



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GOP - 29
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IX
GRUPO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PLANOS DE RECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Alexandre de Assis Mota * Lia Toledo Moreira Mota André Luiz Morelato França

UNICAMP

UNICAMP

UNICAMP

RESUMO

A recomposição de sistemas elétricos objetiva normalizar o fornecimento de energia no menor tempo possível, baseando-se em planos, previamente elaborados pelo ONS e pelos agentes homologados pela ANEEL, que definem procedimentos necessários para reenergizar a rede. Assim, o sucesso da recomposição está diretamente associado à qualidade desses planos. Este trabalho propõe uma metodologia que possibilita modelar os planos de recomposição e analisar sua qualidade, avaliando a previsão da duração da recomposição, eficiência da fase fluente, evolução da carga interrompida e custo da interrupção. A metodologia foi testada, com sucesso, para planos de recomposição das regiões Sul/ Sudeste do Brasil.

PALAVRAS-CHAVE

Recomposição de Sistemas de Energia Elétrica, Instruções Operativas de Recomposição, Blecautes, Avaliação da Qualidade, Custos da Interrupção.

1.0 - INTRODUÇÃO

O processo de recomposição de sistemas de energia elétrica, após a ocorrência de blecautes totais ou parciais, deve priorizar a maximização do número de consumidores atendidos e a minimização do tempo requerido para a normalização do fornecimento de energia, uma vez que, nessa situação, o tempo é um fator fundamental, influenciando significativamente os prejuízos econômicos e sociais advindos da falha no abastecimento (1). Para que o objetivo do processo de reenergização possa ser atingido de forma adequada, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) coordena a elaboração de planos de recomposição, definidos nos seus "Procedimentos de Rede" (2). Esses procedimentos são compostos por instruções operativas que descrevem uma seqüência, previamente analisada na etapa de planejamento da recomposição, de ações de controle que devem ser tomadas (tanto na fase fluente quanto na fase coordenada) para reenergizar as diferentes áreas geo-elétricas do sistema.

Recentemente, foram registrados distúrbios graves nos sistemas elétricos interligados, no Brasil e no mundo, que resultaram em blecautes de grandes proporções (8). A ocorrência dessas interrupções de grande porte levou ao desenvolvimento de metodologias para a avaliação de uma dada condição de blecaute. Esses métodos permitem analisar, através de índices, o grau de severidade para diferentes situações de falha no abastecimento de energia. Entretanto, enquanto muita atenção tem sido dada à análise e classificação das causas e eventos que conduziram o sistema para a condição de blecaute, pouco ou nenhum esforço tem sido empregado pelo setor de energia elétrica no desenvolvimento de metodologias que avaliem a qualidade dos planos de recomposição elaborados, com antecedência, para contornar as situações de interrupção.

Nesse contexto, este trabalho propõe uma metodologia que possibilita a modelagem e a posterior avaliação objetiva da qualidade dos planos de recomposição. Para tanto, são analisadas características como: a duração total prevista para a recomposição, levando em conta as incertezas associadas às ações descritas nas instruções operativas; a eficiência da fase fluente, em termos da quantidade de atividades paralelas desempenhadas; a evolução da carga interrompida, decomposta em suas parcelas de consumo residencial, industrial e comercial; e o custo total previsto para a interrupção.

*Av.: Albert Einstein, 400 - CEP 13083-852 - Campinas - SP - BRASIL
Tel.: (019) 3788-3708 - Fax: (019) 3289-1395 - e-mail: assis@dsee.fee.unicamp.br

Na seqüência, a Seção 2.0 descreve a modelagem proposta para representar os planos de recomposição através de grafos orientados. A Seção 3.0 trata de aspectos importantes relacionados à avaliação da qualidade desses planos, enquanto a Seção 4.0 aborda a metodologia adotada para a realização dessa avaliação. A Seção 5.0 expõe os resultados obtidos a partir da aplicação dessa metodologia e, finalmente, a Seção 6.0 descreve as principais conclusões deste trabalho.

2.0 - MODELAGEM DOS PLANOS DE RECOMPOSIÇÃO

Conforme citado anteriormente, os planos de recomposição são elaborados numa etapa de estudos denominada Planejamento da Recomposição. Nessa etapa, que deve acontecer com bastante antecedência à ocorrência de blecautes, um grupo de especialistas geralmente é reunido e, tomando como base o conhecimento de cada um deles, os planos são desenvolvidos. Esse desenvolvimento conta com o apoio de um grande número de ensaios e simulações para obter soluções factíveis para a reenergização do sistema, considerando cada cenário de interrupção previsto pelo grupo. Os produtos finais desse estágio correspondem aos planos de recomposição ou instruções operativas (no Brasil) que são constituídos por um conjunto de documentos textuais, usualmente organizados segundo uma forma lógica e encadeada das ações de recomposição, que, quando executadas, resultam em uma seqüência de reenergização bem definida. Essa organização pode, então, ser explorada para a obtenção de modelos lógico-computacionais que representam os planos em questão, na forma de grafos orientados, que possibilitem a aplicação de métodos de caminho crítico, como o CPM ("Critical Path Method") e o PERT ("Program Evaluation Review Technique"), conforme detalhado nas referências (6, 7).

O ONS sugere a representação das instruções operativas em um formato tabular para facilitar o entendimento, pelos operadores e engenheiros, das atividades descritas principalmente sob condições de recomposição. Esse formato delinea características importantes do processo, tais como a ordem de uma determinada atividade na seqüência planejada de ações, o agente executor dessa atividade, a descrição dos procedimentos e as condições e controles que devem ser satisfeitos antes que a mesma possa se iniciar. Pode-se considerar que essa configuração tabular define o conjunto de procedimentos e ações em uma cadeia ordenada de atividades. A Tabela 1 evidencia essa formatação, ilustrando a instrução operativa que define os procedimentos para a reenergização fluente da área Capivara (área 16 da região Sudeste), formada pelas Usinas Capivara e Taquaruçu, pelas subestações de Assis e Londrina e pelo tronco de transmissão associado à área (2).

TABELA 1 – Instrução operativa de recomposição para reenergização fluente da área Capivara

EXECUTOR	PROCEDIMENTO/AÇÃO	CONDIÇÃO/CONTROLE
Usina Capivara	Sincronizar 2 unidades geradoras. Energizar o TR-5 440/138 kV assumindo carga da região. Enviar tensão para Taquaruçu. Confirmar com o operador de Assis se o reator RE-2 está conectado no terminal da LT e enviar tensão pela LT Capivara / Assis. Quando da sincronização da 3ª unidade geradora, avisar o operador de Assis.	Valor Máximo de carga igual a 120 MW Tensão em torno de 420 kV. Tensão \leq 420 kV com ou sem RE-2 conectado em Assis.
Usina Taquaruçu	Sincronizar 1 (uma) unidade geradora e energizar o TR-7 440/138 kV assumindo carga da região. Aguardar instruções do COS para fechamento do paralelo com a Usina Capivara.	Valor Máximo de carga igual a 80 MW
Subestação Assis	Conectar o RE-2 na LT Capivara / Assis. Recebendo tensão de Capivara, aguardar 1 (um) minuto para possibilitar ajustes de tensão em Capivara e energizar a barra-I, o TR-1 440/230 kV e os TRs 3 e 4 230/88 kV e assumir cargas da região. Após a confirmação da 3ª unidade geradora sincronizada em Capivara, enviar tensão para Londrina.	Tensão \leq 485 kV para energizar o TR-1 Valor Máximo de carga igual a 65 MW Tensão entre 220 e 230 kV
Subestação Londrina	Recebendo tensão de Assis, normalizar a LI e restabelecer carga da região.	Valor Máximo de carga igual a 80 MW

A partir da análise dessas instruções no seu formato tabular, é possível a extração de uma lista de atividades (ações de recomposição), cujo principal mérito é representar, de forma explícita, as relações de precedência entre as atividades. Em outras palavras, pretende-se, com essa lista, deixar claro que determinadas atividades só podem ser iniciadas quando outras são concluídas, e quais são as dependências de cada uma delas. A Tabela 2 apresenta uma possível lista de atividades que corresponde às ações seqüenciais de reenergização da área Capivara.

Com base nessa lista de atividades, pode-se, então, construir (manualmente ou de forma automática) um diagrama de processo (ou grafo CPM/PERT) associado ao plano de recomposição em estudo (9). O diagrama resultante consiste em um grafo dirigido no qual as atividades de recomposição estão relacionadas aos arcos do grafo e as etapas do processo de reenergização (que caracterizam os momentos de início ou término das atividades) estão associadas aos nós desse grafo. Uma metodologia computacional para a geração automática de grafos CPM/PERT, que utiliza como entrada apenas a lista de atividades correspondente ao plano de recomposição, pode ser encontrada na referência (3). A Figura 1 ilustra a representação do plano de

recomposição fluente da área Capivara na forma de um grafo CPM/PERT, obtido a partir da aplicação dessa metodologia. Deve-se destacar que, na Figura 1, o arco representado por "Dummy" (ou *atividade-fantasma*) não corresponde a uma atividade como os demais arcos, representando apenas a dependência lógica e temporal entre duas atividades.

TABELA 2 - Lista de atividades para a reenergização fluente da área Capivara

Atividade	Descrição	Precedência
A	Capivara sincroniza 2 geradores	-
B	Capivara energiza TR-5 440/138 kV	A
C	Capivara envia tensão para Taquaruçu	B
D	Capivara confirma com Assis a conexão do reator RE-2	C
E	Capivara envia tensão para Assis	D
F	Capivara sincroniza o terceiro gerador	E
G	Capivara informa Assis que o terceiro gerador está sincronizado	F
H	Taquaruçu sincroniza 1 gerador	-
I	Taquaruçu energiza TR-7 440/138 kV	H
J	COS notifica Taquaruçu que o paralelo com Capivara pode ser fechado	C
K	Taquaruçu fecha o paralelo com Capivara	I e J
L	Assis conecta o reator RE-2	-
M	Assis espera o ajuste de tensão em Capivara	E e L
N	Assis energiza barra-I, TR-1 440/230 kV e TRs 3 e 4 230/88 kV	M
O	Assis envia tensão para Londrina	G e N
P	Londrina normaliza LI e restabelece carga	O

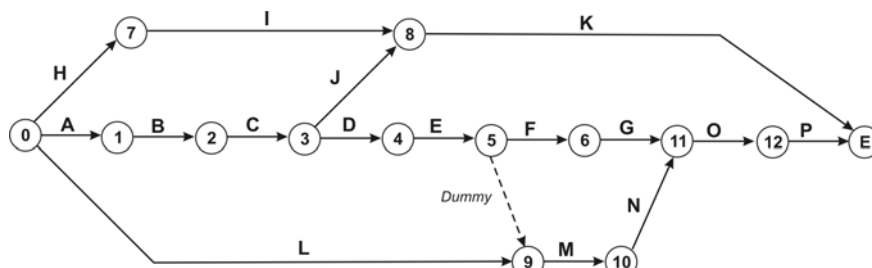


FIGURA 1 - Grafo CPM/PERT para o plano de recomposição da área Capivara

3.0 - AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PLANOS DE RECOMPOSIÇÃO

Uma vez representados na forma de grafos CPM/PERT, os planos de recomposição podem, então, ser analisados, visando a avaliação da sua qualidade, através da utilização de critérios capazes de caracterizá-la de maneira adequada. Neste trabalho, os critérios utilizados para a avaliação da qualidade dos planos de recomposição foram: a previsão da duração da recomposição (1); a eficiência da fase fluente, dada pelo número de atividades paralelas possíveis de serem desempenhadas; a evolução da carga interrompida e o custo da interrupção (4).

O primeiro critério refere-se ao tempo necessário para o cumprimento de todas as ações previstas no plano. Quanto menor esse tempo, melhor a qualidade do plano em análise. O segundo critério está associado à eficiência da fase fluente da recomposição, uma vez que quanto maior o número de atividades ou ações paralelas previstas no plano, mais rapidamente terminará a fase fluente e, provavelmente, melhor será a qualidade do mesmo. O terceiro critério corresponde à evolução, no tempo, da carga que deixou de ser abastecida durante o processo de recomposição, dividida em suas componentes residencial, industrial e comercial. Esse parâmetro, além de permitir a inferência do atendimento aos consumidores nos estágios intermediários do processo de reenergização, possibilita também o cálculo direto dos custos da interrupção, que refletem os prejuízos causados pela falta de energia para os consumidores distribuídos ao longo do sistema.

De posse desses parâmetros, é possível conduzir uma análise comparativa entre diferentes linhas de ação viáveis para a reenergização de um mesmo cenário de interrupção ou de cenários tecnicamente similares. Usando critérios próprios, cada equipe de planejamento pode escalonar propostas para os planos de recomposição e decidir qual delas é a mais adequada no contexto da sua concessionária ou órgão operador. Mais ainda, além de servir como apoio na etapa de Planejamento da Recomposição, essa metodologia de avaliação da qualidade pode ser empregada, sem grande esforço de adaptação, em conjunto com ferramentas para a reconstrução dos eventos que levaram à interrupção (5). A Figura 2 representa a relação entre esses parâmetros e a qualidade do plano em análise.

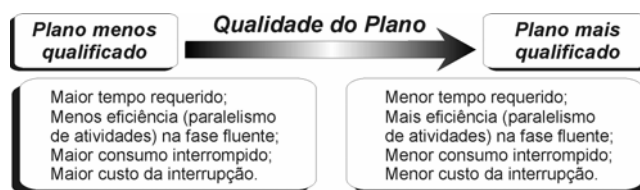


FIGURA 2 - Relação entre critérios de avaliação e qualidade do plano

4.0 - METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho para a análise da qualidade de um plano de recomposição passa pelas seguintes etapas:

- **Etapa A:** Representação das instruções operativas associadas ao plano de recomposição na forma de uma lista de atividades, contemplando as relações de precedência entre as mesmas;
- **Etapa B:** Representação do plano através de um grafo CPM/PERT, obtido a partir da lista de atividades determinada na Etapa A, usando um algoritmo de geração automática;
- **Etapa C:** Extração de parâmetros representativos da qualidade do plano, usando um método de caminho crítico e algoritmos que exploram a estrutura topológica do grafo obtido na Etapa B.

As Etapas A e B foram descritas anteriormente na Seção 2.0. Resta, portanto, tratar, com maior detalhamento, da Etapa C. Conforme ilustrado pela Figura 3, essa Etapa, além do grafo disponibilizado pela Etapa B, requer uma série de informações adicionais, acerca das atividades que compõem o plano de recomposição, para determinar os parâmetros representativos da qualidade do mesmo.

Das informações requeridas pela Etapa C, observa-se que o montante de carga a ser reenergizada, a sua composição e o custo da interrupção (classificado segundo os diferentes segmentos de consumo), apresentam um baixo grau de incerteza associado à sua especificação, uma vez que podem ser obtidos diretamente das bases de dados das concessionárias de energia ou de tabelas de custo disponíveis na literatura (4). Em contrapartida, existe um considerável grau de incerteza associado ao cumprimento das atividades, refletido por sua duração. Nesse caso, é esperado que os desvios entre os tempos estimados para as atividades durante o planejamento e os tempos necessários na prática para a sua execução apresentem um valor variável que não pode ser desprezado e, portanto, atenção especial será dada, aqui, ao seu tratamento.

Para modelar essa incerteza, a duração de uma atividade será definida como uma variável aleatória, com distribuição de probabilidade beta, de média t_e e desvio padrão σ_e , como já adotado com sucesso na formulação do PERT (6, 7). Essa distribuição permite determinar a média e o desvio padrão do tempo de duração estimado para uma atividade qualquer de recomposição, através de apenas três diferentes estimativas de tempo, que são:

- **Estimativa do tempo mais provável (t_m):** representa o valor mais esperado para a realização da atividade, ou o valor que tem mais chances de ocorrer do que qualquer outro.
- **Estimativa de tempo otimista (t_o):** representa o menor tempo no qual a atividade pode ser completada, ou o tempo obtido no caso de melhor desempenho, em que todas as variáveis envolvidas no cumprimento da atividade se comportam de maneira melhor do que a usual.
- **Estimativa de tempo pessimista (t_p):** representa o pior tempo (mais longo) que se pode levar para completar a atividade, ou o tempo obtido no caso de pior desempenho, em que as condições gerais às quais a atividade está submetida sejam piores que as usuais.

De posse dessas estimativas, o tempo esperado t_e e o correspondente desvio padrão esperado σ_e para a duração da atividade a_i serão dados, respectivamente, pelas equações (1) e (2).

$$t_e = \frac{t_o + 4.t_m + t_p}{6} \quad (1)$$

$$\sigma_e = \frac{t_p - t_o}{6} \quad (2)$$

Com base nessas considerações, a obtenção dos parâmetros associados à qualidade dos planos pode ser realizada, conforme descrito nos itens 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 a seguir.

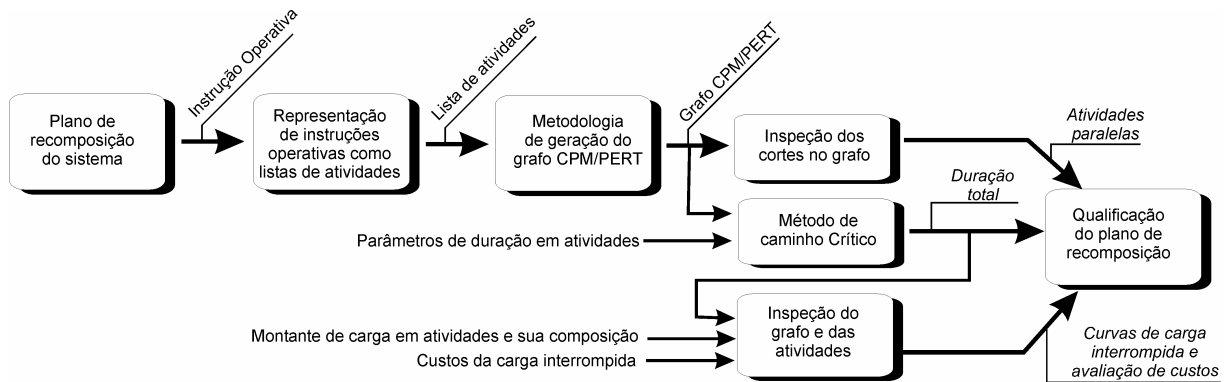


FIGURA 3 - Metodologia para análise da qualidade de um plano de recomposição

4.1 Determinação da Duração Total do Plano

A determinação da duração total do plano de recomposição é realizada com base nos tempos de duração das atividades, obtidos conforme descrito anteriormente, e através da aplicação dos cálculos associados a um dos métodos de identificação de caminho crítico que permite a modelagem estocástica dos tempos (como o PERT). Esses cálculos estão baseados na execução seqüencial de pelo menos três varreduras computacionais pelo grafo associado ao plano de recomposição: uma varredura “forward”, em que os elementos do grafo são inspecionados para determinação do **tempo mais cedo** em que podem se iniciar as atividades do plano; uma varredura “backward”, utilizada para a determinação do **tempo mais tarde** em que podem se iniciar as atividades do plano; e uma varredura para o cálculo das **folgas** envolvidas com os elementos do grafo, que representam os atrasos permissíveis nas atividades. Como o principal foco deste trabalho não está voltado diretamente para os cálculos envolvidos nessas varreduras, eles não serão detalhados aqui. Maiores considerações sobre a resolução de grafos CPM/PERT podem ser encontradas nas referências (1, 3, 6, 7, 9). Ao final desses cálculos, pode-se obter a duração total do plano que, considerando as condições de emergência da situação de recomposição, pode ser assumida como o **tempo mais cedo** calculado para a última etapa do grafo. Uma vez que as durações das atividades foram consideradas como variáveis aleatórias, a duração total do plano também será aleatória. Assim, é possível obter estimativas para o horizonte de duração da recomposição, com diferentes graus de confiabilidade. Além disso, os métodos de caminho crítico fornecem estimativas de tempo para estágios intermediários do plano. Essa informação possibilita uma visão detalhada do processo, que permite a identificação das atividades críticas (aquelas que não admitem atrasos na sua execução, sem comprometer o andamento do processo) e, conseqüentemente, pode subsidiar a tomada de decisões para uma melhor alocação de recursos e investimentos.

4.2 Determinação do Número de Atividades Paralelas

A determinação do número de atividades paralelas é obtida através da realização de cortes progressivos no grafo CPM/PERT. A profundidade desses cortes é dada pela estimativa do tempo transcorrido entre o ponto de corte e o nó que representa o início do processo. Assim, o número de arcos atravessados por uma mesma linha de corte equivale ao número de possíveis atividades que são realizadas em paralelo em um determinado instante. Realizando-se cortes sucessivos, com profundidades variando de zero à duração total do plano, pode-se determinar o grau de paralelismo das atividades ao longo do tempo. Esse parâmetro é particularmente importante durante a fase fluente da recomposição, na qual o sistema a ser reenergizado é subdividido justamente para acelerar o restabelecimento de energia, através da execução simultânea de diversas instruções operativas. É desejável, portanto, que os procedimentos apresentem um maior grau de paralelismo durante os estágios iniciais do processo de recomposição, evidenciando a eficiência da fase fluente.

4.3 Determinação da Evolução da Carga Interrompida

Conforme o item 4.1, a aplicação dos métodos de caminho crítico fornece estimativas do tempo, transcorrido desde o início do plano, para todos os estágios intermediários do processo. Entende-se, aqui, por estágio intermediário, os instantes nos quais atividades podem ser iniciadas no contexto do plano de recomposição. Como citado anteriormente, tais estágios correspondem aos nós do grafo CPM/PERT. Isso significa que é possível situar todas as atividades previstas nas instruções operativas dentro da linha temporal do plano como um todo. Com isso, a previsão do momento de retomada de uma determinada carga é equivalente ao momento no qual é concluída a atividade que envolve a reenergização dessa mesma carga. Esse momento é igual ao tempo estimado para o nó de origem do arco que representa essa atividade (dado pelo método de caminho crítico) adicionado ao tempo estimado para a duração dessa atividade (que é uma informação já disponível para a realização da Etapa C). De posse dos tempos associados à retomada de diversas cargas distribuídas ao longo do sistema, resta determinar os montantes de carga a serem restabelecidos nesses instantes. Essa correspondência entre tempo e carga pode ser deduzida diretamente das instruções operativas que estabelecem os valores de carga a serem recompostos nas diferentes atividades. Assim como a duração das atividades, os dados relativos ao montante de carga e sua composição (dada por suas parcelas de consumo residencial, industrial e comercial)

encontram-se disponíveis antes do início da Etapa C. Portanto, com base nessas informações, é possível determinar a curva associada à evolução temporal da carga a ser recomposta dividida em suas categorias de consumo. A curva de evolução da carga interrompida pode ser obtida, então, simplesmente subtraindo-se a curva de carga recomposta do montante total de carga associado ao sistema.

4.4 Determinação do Custo da Interrupção

A definição de custo da interrupção, adotada neste trabalho, é a mesma explicitada na referência (4): “O custo da interrupção reflete os prejuízos do usuário causados pela restrição de energia que o surpreende de forma intempestiva e para a qual não tem como precaver-se”. Nessa mesma referência, são apresentadas tabelas com os valores médios nacionais de custos de interrupção, para vários horários de início da ocorrência e para várias faixas de duração da interrupção, considerando as três grandes classes de consumidores (residencial, industrial e comercial). Essas tabelas foram compiladas, aqui, resultando na Tabela 3, onde os valores listados referem-se a custos unitários em US\$/KWh.

TABELA 3: Custos unitários de interrupção (valores médios nacionais)

Segmento Industrial								Segmento Comercial							Segmento Residencial	
Início	Duração da Interrupção						Hora adicional	Início	Duração da Interrupção						Início da interrupção	Custo da interrupção
	00 a 03 min	03 a 15 min	15 a 30 min	30 a 60 min	60 a 120 min	00 a 03 min			03 a 15 min	15 a 30 min	30 a 60 min	60 a 120 min				
0 às 8 h	2,87	1,23	1,07	0,90	0,81	0,78	0,98	1,83	2,80	2,55	2,45	2,69	0 às 8 h	0,0		
8 às 18 h	2,73	1,26	1,20	0,95	0,86	0,78	1,83	3,16	4,25	4,36	4,76	3,76	8 às 18 h	0,0		
18 às 24 h	2,80	1,14	1,06	0,83	0,75	0,78	1,81	3,03	3,92	3,77	4,10	3,14	18 às 24 h	1,11		

Dividindo a curva de carga interrompida, determinada no item anterior, nas categorias residencial, industrial e comercial e nas faixas de duração da interrupção adequadas, é possível utilizar a Tabela 3 para determinar o custo total da interrupção. Para tanto, calcula-se a energia interrompida, por categoria de consumidor, integrando por partes a curva de carga interrompida, considerando os limites de tempo correspondentes às faixas de duração da interrupção especificadas nessa mesma tabela. A seguir, multiplica-se essa energia pelos custos unitários correspondentes. A soma de todos os custos assim obtidos determinará o custo total da interrupção.

5.0 - APLICAÇÃO

Para validar a metodologia proposta, foram realizados alguns testes, visando a obtenção dos parâmetros de qualificação, descritos na Seção 4.0, para o plano de recomposição fluente da área Capivara, mencionada anteriormente.

5.1 Resultados das Etapas A e B

As instruções operativas que compõem o plano de reenergização da área Capivara, descritas anteriormente pela Tabela 1, podem ser representadas na forma de uma lista de atividades, previamente apresentada na Tabela 2 da Seção 2.0. A lista de atividades obtida na Etapa A foi utilizada como entrada de um algoritmo computacional, implementado na linguagem Java, capaz de gerar de forma automática o grafo CPM/PERT relacionado ao plano de recomposição dessa área. Esse grafo foi previamente apresentado na Figura 2 da Seção 2.0. Para proceder a Etapa C, é necessário estabelecer as informações sobre a duração das atividades, o montante de carga recomposta e as diferentes parcelas de consumidores referentes a cada uma dessas cargas. Quanto à duração das atividades, na ausência de especificação mais detalhada nas instruções operativas, assumiu-se as estimativas de tempo mais provável, pessimista e otimista, dados em unidades de tempo (u.t.), conforme a Tabela 4. Aplicando as equações (1) e (2), obteve-se os correspondentes valores de duração esperada e seu desvio padrão, representados nessa mesma tabela. Quanto ao montante de carga a ser recomposta e sua composição, as atividades que apresentam ações de retomada de carga foram consideradas conforme a Tabela 5. Finalmente, os custos unitários da interrupção foram extraídos da Tabela 3, descrita anteriormente, admitindo a unidade de tempo equivalente a um minuto (u.t. = 1 min.).

5.2 Resultados da Etapa C:

A Figura 4 ilustra o grafo obtido para o plano de recomposição em análise, considerando-se, também, a representação, através dos rótulos situados imediatamente acima ou abaixo de cada nó, dos tempos estimados para o início de cada uma das atividades (primeiro número do rótulo), conjuntamente com seu respectivo desvio padrão (segundo número do rótulo). É importante ressaltar que, neste trabalho, foram considerados apenas os tempos mais cedo para o início das atividades, uma vez que as ações de recomposição possuem urgência para sua execução e, portanto, não existe interesse em levar em conta possíveis folgas no processo. Conforme descrito na Seção 4.0, a **duração total do plano de recomposição** corresponde ao tempo mais cedo calculado para a última etapa (nó final). Assim, analisando a Figura 4, pode-se concluir que a duração total do plano é de 93,5 u.t., com desvio padrão de 9,27 u.t. O Teorema do Limite Central (6) garante que essa duração possui distribuição de probabilidade aproximadamente normal, a despeito das durações de cada atividade possuírem distribuição de probabilidade beta. Dessa maneira, pode-se construir uma tabela que representa a

probabilidade de atingir a conclusão do plano em diferentes horizontes de tempo, conforme a Figura 5 – (a). O **número de atividades paralelas** foi calculado de acordo com a metodologia descrita no item 4.2. A Figura 4 ilustra os sucessivos cortes efetuados no grafo em estudo através de linhas pontilhadas associadas a diferentes tempos transcorridos desde o início do processo de recomposição. Assim, foi possível a obtenção da Figura 5 – (b) que apresenta a evolução do número de atividades paralelas durante o processo de recomposição. Através da correspondência existente entre os dados da Tabela 5 e os tempos nos quais as atividades representadas nessa tabela são concluídas, pode-se construir curvas temporais de carga recomposta, conforme as Figuras 6 – (a), (b) e (c). A partir dessas curvas pode-se, então, determinar, para cada tipo de consumidor, a **evolução da carga interrompida** ao longo da recomposição, dada pelas Figuras 6 – (d), (e) e (f). Finalmente, com base na Tabela 3, na curva de carga interrompida e na metodologia descrita no item 4.4, pode-se determinar o **custo total da interrupção**, através da avaliação da energia interrompida. Os custos assim calculados, descritos na Figura 5 – (c), correspondem a um prejuízo que supera 650 mil dólares, considerando-se o início da interrupção às 20 horas.

TABELA 4 - Duração de atividades para reenergização fluente da área Capivara

Ativ.	t_m (u.t.)	t_p (u.t.)	t_o (u.t.)	t_e (u.t.)	σ_e (u.t.)	Ativ.	t_m (u.t.)	t_p (u.t.)	t_o (u.t.)	t_e (u.t.)	σ_e (u.t.)
A	40	80	30	45	8,33	I	5	9	2	5,16	1,17
B	5	10	3	5,5	1,17	J	1	3	0,5	1,25	0,41
C	5	8	3	5,16	0,83	K	5	7	4	5,16	0,5
D	1	2	0,5	1,08	0,25	L	5	8	2	5	1
E	5	8	3	5,16	0,83	M	1	2	0,5	1,08	0,25
F	20	30	10	20	3,33	N	15	17	14	15,16	0,5
G	1	2	0,5	1,08	0,25	O	5	8	3	5,16	0,83
H	40	60	30	41,66	5	P	5	10	2	5,33	1,33

TABELA 5 – Montantes e composição de carga a ser recomposta

Atividade	Montante de Carga	Composição da Carga
B	120 MW	40 MW residencial, 40 MW industrial, 40 MW comercial
I	80 MW	40 MW residencial, 20 MW industrial, 20 MW comercial
N	65 MW	15 MW residencial, 30 MW industrial, 20 MW comercial
P	80 MW	30 MW residencial, 30 MW industrial, 20 MW comercial

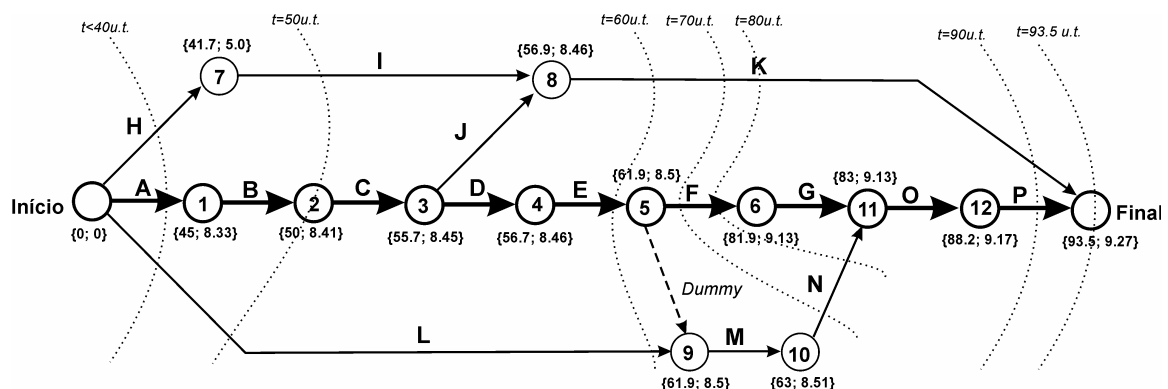
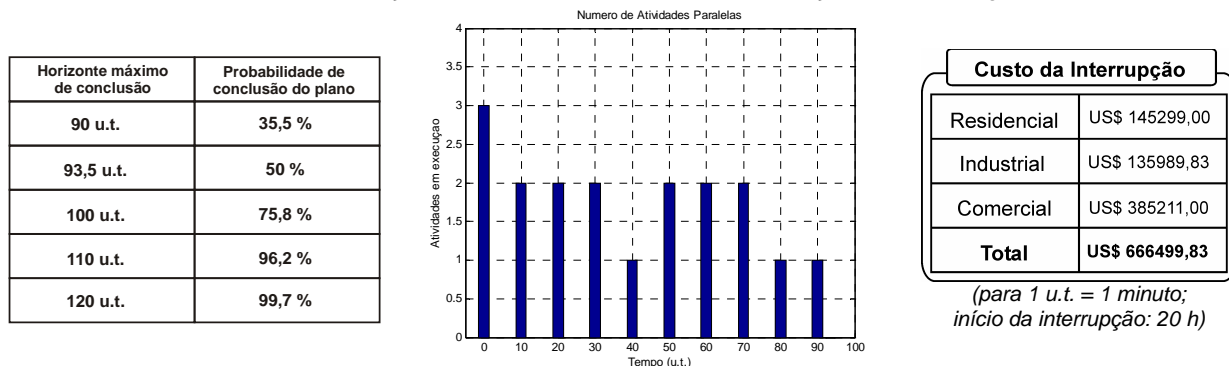


FIGURA 4 - Durações das etapas do plano de recomposição e cortes no grafo



(a)

(b)

(c)

FIGURA 5 - Resultados da análise de duração, atividades paralelas e custo da interrupção

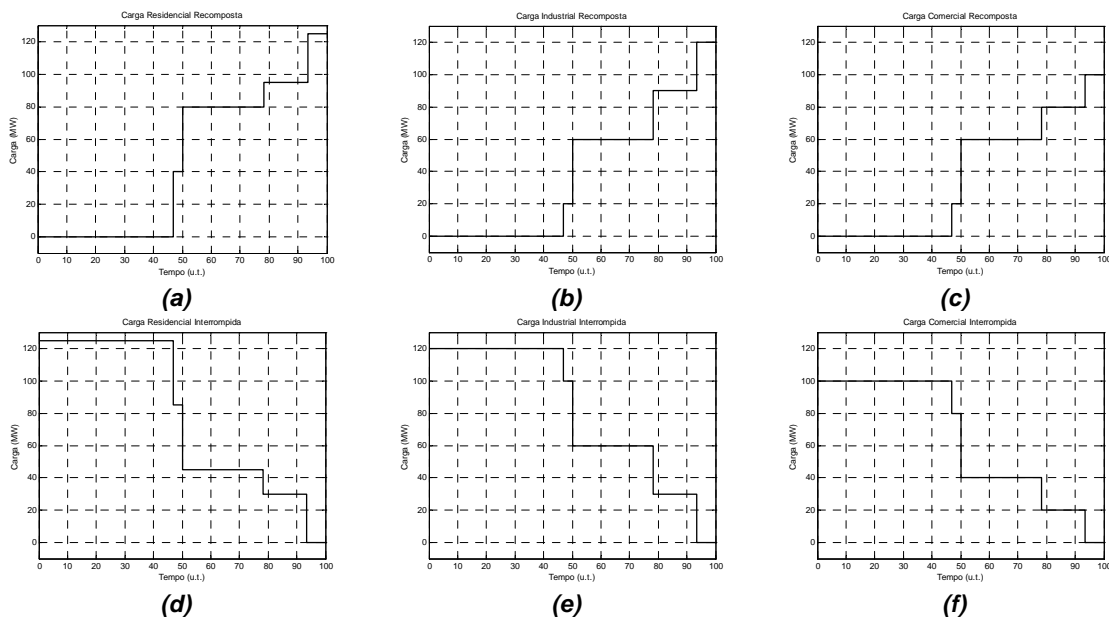


FIGURA 6 - Curvas de carga recomposta e interrompida para diferentes consumidores

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho propôs uma metodologia para modelar e analisar a qualidade de planos de recomposição, caracterizada segundo alguns critérios representativos. Esses critérios correspondem à duração total do plano de reenergização, considerando as incertezas associadas à duração de cada atividade que compõe esse plano; a eficiência da fase fluente, em termos do número de atividades que podem ser desempenhadas simultaneamente durante o processo de restabelecimento de energia; a evolução da carga interrompida ao longo do tempo e o custo total da interrupção. Uma constatação interessante é que o método proposto é capaz de estimar a energia interrompida, através da integração numérica das curvas de carga interrompida, para os diferentes tipos de consumidores, nas diversas faixas de tempo que caracterizam os custos de interrupção. Isso vem preencher uma lacuna ainda existente no setor de energia elétrica, do ponto de vista metodológico, conforme salienta a referência (4).

A avaliação da qualidade dos planos de recomposição é baseada tanto na modelagem do plano segundo um grafo orientado (no qual as atividades de recomposição correspondem aos arcos e os estágios desse processo correspondem aos nós do grafo) quanto na aplicação de métodos de caminho crítico (tipo CPM/PERT). Os índices obtidos são numéricos e podem ser associados a uma representação gráfica do plano (o grafo CPM/PERT). Consequentemente, essa representação facilita a análise da qualidade do plano por parte da equipe de planejamento, em base comparativa com outras propostas de reenergização para um mesmo cenário de interrupção.

Finalmente, aproveitando-se do formato tabular das instruções operativas, os parâmetros descritos podem ser obtidos de maneira procedural. Assim, a metodologia proposta pode ser facilmente incorporada a um aplicativo computacional, servindo, portanto, como ferramenta de apoio na tomada de decisões, tanto na fase de planejamento da recomposição quanto na reconstrução dos eventos que levaram à interrupção.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Adibi M. M., "Power System Restoration – Methodologies and Implementation Strategies", IEEE Press, 2000.
- (2) ONS, "Procedimentos de Rede: Módulo 10", em <http://www.ons.org.br/ons/procedimentos/index.htm>.
- (3) Mota A. A., Mota L. T. M., França A. L. M., "Metodologia Orientada a Objetos para Construção Automática de Grafos CPM/PERT", XXXVI SBPO 2004, São João Del-Rei (MG).
- (4) Gomes P., Schilling M. Th., "Custo de Interrupção: Conceituação, Metodologia de Avaliação, Valores Existentes e Aplicações", XIV SNPTEE, 1997, Belém (PA).
- (5) ONS, "Estudos Elétricos, Ferramentas e Esquemas de Suporte à Operação", 1º SPTO, 2004.
- (6) Moder J. J., Phillips C. R., "Project Management with CPM and PERT", New York, 1970.
- (7) Sivazlian B. D., Stanfel L. E., "Optimization Techniques in Operations Research", Prentice-Hall, 1975.
- (8) Fairley P., "The Unruly Grid", IEEE Spectrum, Agosto, 2004.
- (9) Mota A. A., Mota L. T. M., França A. L. M., "Dynamic Evaluation of Reenergization Times during Power Systems Restoration", IEEE PES T&D Latin America 2004, São Paulo (SP).