operators to shifts at new brunswick telephone company. **Interfaces**, v.27, July-August, p.1-11. 1997.

WREN, A. e GUALDA, N.D.F. . Integrated scheduling of buses and drivers. **Research Report Series**. Studies, School of Computer. Leeds University of Leeds 1997.

Operations research techniques applied to service center logistics in power distribution users

Maria Teresinha Arns Steiner¹, tere@mat.ufpr.br

Clarice Einhardt da Silva Costa, clarices@copel.com

Deise Maria Berthodi Costa², deise@ufpr.br

Élsio Andretta Filho, elsio@mat.ufpr.br

Vóldi C.Zambenedetti³, voldi@lactec.org.br

¹Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná

²Departamento de Desenho, Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia

³Instituto Tecnológico para o Desenvolvimento – LACTEC
Curitiba, Paraná, Brasil

**Received: November, 2006 / Accepted: December, 2006*

RESUMO

This paper deals with the optimization for the logistics regarding services demanded by users of power distribution lines, served by the Portão office, located in Curitiba, PR, Brazil, and operated by COPEL (Paranaense Power Company). Through the use of Operations Research techniques, an Integer Programming Mathematical model and Floyd Algorithm, a method was defined to determine in an optimized way, the number of teams needed by the selected office, as well as, the optimized assignment for the teams to the sites in need, in order to offer efficient services to the users and, besides that, the immediate execution on emergencies and, as to the other services, accordingly to parameters set by the National Power Agency together with COPEL. The methodology hereby presented is generic, so that it could be applied to any power network (or any of its lines), and it has presented very satisfactory results to the case in analysis.

Keywords: Number and Assignment of the Teams; Services Logistic Optimization; Integer Programming; Floyd Algorithm.
