

UMA HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE DESPACHO DINÂMICO DE EQUIPES APLICADA NA LOGÍSTICA DE RESPOSTA EMERGENCIAL DE UMA CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Francisco Régis Abreu Gomes (UFC)
regis@glen.ufc.br

Bruno de Athayde Prata (FEUP)
bruno.prata@fe.up.pt

Giovanni Cordeiro Barroso (UFC)
gcb@fisica.ufc.br

João Bosco Furtado Arruda (UFC)
barruda@glen.ufc.br



A logística de resposta emergencial de uma concessionária de energia elétrica gerencia as operações envolvidas na normalização do fornecimento de energia elétrica. A ocorrência das incidências é distribuída aleatoriamente no tempo e no espaço, com diferentes graus de severidade. A natureza dinâmica da ocorrência das incidências dificulta o processo de otimização do despacho das equipes aos locais das incidências. Este trabalho apresenta uma heurística desenvolvida para realizar o processo de despacho, fornecendo ao cliente a previsão do horário de resposta. A heurística proposta reseqüencia o atendimento das incidências para reduzir o tempo de deslocamento, respeitando uma tolerância para adiantamento e atraso em relação à previsão inicial. A comparação da heurística proposta com a regra de despacho atual da concessionária estudada mostra que o tempo de normalização pode ser reduzido com a adoção da heurística proposta.

Palavras-chaves: Logística de resposta emergencial, regra de despacho, heurística

1. Introdução

A logística de resposta emergencial diz respeito às situações nas quais são designadas equipes para tarefas usualmente relacionadas com as seguintes eventualidades: atendimento médico por ambulâncias, policiamento ou segurança privada, controle de incêndios pelo corpo de bombeiros e restauração de redes de infra-estrutura básica (energia, água e telecomunicações).

A interrupção no fornecimento de energia elétrica é um dos principais critérios usados para avaliar a qualidade do serviço de uma concessionária de energia elétrica. No Brasil, conforme a resolução N°024 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a qualidade relacionada à continuidade no fornecimento de energia elétrica é medida pelos indicadores: DEC (duração da interrupção) e FEC (número de clientes afetados) (ANEEL, 2008).

Para lidar com as interrupções no fornecimento de energia elétrica, as concessionárias mantêm um Serviço de Atendimento Emergencial (SAE). Segundo Zografos *et al.* (1993) os objetivos desse SAE são: minimizar o tempo de normalização, uniformizar o nível de serviço para todas as zonas cobertas e manter as Equipes de Atendimento Emergencial (EAE) com carga de trabalho balanceada.

Segundo Zografos *et al.* (1998) existem três maneiras de reduzir a indisponibilidade do fornecimento de energia elétrica: reduzir a frequência da interrupção, reduzir o número de clientes afetados pela interrupção e reduzir a duração da interrupção. As duas primeiras maneiras estão relacionadas ao projeto e à manutenção da rede de distribuição de energia elétrica. A terceira maneira está relacionada ao SAE e envolve: o dimensionamento do número de EAE, o dimensionamento das áreas de cobertura, a localização das EAE na área de cobertura e a regra de despacho utilizada.

Weintraub *et al.* (1999) abordaram a logística de resposta emergencial da concessionária de energia elétrica da cidade de Santiago, capital do Chile. Nesse trabalho foi desenvolvida uma heurística para gerar as rotas das EAE, incorporando a previsão de possíveis futuras incidências para efetuar sua distribuição às EAE. Aoki *et al.* (2003) utilizaram a técnica multi-agentes na logística de resposta emergencial da Companhia Energética de Brasília (CEB), onde foi desenvolvida uma metodologia para determinar a "melhor" EAE e o "melhor" caminho que esta deveria efetuar para atender a uma incidência.

Steiner *et al.* (2006) aplicaram duas técnicas de otimização na logística de atendimento ao usuário da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL). A primeira técnica foi um modelo matemático de programação linear inteira para otimizar o número de equipes necessárias para atender aos serviços comercial e emergencial. A segunda técnica foi o algoritmo de caminho mínimo de Floyd, que define as matrizes de custos e de trajetos entre o conjunto de centróides de cada rota de leitura.

A Companhia de Energética do Ceará (COELCE) é a concessionária que administra a rede de distribuição de energia elétrica no estado do Ceará. Recentemente começou a utilizar técnicas de georreferenciamento para a localização das EAE e das incidências, para transmitir as ordens de restauração do sistema diretamente do *call center* para as EAE, como forma de melhorar o desempenho do seu SAE. Além disso, adotou a política de fornecer a previsão do horário de resposta, horário que uma EAE chegará ao local da incidência. Essa política, embora satisfazendo a necessidade do cliente, reduz a possibilidade de otimizar o processo de

despacho das EAE e devido à dinâmica do sistema ocorre uma grande diferença entre a previsão fornecida ao cliente e o horário de resposta executado na prática.

Problemas de otimização do mundo real são frequentemente dinâmicos, i.e., mudam com o passar do tempo. Podem-se citar como exemplos o roteamento de veículos (SAVELSBERGH, 1998) e o seqüenciamento de tarefas (BRANKE & MATTFELD, 2005). Esses problemas são de difícil otimização porque a sua solução é feita em um determinado instante no tempo, em que são desconhecidas as mudanças que ocorrerão no futuro e que interferirão na qualidade da solução. O problema de despacho de EAE é dinâmico devido à distribuição aleatória das incidências no espaço e no tempo. Prova disso, no ano de 2007, 56% das incidências despachadas na cidade de Fortaleza precisaram ser re-despachadas, por causa de mudanças ocorridas depois da previsão do horário de resposta.

Heurística é uma técnica que busca encontrar boas soluções, próximas do ótimo, com custo computacional razoável, sem ser capaz de garantir a viabilidade ou obtenção da solução ótima, mas em muitos casos a solução encontrada é viável (REEVES & BEASLEY, 1995). A heurística foi a técnica escolhida porque é preciso fornecer ao cliente a previsão do horário de resposta atendimento da incidência em poucos segundos.

O objetivo desse trabalho é apresentar uma heurística para realizar conjuntamente os processos de previsão do horário de resposta e o re-seqüenciamento da ordem de atendimento das incidências antigas com vista a reduzir o deslocamento das EAE e, conseqüentemente, o tempo de normalização do sistema. A heurística proposta será denominada de Heurística de Previsão e Re-Seqüenciamento (HPRS).

Este trabalho está organizado como segue. Na Seção 2 são apresentadas a descrição do problema e a análise da regra de despacho atual. Na Seção 3 descreve-se a heurística desenvolvida para abordar o problema. Na Seção 4 são apresentados os resultados dos experimentos computacionais realizados na resolução de problemas gerados através de distribuições estatísticas ajustadas a partir do conhecimento do SAE da concessionária estudada. E finalmente, na Seção 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. Problema de despacho de equipes em um SAE

2.1 Descrição do problema

A demanda do Serviço de Atendimento Emergencial (SAE) é criada pela ocorrência de incidências causadas pela interrupção no fornecimento de energia elétrica. Essas incidências ocorrem aleatoriamente no tempo e no espaço, possuindo graus de severidade diferentes, não podendo ser previstas com antecedência. Às incidências de maior severidade atribui-se maior prioridade e devem ser atendidas antes que as de menor severidade. A quantidade de incidências é variável de acordo com o horário do dia, com o dia da semana e a estação do ano. Há os dias considerados atípicos, provocados por tempestades ou vendavais em que o número de incidências é muito maior que a média.

Normalmente, a região de cobertura é dividida em sub-regiões para facilitar o gerenciamento do SAE. As Equipes de Atendimento Emergencial (EAE) são distribuídas pelas áreas de cobertura de acordo com a quantidade de incidências a serem atendidas. Quando existe mais de uma EAE em uma sub-zona é preciso usar uma regra de designação para escolher qual das EAE atenderá a nova incidência. A regra de designação considerada nesse trabalho consiste em designar a EAE que tiver o menor horário de atendimento da última incidência mais o tempo de deslocamento para a nova incidência. Depois da designação da EAE, o horário de

reposta é calculado a partir do horário de normalização da penúltima incidência designada mais o tempo de deslocamento para a nova incidência. Atribui-se um tempo médio para a execução da normalização da incidência que, adicionado ao horário de resposta, fornece o horário de normalização. Na Figura 1 é apresentada uma linha de tempo dos principais eventos considerados no problema.

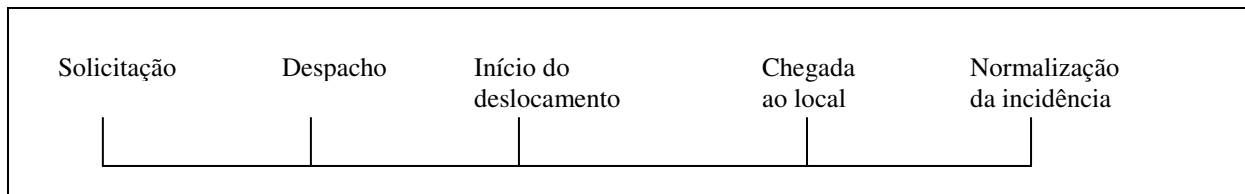


Figura 1 – Eventos considerados no problema de despacho das EAE.

Devido ao problema ser dinâmico, ou seja, os diferentes graus de severidade que podem ter as incidências e sua ocorrência aleatória no tempo e no espaço, isso implica que uma seqüência de atendimento é alterada para atender uma incidência de maior severidade. Assim o cliente recebe uma previsão que deve ser cumprida, mas que para o SAE é uma previsão inicial que pode ser alterada pela dinâmica do sistema. Dessa alteração na seqüência de atendimento, as incidências de menor prioridade são atendidas depois da nova incidência de maior prioridade, ficando dessa forma atrasadas em relação à previsão anterior. Outra consequência da alteração da previsão inicial é que as distâncias percorridas pelas EAE podem ser maiores que o previsto inicialmente. A partir disso, pode-se enunciar os três objetivos desse problema e que devem ser cumpridos hierarquicamente:

1. Atender às incidências de maior prioridade.
2. Minimizar o desvio entre a previsão inicial e a previsão final do horário real de resposta.
3. Minimizar as distâncias percorridas pelas EAE.

2.2 Análise da regra de despacho atual do SAE da concessionária

O caso estudado é o da cidade de Fortaleza, no estado do Ceará. A cidade é dividida em quatro zonas, denominadas de Distrito de Fortaleza (DF). Em cada DF são alocadas as EAE disponíveis para atender ao atual número de incidências. As incidências chegam por telefone a partir do cliente ao *call center*, onde a ordem de restauração é gerada. Cada incidência recebe uma prioridade que varia de 0 a 5 (quanto menor o número atribuído maior a prioridade).

Para evitar que incidências de baixa prioridade fiquem esperando muito tempo por atendimento devido à chegada de incidências de maior prioridade, a prioridade das incidências é atualizada dinamicamente por dois motivos: ligação de um cliente após o vencimento da previsão inicial ou incidência esperando mais de duas horas por atendimento.

A seqüência de atendimento das incidências é determinada pela regra de despacho “primeiro que chega, primeiro que sai” (*first in, first out* – FIFO). Essa regra de despacho possui as seguintes deficiências para cumprir os objetivos do SAE:

- Não antecipa o atendimento das incidências de maior prioridade quando existem

incidências de menor prioridade em espera.

- Não considera a possibilidade de mudança da seqüência de atendimento das incidências com vista a minimizar as distâncias percorridas pelas EAE.

Com isso a diferença entre a previsão inicial do horário de resposta e o que é executado na prática é grande e ao mesmo tempo as distâncias percorridas pelas EAE para atender as incidências podem ser maiores que o mínimo possível.

3. Heurística de previsão e re-sequenciamento

A estratégia da Heurística de Previsão e Re-Sequenciamento (HPRS), aqui proposta, é inserir a nova incidência no grupo de incidências com mesma prioridade, re-sequenciando-as de forma que seja encontrada uma seqüência de atendimento, com distâncias percorridas pelas EAE menores que a obtida simplesmente inserido a nova incidência no fim da fila de espera. Para respeitar a necessidade de atender às incidências de maior prioridade antes das de menor prioridade, a regra de despacho FIFO considerada nesse trabalho insere a nova incidência no fim da fila das incidências de mesma prioridade, invés de inserir no fim da fila de todas as incidências.

A heurística HPRS inicialmente insere a nova incidência na mesma posição que seria inserida pela regra de despacho FIFO. Dessa forma as incidências ficam agrupadas por prioridade e as de maior prioridade são atendidas antes que as de menor prioridade. Depois é executada a regra de designação para determinar qual EAE atenderá à nova incidência fornecendo uma previsão temporária do horário de resposta da nova incidência. Se houver incidências de menor prioridade em espera, a previsão do horário de resposta dessas deverá ser refeito, ocorrendo que as suas previsões atuais serão atrasadas em relação às previsões iniciais. Até esse ponto o primeiro objetivo do SAE é cumprido.

Para atender ao terceiro objetivo do SAE, ou seja, encontrar uma seqüência de atendimento das incidências com deslocamento menor que a seqüência atual é executado um algoritmo de busca local em cada grupo de incidências que possuem a mesma prioridade. A busca local é implementada através de um algoritmo *Steepest Descent* (SD) que consiste em executar todos os movimentos v de uma vizinhança Z e no momento que uma solução melhor que a atual é encontrada, reiniciar a busca do ponto inicial. Se toda a vizinhança é pesquisada e nenhuma solução melhor que a atual é encontrada, significa que a solução atual é um ótimo local para a vizinhança Z , então a execução da busca local é encerrada. No algoritmo SD foi utilizado o movimento *shift* (inserção) que é mostrado na Figura 2. O movimento *shift* seleciona a incidência da posição i_1 e a insere na posição da incidência i_2 , obrigando que as incidências entre i_1 até i_2 e incluindo essa, sejam deslocadas no sentido de i_1 , com $1 \leq i_1 \leq n$, $1 \leq i_2 \leq n$, $i_1 \neq i_2$, $i_1 - 1 \neq i_2$, em que n é o número de incidências de cada grupo de prioridade. O movimento v é definido pelo seguinte par de incidências $v = (i_1, i_2)$. A vizinhança é composta pelo conjunto de movimentos $Z = \{ (i_1, i_2) \mid i_1, i_2 \in \{1, 2, \dots, n\}, i_2 \notin \{i_1, i_1-1\} \}$ de cardinalidade $(n - 1)^2$, em que a condição $i_2 \notin \{i_1, i_1-1\}$ evita a redundância de movimentos.

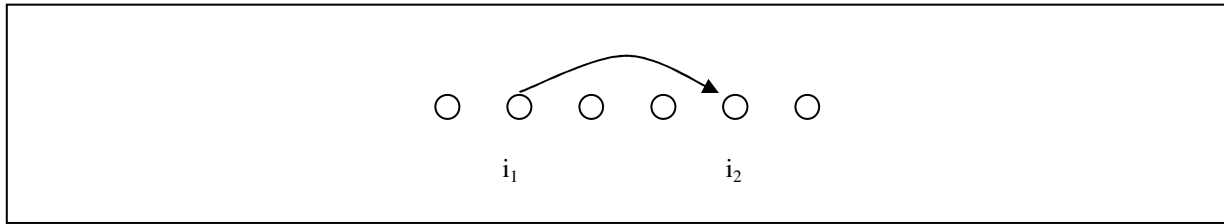


Figura 2 – Representação do movimento *shift*.

Para que o segundo objetivo seja atendido, ou seja, o desvio entre a nova previsão e a previsão inicial não seja muito grande, foram criados dois parâmetros de controle que são: o Tempo de adiantamento máximo (E_{max}) que é o maior adiantamento tolerado entre a nova previsão e a previsão inicial; e o Tempo de atraso máximo (T_{max}) que é o maior atraso tolerado entre a nova previsão e a previsão inicial. A cada movimento do algoritmo SD é calculado a Distância Percorrida Total (DPT^*) da nova seqüência. Se esta é menor que a Distância Percorrida Total da seqüência inicial (DPT_0), verifica-se para todas as i incidências do mesmo grupo que tiveram uma nova previsão, qual o desvio em minutos ΔP_i entre a previsão inicial e a nova previsão. Se o atraso for menor que T_{max} ou o adiantamento for menor que E_{max} , então a nova seqüência é aceita como seqüência atual, se não, o processo de busca continua. Quando o algoritmo SD executa todos os movimentos e nenhuma seqüência melhor é encontrada a busca local é encerrada. A previsão temporária da nova incidência é substituída pela previsão inicial e são apresentadas as novas previsões das incidências alteradas. Na Figura 3 são apresentados resumidamente todos os passos da heurística HPRS.

- Passo 1:** Executar a regra de despacho FIFO para determinar a seqüência de atendimento inicial.
Passo 2: Executar a regra de designação para a nova incidência.
Passo 3: Se existir incidências de menor prioridade na fila de espera, calcular as novas previsões dessas.
Passo 4: Executar uma busca local para cada sub-conjunto de incidências da fila de espera.
 - Se os critérios de aceitação forem atendidos:
 - $DPT^* < DPT_0$, e $T_{max} \geq \Delta P_i \leq E_{max}$.
 - Então a nova seqüência de atendimento substitui a seqüência de atendimento inicial.
Passo 5: Mostrar a previsão da nova incidência que é considerada como a previsão inicial e se necessário as novas previsões das incidências antigas.

Figura 3 – Os passos da heurística HPRS.

Na Figura 4 é ilustrado um exemplo de seqüência de atendimento de três incidências hipotéticas, as coordenadas x e y estão apresentadas dentro dos parênteses, à esquerda é mostrada a seqüência de atendimento quando é usada a regra de despacho FIFO e à direita quando é usada a heurística HPRS. A velocidade utilizada nesse exemplo foi 30km/h e o tempo de execução de 30 minutos. Considerando as distâncias euclidianas entre as incidências, na Tabela 1 são mostradas as distâncias percorridas para atender às três incidências, utilizando os dois métodos. Utilizando a regra de despacho FIFO a distância total percorrida foi de 35km e usando a heurística HPRS a distância total percorrida foi de 33,69km. A redução na distância percorrida pela EAE com a utilização da heurística HPRS foi de 1,31km ou 3,74%.

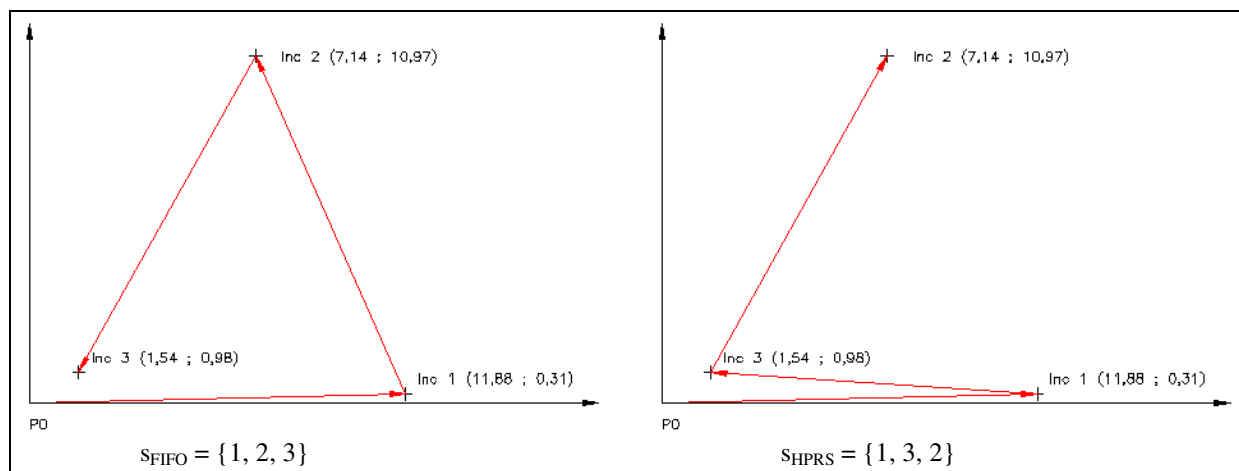


Figura 4 – Sequência de atendimento conforme a política de despacho FIFO (à esquerda) e sequência de atendimento conforme a heurística HPRS (à direita).

Algoritmo	Origem	Destino	Distância (km)
FIFO	P ₀	Inc 1	11,88
	Inc 1	Inc 2	11,67
	Inc 2	Inc 3	11,45
	Total		35,00
HPRS	P ₀	Inc 1	11,88
	Inc 1	Inc 3	10,36
	Inc 3	Inc 2	11,45
	Total		33,69

Tabela 1 – Resultados da sequência de três incidências usando a regra de despacho FIFO e a heurística HPRS.

Na Tabela 2 são apresentadas a previsão inicial e a previsão final das três incidências do exemplo. Nota-se que apenas a previsão da incidência 2 foi alterada, uma vez que a previsão da incidência 3 já foi realizada considerando a real posição dela na sequência de atendimento.

Incidência	Previsão inicial (h)	Previsão final (h)	ΔP_i
1	00:36	00:36	00:00
2	01:29	02:18	00:49
3	01:26	01:26	00:00

Tabela 2 – Previsões fornecidas pela heurística HPRS.

4. Experimentação computacional

Para verificar e analisar o desempenho da heurística HPRS vários experimentos foram realizados. A falta de dados fidedignos e no formato necessário obrigou a realizar os testes com instâncias geradas aleatoriamente. Nesses experimentos as incidências possuem os seguintes atributos: hora da ocorrência, localização (x, y), zona e prioridade. Os atributos das EAE são: horário de entrada, horário de saída, localização inicial, incidências designadas. Os resultados fornecidos pela heurística HPRS são: a EAE designada e as previsões dos horários do início do deslocamento da EAE, da localização, e da normalização.

Nesse tipo de sistema, a taxa de chegada pode ser considerada como um processo *poissoniano* e o intervalo de tempo entre incidências consecutivas regido por uma distribuição exponencial negativa (TAKEDA *et al.*, 2004). Baseado no conhecimento do SAE da concessionária, o dia foi dividido em quatro intervalos de 6 horas cada, para cada intervalo foi atribuído um número médio de incidências diárias de maior severidade (prioridade 0) e menor severidade (prioridade 1) como mostrado na Tabela 3..

Intervalos do dia (h)	Maior severidade	Menor severidade
0 - 5	01	01
6 - 11	04	20
12 - 17	02	06
18 - 23	01	05

Tabela 3 – Médias de número de incidências usadas na geração das instâncias.

Para gerar as coordenadas (x, y) das incidências foi utilizada uma distribuição uniforme. Foram consideradas duas zonas de atendimento com os seguintes intervalos: zona 1, $x = [0, 10]$ e $y = [0, 10]$; zona 2, $x = [10, 20]$ e $y = [0, 10]$. A quantidade de EAE utilizadas foram a seguinte: 01 (uma) EAE de 0h às 7h e 02 (duas) EAE de 8h às 23h alocadas nas duas zonas.

Geraram-se várias incidências diárias para as zonas 1 e 2 baseados nos dados da Tabela 3 e usando as distribuições de probabilidade mencionadas. As incidências de uma mesma execução são chamadas de instâncias *inc*. Foram escolhidas 45 instâncias divididas em 3 grupos de 15 instâncias cada, de acordo com os seguintes intervalos: 21 a 30, 31 a 40 e 41 a 50 incidências, respectivamente. O objetivo desses três grupos é analisar o desempenho da heurística HPRS em dias típicos e atípicos.

Os valores de E_{max} e T_{max} foram fixados em 120min. O tempo de execução adotado foi de 30min. A velocidade do veículo da EAE foi adotada em 30km/h.

Para comparar as soluções geradas pela regra de despacho FIFO e pela heurística HPRS são usados os seguintes indicadores:

- Tempo Médio de Deslocamento (TMD): é a média do tempo de deslocamento de todas as EAE para atendimento de todas as incidências de uma mesma instância.
- Tempo Médio de Resposta (TMR): é a média do tempo de resposta para todas as incidências de uma instância.
- Tempo de adiantamento médio (Emed): é a média dos adiantamentos ocorridos no atendimento das incidências de uma instância.
- Tempo de atraso médio (Tmed): é a média dos atrasos ocorridos no atendimento das incidências de uma instância.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados do TMD e do TMR para a regra de despacho FIFO e a heurística HPRS, bem como o desvio percentual Dif que é calculado a partir dos resultados dos métodos da seguinte forma: $100 * (HPRS - FIFO) / FIFO$. Na Tabela 4, a coluna um representa a identificação da instância, a coluna dois a quantidade de incidências, a coluna três o TMD obtido pela regra de despacho FIFO, a coluna quatro o TMD obtido pela heurística HPRS, a coluna cinco o desvio percentual Dif obtido para o TMD, a coluna seis o TMR obtido pela regra de despacho FIFO, a coluna sete o TMA obtido pela heurística HPRS, e finalmente a coluna oito representa o desvio percentual Dif obtido para o TMR.

A partir da análise dos resultados mostrados na Tabela 4 podem-se fazer as seguintes considerações:

- Nas instâncias inc01, inc06, inc10 não houve redução do TMD e do TMR, isto devido ao número de incidências em espera ser pequeno, o que reduz a possibilidade de redução que poderia ser obtida pela utilização da heurística HPRS. Lembrando que isso ocorre porque o número de incidência diário foi pequeno.
- Em todas as outras 42 instâncias foram observadas melhorias no TMD e TMR pela utilização da heurística HPRS. A maior redução no TMD foi na instância inc035, igual a -34,59%, e na mesma instância ocorreu a maior redução no TMR, igual a -43,96%.
- Observa-se que quando maior o número de incidências, maior é a redução obtida no TMD e no TMR pela utilização da heurística HPRS. Isso porque o número de incidências na fila de espera é maior, dificultando à regra de despacho FIFO gerar boas seqüências de atendimento. Os resultados das previsões das incidências do primeiro grupo tiveram uma redução de -5,17% e -4,81%, no TMD e TMR, respectivamente. Os resultados das previsões das incidências do segundo grupo tiveram uma redução de -13,50% e -15,41%, no TMD e TMR, respectivamente. E finalmente, os resultados das previsões das incidências do terceiro grupo tiveram uma redução de -19,11% e -24,76%, no TMD e no TMR, respectivamente. A redução média total foi de -12,59% e -14,99%, no TMD e no TMR, respectivamente.

Instância	Quant. Inc	TMD			TMR		
		FIFO	HPRS	Dif	FIFO	HPRS	Dif
Inc01	21	12,00	12,00	0,00%	16,00	16,00	0,00%
Inc02	23	14,09	12,26	-12,99%	29,00	27,39	-5,55%
Inc03	23	11,83	10,78	-8,88%	18,70	17,22	-7,91%
Inc04	23	12,04	11,57	-3,90%	35,70	33,96	-4,87%
Inc05	23	15,83	15,39	-2,78%	19,78	19,35	-2,17%
Inc06	23	12,78	12,78	0,00%	14,13	14,13	0,00%
Inc07	24	11,83	11,63	-1,69%	31,67	31,04	-1,99%
Inc08	26	17,27	16,62	-3,76%	35,50	34,19	-3,69%
Inc09	27	12,63	12,56	-0,55%	22,07	21,93	-0,63%
Inc10	27	12,96	12,96	0,00%	14,63	14,63	0,00%
Inc11	28	17,93	16,04	-10,54%	34,64	30,43	-12,15%
Inc12	29	17,79	15,90	-10,62%	32,59	29,66	-8,99%
Inc13	29	9,66	9,07	-6,11%	28,48	25,28	-11,24%
Inc14	30	14,43	13,13	-9,01%	27,57	25,80	-6,42%
Inc15	30	10,37	9,67	-6,75%	35,77	33,43	-6,54%
Média				-5,17%			-4,81%
Inc16	31	9,32	7,90	-15,24%	28,84	26,29	-8,84%
Inc17	31	15,35	14,26	-7,10%	42,13	37,00	-12,18%
Inc18	32	12,66	11,41	-9,87%	29,69	27,97	-5,79%
Inc19	34	11,15	10,32	-7,44%	49,35	44,47	-9,89%
Inc20	34	15,94	14,97	-6,09%	53,53	51,26	-4,24%
Inc21	35	13,43	10,69	-20,40%	69,60	50,17	-27,92%
Inc22	35	14,51	11,91	-17,92%	88,09	72,86	-17,29%
Inc23	36	12,69	12,42	-2,13%	58,42	56,58	-3,15%
Inc24	37	14,35	13,32	-7,18%	39,95	36,30	-9,14%
Inc25	38	15,66	12,76	-18,52%	83,55	66,74	-20,12%
Inc26	38	11,16	10,45	-6,36%	48,29	36,71	-23,98%

Inc27	39	14,13	11,36	-19,60%	49,82	33,21	-33,34%
Inc28	39	10,49	8,56	-18,40%	36,31	30,74	-15,34%
Inc29	40	11,35	8,68	-23,52%	164,35	135,30	-17,68%
Inc30	40	12,72	9,82	-22,80%	77,30	60,13	-22,21%
Média				-13,50%			-15,41%
Instância	Quant. Inc	TMD			TMR		
		FIFO	HPRS	Dif	FIFO	HPRS	Dif
Inc31	41	16,66	12,29	-26,23%	145,88	111,83	-23,34%
Inc32	42	12,95	8,93	-31,04%	91,62	63,57	-30,62%
Inc33	42	15,24	11,02	-27,69%	57,29	41,67	-27,26%
Inc34	43	15,72	13,42	-14,63%	69,79	41,77	-40,15%
Inc35	44	16,16	10,57	-34,59%	138,43	77,57	-43,96%
Inc36	44	13,45	11,34	-15,69%	83,84	72,48	-13,55%
Inc37	45	14,87	11,89	-20,04%	101,47	78,87	-22,27%
Inc38	45	10,93	9,84	-9,97%	65,80	53,27	-19,04%
Inc39	47	14,45	12,6	-12,80%	114,7	96,28	-16,06%
Inc40	47	14,47	14,00	-3,25%	52,32	43,47	-16,92%
Inc41	48	13,08	10,40	-20,49%	64,48	48,77	-24,36%
Inc42	49	15,59	11,02	-29,31%	141,27	93,41	-33,88%
Inc43	49	13,94	11,90	-14,63%	98,37	72,96	-25,83%
Inc44	50	16,22	14,04	-13,44%	77,12	64,10	-16,88%
Inc45	50	15,18	13,24	-12,78%	59,98	49,64	-17,24%
Média				-19,11%			-24,76%
Média total				-12,59%			-14,99%

Tabela 4 – TMD e TMR das incidências usando a regra de despacho FIFO e a heurística HPRS.

Como já mencionado, para a heurística HPRS obter a melhoria do TMD e TMR, é preciso alterar a seqüência de atendimento das incidências, o que altera a previsão inicial. Por isso, foi estabelecida uma tolerância para os adiantamentos e atrasos que podem ser realizados. Na Tabela 5 são mostrados os resultados do Emed, Emax, Tmed e Tmax para as 45 instâncias experimentadas pelos dois métodos. Na Tabela 5, a coluna um representa a identificação da instância, a coluna dois a quantidade de incidências e as demais colunas representam, respectivamente, o Emed, Emax, Tmed, Tmax e a diferença Dif entre os indicadores anteriores obtidos para os métodos FIFO e HPRS.

Da análise dos resultados mostrados na Tabela 5 podem-se fazer as seguintes considerações:

- O maior Emed foi 48,40min na instância inc042 e o maior Tmed foi 65,69min na instância inc037, ficando assim dentro das tolerâncias estabelecidas de 120min.
- O maior Emax foi de 104min na instância inc39, i.e, dentro da tolerância. O maior Tmax foi de 179min na instância inc029 e ocorreram nove Tmax acima de 120min. As incidências com Tmax superior à tolerância se devem a essas ter tido suas previsões alteradas pela chegada de uma nova incidência de maior prioridade quando suas previsões já sofreram alteração para próxima da tolerância.
- A regra de despacho FIFO não gera adiantamentos, apenas atrasos, devido à chegada de incidências de maior prioridade que as incidências atualmente em espera.
- No primeiro grupo de instâncias a média do Tmed dos métodos FIFO e HPRS foram 6,85min e 22,94min, respectivamente, ou seja, 16,08min de atraso em média a mais para a HPRS. No segundo grupo de instâncias a média do Tmed dos métodos FIFO e HPRS foram

24,50min e 33,77min, respectivamente, ou seja, 9,28min de atraso em média a mais para a HPRS. E finalmente, no terceiro grupo de instâncias a média do Tmed dos métodos FIFO e HPRS foram 28,02min e 36,94min, respectivamente, ou seja, 8,92min de atraso em média a mais para a HPRS. O maior desvio foi de 36,94min, porém na prática é aceitável desde que se esteja reduzido o tempo de resposta das incidências, que é mostrado na Tabela 4.

- Em nove instâncias a heurística HPRS obteve Tmed menor que a regra de despacho FIFO, mostrando que a redução do tempo de deslocamento pode diminuir os atrasos.

Instância	Quant. Inc	Emed		Emax		Tmed			Tmax		
		FIFO	HPRS	FIFO	HPRS	FIFO	HPRS	Dif	FIFO	HPRS	Dif
Inc01	21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inc02	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,67	22,67	0,00	32,00	32,00
Inc03	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,00	45,00	0,00	45,00	45,00
Inc04	23	0,00	26,00	0,00	26,00	0,00	23,33	23,33	0,00	38,00	38,00
Inc05	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	6,00	0,00	6,00	6,00
Inc06	23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inc07	24	0,00	0,00	0,00	0,00	31,60	45,60	14,00	56,00	90,00	34,00
Inc08	26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,00	38,00	0,00	38,00	38,00
Inc09	27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,00	8,00	0,00	8,00	8,00
Inc10	27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inc11	28	0,00	0,00	0,00	0,00	22,00	22,50	0,50	30,00	31,00	1,00
Inc12	29	0,00	0,00	0,00	0,00	8,33	8,60	0,27	19,00	24,00	5,00
Inc13	29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,67	18,67	0,00	64,00	64,00
Inc14	30	0,00	0,00	0,00	0,00	18,67	61,00	42,33	24,00	88,00	64,00
Inc15	30	0,00	20,00	0,00	30,00	22,20	44,67	22,47	40,00	106,00	66,00
Média		0,00	3,07	0,00	3,73	6,85	22,94	16,08	11,27	38,00	26,73
Inc16	31	0,00	39,00	0,00	39,00	0,00	19,20	19,20	0,00	65,00	65,00
Inc17	31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,00	38,00	0,00	89,00	89,00
Inc18	32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,50	22,50	0,00	37,00	37,00
Inc19	34	0,00	21,00	0,00	32,00	27,33	18,33	-9,00	46,00	74,00	28,00
Inc20	34	0,00	3,00	0,00	3,00	36,88	58,75	21,87	60,00	150,00	90,00
Inc21	35	0,00	38,00	0,00	40,00	29,64	27,20	-2,44	56,00	90,00	34,00
Inc22	35	0,00	26,60	0,00	34,00	29,50	45,27	15,77	60,00	157,00	97,00
Inc23	36	0,00	37,00	0,00	37,00	72,75	44,63	-28,12	97,00	177,00	80,00
Inc24	37	0,00	0,00	0,00	0,00	18,00	26,00	8,00	53,00	42,00	-11,00
Inc25	38	0,00	43,67	0,00	67,00	45,54	53,25	7,71	87,00	145,00	58,00
Inc26	38	0,00	9,00	0,00	9,00	18,50	24,44	5,94	40,00	53,00	13,00
Inc27	39	0,00	13,00	0,00	13,00	11,00	19,78	8,78	11,00	65,00	54,00
Inc28	39	0,00	20,00	0,00	23,00	0,00	30,50	30,50	0,00	45,00	45,00
Inc29	40	0,00	22,86	0,00	34,00	52,74	39,08	-13,66	143,00	179,00	36,00
Inc30	40	0,00	40,50	0,00	43,00	25,56	39,64	14,08	39,00	97,00	58,00
Média		0,00	20,91	0,00	24,93	24,50	33,77	9,28	46,13	97,67	51,53
Inc31	41	0,00	29,20	0,00	55,00	37,79	42,40	4,61	70,00	122,00	52,00
Inc32	42	0,00	23,33	0,00	49,00	0,00	27,94	27,94	0,00	105,00	105,00
Inc33	42	0,00	54,00	0,00	54,00	31,50	18,00	-13,50	56,00	56,00	0,00
Inc34	43	0,00	65,00	0,00	80,00	0,00	31,71	31,71	0,00	88,00	88,00
Inc35	44	0,00	33,43	0,00	52,00	16,11	24,83	8,72	33,00	117,00	84,00
Inc36	44	0,00	32,90	0,00	60,00	18,40	48,08	29,68	43,00	117,00	74,00
Inc37	45	0,00	33,80	0,00	78,00	52,28	65,69	13,41	99,00	150,00	51,00
Inc38	45	0,00	38,80	0,00	70,00	40,56	34,56	-6,00	68,00	104,00	36,00

Inc39	47	0,00	48,25	0,00	104,00	48,11	57,83	9,72	77,00	166,00	89,00
Inc40	47	0,00	35,20	0,00	66,00	0,00	39,44	39,44	0,00	95,00	95,00
Inc41	48	0,00	19,00	0,00	19,00	28,50	17,87	-10,63	42,00	99,00	57,00
Inc42	49	0,00	48,40	0,00	95,00	21,73	34,60	12,87	53,00	111,00	58,00
Inc43	49	0,00	30,25	0,00	42,00	39,00	40,30	1,30	77,00	94,00	17,00
Inc44	50	0,00	29,00	0,00	29,00	40,30	39,40	-0,90	98,00	117,00	19,00
Inc45	50	0,00	48,00	0,00	48,00	46,00	31,47	-14,53	93,00	129,00	36,00
Média		0,00	37,90	0,00	60,07	28,02	36,94	8,92	53,93	111,33	57,40
Média total			20,26		28,93	19,61	31,09	11,48	36,75	81,72	44,96

Tabela 5 – Tempos de adiantamentos e atrasos obtidos pela regra de despacho FIFO e pela heurística HPRS.

5. Conclusões

Um dos principais processos de um Serviço de Atendimento Emergencial (SAE) de uma concessionária de energia elétrica é o despacho das Equipes de Atendimento Emergencial (EAE). Neste trabalho foi proposta uma heurística para realizar conjuntamente os processos de previsão do horário de resposta e o re-seqüenciamento da ordem de atendimento das incidências antigas de um SAE com vista a reduzir o deslocamento das EAE e, conseqüentemente, o tempo de normalização do sistema, denominada de Heurística de Previsão e Re-Seqüenciamento (HPRS). Foram realizados testes usando instâncias geradas por distribuições estatísticas para comparar a heurística HPRS e a regra de despacho FIFO, atualmente utilizada pelo SAE da concessionária.

Devido à chegada de incidências de maior prioridade que as incidências atualmente em espera, mesmo com a utilização da regra de despacho FIFO é preciso alterar a previsão das incidências antigas. Desse modo não é possível eliminar por completo a alteração da previsão do horário de resposta com essa técnica.

A utilização da heurística HPRS reduz o tempo de resposta quando comparada à regra de despacho FIFO. No primeiro grupo de instâncias a redução foi de -4,81%, no segundo grupo foi de -15,41% e no terceiro grupo foi de -24,76%. Para realizar essas reduções é necessário mudar a seqüência de atendimento, o que provoca adiantamentos e atrasos na última previsão em relação à previsão inicial. Os adiantamento e atraso médios foram de 3,07min e 22,94min, no primeiro grupo de instâncias, 20,91min e 33,77min, no segundo grupo e 37,90min e 36,94min no terceiro grupo. O maior desvio então foi de 37,90min, dentro da tolerância de 120min. Dessa forma, os indicadores de qualidade DEC (duração da interrupção) e FEC (número de clientes afetados) têm seus resultados melhorados e ao mesmo tempo o serviço ao cliente é mantido em um nível satisfatório.

A heurística HPRS mostrou ser mais eficiente que a regra de despacho FIFO quando é maior o número de incidências, como é o caso dos dias atípicos. A diferença entre os TMRs da heurística HPRS e da regra de despacho FIFO foi de -4,81% e -24,76%, respectivamente no primeiro e terceiro grupos de instâncias. Em relação à concessionária, esse resultado é satisfatório, já que os dias atípicos são os mais complicados para o SAE.

Mesmo a heurística HPRS tendo sido aplicada em problemas gerados a partir de distribuições estatísticas, considera-se que essa pode ser utilizada no caso prático e em todas as regiões de atendimento da concessionária.

Atualmente estuda-se um método que possa ser acrescentado à heurística HPRS que consiga se antecipar à demanda de incidências de forma a permitir a redução dos deslocamentos das

EAE e com desvios de adiantamento e atraso menores que os obtidos atualmente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Companhia Energética do Ceará (COELCE), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), pelo financiamento do projeto ora em andamento, e da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC).

Referências

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução ANEEL N° 24. Disponível em: http://www.cpf.com.br/conselho/pdf/resolucao_24_de_27_jan_00.pdf. Acesso em 01/04/2008

AOKI, A. R.; LAMBERT-TORRES, G.; MORAES, C. H. V.; COSTA, B. R. & BARBOSA, J. A. *Sistema multi-agente para o atendimento de ocorrências na rede de distribuição de energia elétrica.* VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, 2003.

BRANKE, J. & MATTFELD, D. *Anticipation and flexibility in dynamic scheduling.* International Journal of Production Research, Vol. 43, n. 15, p. 3103-3129, 2005.

REEVES, C.R. & BEASLEY, J.E. *Introduction.* In Reeves, C. R., editor, Modern heuristic techniques for combinatorial problems. McGraw-Hill Book Company, UK, p. 1-19, 1995.

SAVELSBERGH, M. *DRIVE: dynamic routing of independent vehicles.* Operations Research, Vol. 46, n. 4, p. 474-490, 1998.

STEINER, M.T.A.; COSTA, C. E. S.; COSTA, D. E. B.; ANDRETTA FILHO, E. & ZAMBENEDETTI, V. C. *Técnicas da pesquisa operacional aplicadas à logística de atendimento aos usuários de uma rede de distribuição de energia elétrica.* Revista Eletrônica Sistemas & Gestão, Vol. 1, n. 3, p. 229-243, 2006.

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

ZOGRAFOS, I. G.; DOULIGERIS, C.; CLIAOXA, L. & DEVELECOS, G. *Analysis and optimization of distribution system reliability through the optimization of emergency response operations.* In: IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference: "Planning, Operation and Control of Today's Electric Power Systems", Greece, 1993.

ZOGRAFOS, K. G.; DOULIGERIS, C. & TSOUMPAS, P. *An integrated framework for managing emergency-response logistics: the case of the electric utility companies.* IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 45, n. 2, p. 115-126, 1998.

WEINTRAUB, A.; ABOUD, J.; FERNANDEZ, C., LAPORTE, G. & RAMIREZ, E. *An emergency vehicle dispatching system for an electric utility in Chile.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 50, p. 690-696, 1999.