



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Priorização no Restabelecimento de Energia em Situações de Contingência com o Auxílio da Técnica AHP

Daza, E. F. B.	Bernardon, D. P.	Comassetto, L.
AES Sul	AES Sul	AES Sul
Eric.Daza@aes.com	Daniel.Bernardon@aes.com	Lorenzo.Comassetto@aes.com
Abaide, A. R.	Canha, L. N.	
UFSM	UFSM	
Alzenira@ct.ufsm.br	Incanha@ct.ufsm.br	

Palavras-Chave

AHP

Contingência

Operação do Sistema

Priorização

Restabelecimento de Energia

Resumo

Este trabalho apresenta a metodologia desenvolvida para realizar a priorização nos atendimentos de restabelecimentos de energia em casos de contingência do sistema elétrico, numa determinada região de operação de uma concessionária de energia elétrica. Para a priorização no restabelecimento de energia, a metodologia escolhida foi a “Analytic Hierarchy Process” - AHP, por ser uma metodologia mais intuitiva e com menos chances de ser falha, além de também permitir a mensuração dos conhecimentos e experiência dos técnicos da empresa. O correto gerenciamento do sistema em situações de contingência é função de extrema importância para uma distribuidora de energia, pois a partir desses dados é possível definir identificar restabelecimentos de energia que reduzam os impactos negativos para empresa. Neste contexto, os esforços realizados para desenvolver uma ferramenta ou metodologia de gerenciamento e priorização nos atendimentos de restabelecimento de energia em situações de contingência apresentam uma elevada importância estratégica para a empresa no que tange à operação e planejamento do sistema elétrico sob sua responsabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O contexto atual das concessionárias de energia elétrica, dimensionadas para atender um mercado cada vez mais exigente, faz com que estas constantemente busquem meios para alcançar a excelência

operacional em todos os seus processos. Assim, o fornecimento de energia elétrica com o decorrer do tempo tenderá a ser de melhor qualidade e o mais ininterrupto possível. Porém, a ocorrência de interrupções no fornecimento da energia, embora minimizada, sempre irá ocorrer, principalmente quando ocasionada por eventos atípicos e não controláveis tais como eventos naturais, colisões de veículos, desgastes físicos dos equipamentos, entre outros.

Em qualquer dos casos supracitados, será necessário dispor de um plano de manobras para a reconfiguração do sistema, de forma a restringir ao mínimo a área a ser desenergizada, buscando-se restabelecer o suprimento de energia para os consumidores localizados à jusante desta área o mais rapidamente possível, através de manobras de dispositivos de seccionamento existentes na rede, mantendo ainda a condição de radialidade do sistema [1].

A continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores é um dos objetivos primários das concessionárias, contudo, quando a energia é interrompida, há necessidade de se restabelecer o sistema de fornecimento de forma a contemplar uma série de fatores, tais como:

- Minimizar o número de manobras necessárias para restabelecer o fornecimento de energia;
- Maximizar o número de consumidores a serem restabelecidos;
- Minimizar os possíveis prejuízos a empresa decorrentes dessa interrupção;
- Evitar qualquer operação em sobrecarga dos equipamentos da rede de distribuição.

A análise de alternativas de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica, quando da ocorrência de um defeito num ponto qualquer da rede, é um problema de decisão complexo [2]. Contudo a análise técnica referente ao número de manobras necessárias e operação de elementos em sobrecarga poderá ser avaliada rapidamente pelo operador do sistema em tempo real, porém se necessário for, escolher entre os sistemas (subestações, alimentadores, etc.) que deverão ser restabelecidos prioritariamente em relação aos demais quando executado em tempo real poderão ter resultados não desejáveis. Isso porque nem sempre restabelecer o maior número de consumidores será o único critério a ser considerado, devendo haver outros critérios a serem levados em consideração, de acordo com seu grau de importância para a empresa e o sistema durante a ocorrência do restabelecimento e de grande importância.

Sendo assim faz-se necessária uma metodologia que auxilie o correto despacho das equipes com o intuito de priorizar os clientes a serem atendidos, sempre em concordância com os interesses da empresa.

2. METODOLOGIA AHP

A metodologia AHP, assim chamada em função de seu significado em inglês “Analytic Hierarchy Process” que pode ser traduzido como Método de Análise Hierárquica, é um dos métodos de hierarquização mais intuitivos e de fácil utilização dentre os existentes.

O método foi introduzido por Saaty e apresentado como um processo de tomada de decisões menos falha, pois sua análise era desenvolvida através de uma seqüência de comparações aos pares. O

método AHP permite uma análise que reflete de forma similar o método natural de funcionamento da mente humana. Ao defrontar-se com um grande número de elementos, controláveis ou não, que abrangem uma situação complexa, ele os agrega em grupos, segundo propriedades comuns. O modelo dessa função cerebral permite uma repetição desse processo, de suas prioridades comuns de identificação, como os elementos de um novo nível de sistema. Esses elementos, por sua vez, podem ser agrupados segundo outro conjunto de propriedades, gerando os elementos de outro nível "mais elevado", até atingir um único elemento "máximo", que muitas vezes pode ser identificado como o objetivo do processo decisório [3].

Observando a conceituação expressa acima, identifica-se a estrutura básica de um processo de tomada de decisão hierárquica da seguinte forma:

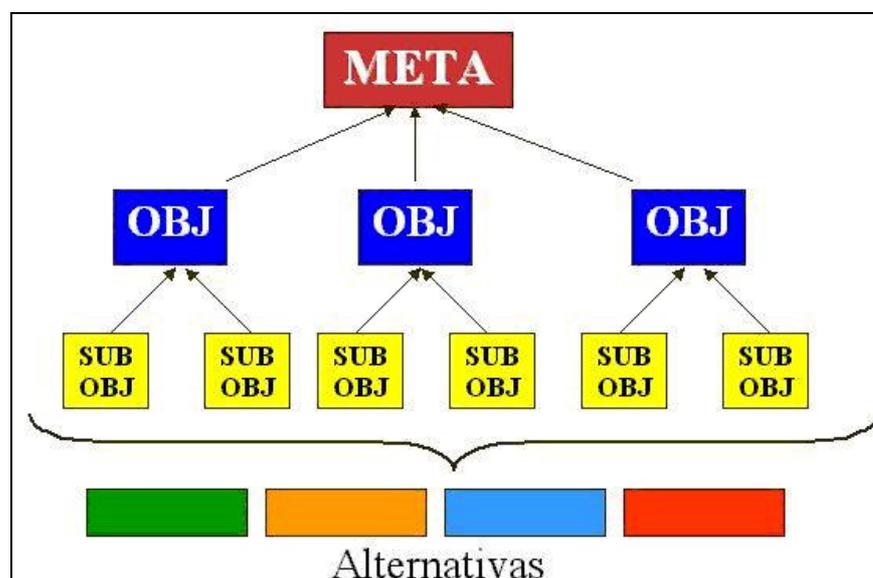


Figura 1 – Estrutura do processo de hierarquização

Assim, a priorização e mensuração dos valores para cada critério representará o grau de importância de cada objetivo e de cada sub-objetivo em relação ao objetivo prioritário. O método de comparação em pares deriva de julgamento. Enquanto é difícil justificar pesos que são arbitrariamente atribuídos, é relativamente fácil justificar julgamentos e o embasamento (dados, conhecimento e experiência) para o julgamento a partir das informações dos especialistas e técnicos da empresa.

2.1 Processo Matemático de Hierarquização

Conforme já apresentado, a metodologia do AHP constitui-se na decomposição por hierarquias e na síntese pela identificação das relações através de um processo de escolha consciente.

Na comparação par a par de cada característica é necessário traduzir a opinião do especialista em valores numéricos. A escala de intensidade projetada para representar a intensidade da preferência no julgamento das alternativas, é chamada de escala fundamental e é apresentada Tabela 1:

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Mesma importância
3	Importância moderada de um sobre o outro
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2,4,6,8	Valores intermediários

Tabela 1 – Tabela Fundamental de julgamento dos critérios [3]

Portanto com a escala verbal é possível julgar dois a dois os critérios em análise e a partir do julgamento verbal substituí-lo por números criando uma matriz que será a base do cálculo do método AHP para as prioridades. Assim, se um especialista desejar comunicar: “A preferência de B sobre C é Muito Forte”, numericamente isto será convertido em “a relação de preferência é de 7 para 1”

Assim, a aplicação do AHP inclui e mede todos os fatores importantes, qualitativa e quantitativamente mensuráveis, sejam eles tangíveis ou intangíveis, para aproximar-se de um modelo realista.

As comparações feitas pelo especialista, sempre aos pares, são postas na forma de uma tabela – matriz quadrada. Estas comparações são convertidas numa escala cardinal entre zero e um, normalizada, ou seja, a soma de todos os pesos é um. A leitura da matriz é a alternativa na linha comparada com a da coluna.

A matriz abaixo (1) apresenta um exemplo de formação da matriz quadrada de uma determinada análise que incluía hierarquização de quatro critérios (A, B, C e D).

$$\begin{bmatrix} \textit{Critérios} & A & B & C & D \\ A & 1 & 6 & 7 & 5 \\ B & 1/6 & 1 & 3 & 7 \\ C & 1/7 & 1/3 & 1 & 2 \\ D & 1/5 & 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

Equação 1 – Exemplo de matriz quadrada para análise AHP

As posições da diagonal serão sempre “1”, afinal, um elemento é igualmente importante a ele mesmo. Para preencher os outros elementos da matriz fora da diagonal, fazem-se os julgamentos e determina-se a intensidade de importância de acordo com a Tabela 1, que apresenta a escala de comparações empregadas no método. Para as comparações inversas, isto é, na parte inferior esquerda da matriz, colocam-se os quocientes dos respectivos valores acima da diagonal. É importante notar que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, como o inverso dessa unidade. Se o elemento linha é menos importante do que o elemento-coluna da matriz, entramos com o valor recíproco na posição correspondente da matriz. Devido à relação de reciprocidade e à necessidade de consistência entre duas atividades ou critérios, os recíprocos dos valores acima de zero são inseridos na matriz criada quando uma comparação entre

duas atividades já foi realizada. O processo é robusto, porque diferenças sutis em uma hierarquia na prática não se tornam decisivas.

De forma genérica os resultados da comparação deverão ser apresentados de acordo com a matriz genérica abaixo (2):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Equação 2 – Matriz quadrada genérica de julgamento

Os elementos da matriz de julgamentos A devem satisfazer as seguintes condições:

- a) $a_{ij} = \alpha$;
- b) $a_{ji} = 1 / \alpha$;
- c) $a_{ii} = 1$

onde:

a = comparação paritária entre critérios;

α = valor de intensidade de importância de acordo com a Tabela 1;

n = número de critérios em análise

A resolução da matriz A será o autovetor desta, que apresentará os autovalores dos critérios, ou seja, o grau de prioridades “w”, a qual expressa as importâncias relativas (pesos) de cada um dos fatores ou subfatores. Assim a forma mais recomendada de cálculo é elevar a matriz a potências arbitrariamente altas, dividindo-se a soma de cada linha pela soma dos elementos da matriz, ou seja, normalizando-se os resultados. Isto resulta no autovetor de prioridades. Essa operação deve ser repetida até que a diferença entre o resultado normalizado da última operação seja bem próxima ao resultado da operação precedente, pode-se considerar como valores próximos diferenças após a terceira casa decimal [4].

2.2 Consistência das informações

O cálculo do índice de inconsistência inicia-se com a multiplicação da matriz de julgamentos A pelo autovetor de prioridades w. O resultado será uma matriz que depois de normalizada, gerará um novo autovetor. O somatório desse autovetor (coluna) é o autovalor λ . A partir do autovalor λ é calculado o índice de consistência IC, que mede os desvios dos julgamentos por meio da equação abaixo (3):

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1}$$

Equação 3 – Índice e Consistência do critério

onde:

n indica o número de fatores ou subfatores da matriz.

O cálculo final do grau de inconsistência RC da matriz é feito pela equação (4):

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Equação 4 – Grau de inconsistência final

onde :

IR é um índice randômico médio de inconsistência,

A tabela 2 apresenta os valores IR indicados [1]:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Tabela 2 – Índice randômico de inconsistência

O método AHP considera aceitável um grau de inconsistência igual ou menor que 0,10. Caso se apure um valor maior, aconselha-se ao especialista ou ao grupo de especialistas que revejam seus julgamentos.

3. PRIORIZAÇÃO DOS ATENDIMENTOS

A AES Sul já possui uma priorização de alimentadores cujo foco é a hierarquização dos alimentadores para o recebimento de recursos de manutenção. Tal ordenação poderia também ser utilizada na priorização dos atendimentos em casos emergenciais. Porém como o foco de hierarquização é distinto, apesar de similar, o peso dado para cada critério poderia ser diferente.

Partindo disso, foi realizado um estudo de priorização dos alimentadores de uma subestação da AES Sul com o intuito de hierarquizar os alimentadores em função do nível de prioridade de atendimento dos mesmos. Esse estudo é exposto nos itens abaixo.

3.1 Aplicação do Método AHP

Para utilização do método AHP deve-se destacar um especialista no assunto escolhido para que este possa realizar ponderações, par a par, de determinados critérios. A escolha dos critérios para análise de priorização dos atendimentos dos alimentadores deverá ser baseada na relevância que estes terão para obtenção da hierarquização final que se almeja. Nesse caso os critérios escolhidos foram os elencados na Tabela 3 abaixo:

Identificador	Critério
A	DEC (duração equivalente de interrupção por consumidor)
B	Clientes Especiais
C	Total de Consumidores
D	Faturamento

Tabela 3 – Critérios escolhidos e seus identificadores

Escolhidos os critérios, o próximo passo consiste na comparação par a par dos critérios selecionados pelo especialista da empresa. Com base nos julgamentos de comparação expostos na Tabela 1, obtém-se os dados da Figura 2 como resposta:

	A	B	C	D
A	1,0000	5,0000	3,0000	5,0000
B	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000
C	0,3333	5,0000	1,0000	3,0000
D	0,2000	1,0000	0,3333	1,0000

Figura 2 – Tabela de julgamento dos critérios

Posteriormente necessita-se verificar a consistência das respostas dadas pelo especialista, através das equações supracitadas calcula-se o autovetor contendo os autovalores de cada critério e com isso o índice de consistência de cada critério (λ_i) e o índice de inconsistência geral. A Figura 3 apresenta estes valores calculados:

	A	B	C	D	Auto Vetor	IC
A	1,0000	5,0000	3,0000	5,0000	0,4953	0,2540
B	0,2000	1,0000	0,2000	1,0000	0,0849	0,0000
C	0,3333	5,0000	1,0000	3,0000	0,3302	-0,1333
D	0,2000	1,0000	0,3333	1,0000	0,0896	0,0936
					Média	0,0536

Figura 3 – Índice de Consistência de cada critério

Assim, obtém-se um grau de inconsistência final para esta matriz igual a 0,0536 que de acordo com a Tabela 2 para um universo de quatro elementos analisados está abaixo do limite superior tido como aceitável. Em princípio poder-se-ia considerar este como sendo o resultado final: os pesos de cada critério e o autovalor de cada um destes, porém o mais aconselhável é elevar inúmeras vezes a matriz dados ao quadrado até que o erro da iteração seja o mínimo aceitável. No caso em estudo após a primeira iteração obteve-se um erro (diferença entre o autovalor atual e o anterior) máximo de 5,18%, já na segunda iteração o erro foi de 0,29% e na terceira 0,002%, posteriormente julgou-se não ser mais

necessário realizar mais iterações, pois o erro encontrado foi insignificante, obtendo-se assim os pesos finais para cada critério.

A Tabela 4 apresenta os pesos iniciais e os pesos finais após as iterações propostas:

Identificador	Critério	Peso Inicial	Peso Final
A	DEC	49,5%	54,7%
B	Clientes Especiais	8,5%	8,2%
C	Total de Consumidores	33,0%	27,9%
D	Faturamento	9,0%	9,2%

Tabela 4 – Pesos de cada critério

3.2 Análise dos Critérios

Para o desenvolvimento deste estudo partiu-se inicialmente da análise de um conjunto de cinco alimentadores de uma subestação. Tais alimentadores apresentavam os seguintes valores anualizados para os critérios estabelecidos, conforme a Figura 4:

ALIMENTADOR	DEC	Clientes Especiais	Total de Clientes	Faturamento (R\$)
AL - 01	0,0061	10	648	11.376.142,60
AL - 02	0,1118	3	6312	13.113.517,78
AL - 03	0,0722	1	6464	9.548.486,53
AL - 04	0,0460	1	8696	29.355.391,60
AL - 05	0,0027	0	1742	3.760.685,28
AL - 06	0,0073	3	1169	5.579.981,79
AL - 07	0,0244	3	1901	6.583.871,01

Figura 4 – Critérios em análise

Por se tratarem de grandezas com unidades diferentes e para ser possível obter apenas um valor final indicativo da prioridade do alimentador, é necessário normalizar os valores para que estes fiquem sob uma única base adimensional e num intervalo de zero a um. Na análise destes critérios a função objetivo será a máxima entre todos analisados, ou seja, o alimentador mais prioritário deverá apresentar os maiores valores: de DEC, de número de clientes especiais, de número total de clientes e faturamento.

Assim, para normalizar os valores de DEC é necessário dividir seu valor natural pelo máximo dos valores de DEC dos sete alimentadores em análise, e assim para os demais critérios, pois para todos a função objetivo é maximização dos critérios. A Figura 5 apresenta os valores já normalizados.

ALIMENTADOR	DEC	Cientes Especiais	Total de Clientes	Faturamento
AL - 01	0,054	1,000	0,074	0,388
AL - 02	1,000	0,300	0,726	0,447
AL - 03	0,646	0,100	0,743	0,325
AL - 04	0,411	0,100	1,000	1,000
AL - 05	0,024	0,000	0,200	0,128
AL - 06	0,065	0,300	0,134	0,190
AL - 07	0,218	0,300	0,219	0,224

Figura 5 – Critérios normalizados

3.3 Integralização

Com os critérios normalizados e o peso de cada critério já obtido através da metodologia AHP resta apenas integralizar os critérios aos seus pesos e posteriormente obter uma resposta final para cada uma das alternativas, ou seja, obter um ranking final com a priorização dos alimentadores em função da urgência do restabelecimento de energia. Assim basta multiplicar a matriz com os dados dos critérios normalizados pelo autovetor contendo os autovalores que representam os pesos destes critérios na análise. Desta forma obtém-se o vetor final contendo os índices finais de cada alimentador como demonstra a Figura 6.

ALIMENTADOR	Índice Final
AL - 01	0,168
AL - 02	0,815
AL - 03	0,599
AL - 04	0,604
AL - 05	0,081
AL - 06	0,115
AL - 07	0,226

Figura 6 – Índice Final dos alimentadores

Com os índices finais de cada alimentador que representam o quanto prioritários estes são no restabelecimento de energia, é possível formatar um ranking desses alimentadores, conforme apresenta a Figura 7.

Ranking	Alimentador
1	AL - 02
2	AL - 04
3	AL - 03
4	AL - 07
5	AL - 01
6	AL - 06
7	AL - 05

Figura 7 - Ranking final dos alimentadores

Desta forma sempre que houver qualquer situação de contingência nesta subestação e for possível restabelecer algum(s) alimentador(s), porém não todos, já há meios de decidir quais dos alimentadores deverão ser restabelecidos prioritariamente.

3.4 Aplicação na Concessionária de Energia

Neste estudo de caso foi demonstrada a aplicação do método para apenas uma subestação, porém é importante destacar que a metodologia proposta é facilmente exequível a todo o sistema elétrico sob responsabilidade da concessionária de energia elétrica. Assim podem-se priorizar subestações, prevendo restrições no sistema de subtransmissão ou transmissão ou priorizar todos os alimentadores da concessionária em um único ranking precavendo-se de uma contingência que atinja todo o sistema, pois após apurados os pesos de cada critério através da metodologia proposta basta aplicá-los para cada critério.

4. CONCLUSÕES

A ferramenta desenvolvida já foi implementada na AES Sul em um pequeno número de subestações para avaliar-se os resultados obtidos. E apesar do curto espaço de tempo de avaliação e monitoramento, já foi possível observar os resultados coerentes e validos que a ferramenta forneceu, auxiliando na priorização dos alimentadores em situações de real contingência.

A implementação desta metodologia proporciona um sistema de auxílio na tomada de decisões no processo de gerenciamento de contingência no sistema elétrico, propiciando uma resposta mais exata e menos sujeita a erros na priorização dos atendimentos e restabelecimentos de energia. A utilização da metodologia agrega uma maior quantidade de informações na tomada de decisões, não deixando a responsabilidade apenas para o operador do sistema.

Através da aplicação da metodologia é possível ter um mapeamento completo de todos os alimentadores da concessionária de energia, indicando quais os elementos no seu sistema são prioritários e que deverão ser sempre atendidos com a maior brevidade possível. A metodologia também permite integrar os atuais interesses da empresa à operação do sistema, ou seja, tornar mais prioritário a redução do DEC ou o atendimento de regiões com maior importância econômica e assim por diante permitindo à concessionária escolher os critérios que têm maior importância no momento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kagan, N; Oliveira C C B. Representação reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de ferramenta para solução de problemas de decisão com múltiplos objetivos e incertezas – Agosto 2006 sistemas de distribuição radiais. SBA – Controle & Automação, Vol.12, n.1, 2001.
- [2] Bretas, N G; Delbem, A C B; Carvalho A. Representação por cadeias de grafo para AG aplicados ao restabelecimento ótimo. Espaço Energia Edição número 04 – Agosto 2006 sistemas de distribuição radiais. SBA – Controle & Automação, Vol.12, n.1, 2001.
- [3] SAATY, T. L., Método de Análise Hierárquica, Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991.
- [4] Gartner, Ivan R. (1998) Análise de Projetos em Bancos de Desenvolvimento. UFSC, Florianópolis.