



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

BR/GSE/29
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**ANÁLISE COMPARATIVA PARA TOMADA DE DECISÃO NA ESCOLHA DA TECNOLOGIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE NOVAS SUBESTAÇÕES.**

Luciana Martins de Albuquerque (*) **Fabio Nepomuceno Fraga**
Chesf **Chesf**

Antônio Varejão de Godoy **Alexandre de Barros Arcon**
Chesf **ABB**

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estabelecer um procedimento comparativo para a tomada de decisão quanto à utilização de subestações convencionais ou compactas híbridas. A escolha por subestações convencionais ou compactas tem sido foco de freqüentes questionamentos nas áreas de estudos da expansão da transmissão, nas diversas empresas do setor elétrico brasileiro, em especial na CHESF.

PALAVRAS-CHAVE

Subestações, Tecnologia, Confiabilidade, Desempenho, Custos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os estudos para avaliar a substituição de subestações convencionais por subestações compactas (híbridas ou blindadas a gás) tem ganho cada vez mais destaque entre as empresas que compõem o Setor Elétrico Brasileiro, inclusive sendo indicadas como solução pela ANEEL/EPE em editais de transmissão.

A escolha da tecnologia de implantação de subestações envolve diversas questões e requer análise criteriosa. As diversas categorias de subestações apresentam características distintas (custos, impactos ambientais, aspectos técnicos, operacionais, entre outros), que merecem ser estudadas para viabilizar uma escolha adequada.

A proposta desse trabalho é apresentar uma avaliação dos aspectos que envolvem a escolha de uma subestação compacta híbrida em substituição a uma subestação convencional, alcançando a melhor solução técnico-econômica. As equipes de projeto devem considerar também aspectos o crescimento do mercado de energia na região onde a subestação será instalada.

A aplicação de tecnologia híbrida permite economia de espaço com consequente diminuição de obras civis e menor utilização de estruturas metálicas, além de tempo de montagem menor.

(*) Rua Delmiro Gouveia, Nº 333, Ed. André Falcão - DEPS - Bloco D - Sala 218 - Bongí - CEP: 50761-901 - Recife - PE - Brasil
Tel.: (+55 81) 3229-3042 - Fax: (+55 81) 3229-3228 - Email: lconde@chesf.gov.br

2.0 - SUBESTAÇÕES – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A função ou tarefa mais importante das subestações é garantir a continuidade com a máxima segurança de operação e confiabilidade dos serviços dos sistemas elétricos. As partes defeituosas ou sob falta devem ser desligadas imediatamente e o abastecimento de energia deve ser restaurado por meio de comutações ou manobras.

Existem diversos critérios para classificação de uma subestação, quais sejam: Tipo de Instalação, Tensão de Operação, Tipo de Arranjo, Tipo Construtivo dos Equipamentos, entre outros. A classificação quanto ao Tipo Construtivo dos Equipamentos é de grande relevância para esse artigo, visto que as análises comparativas serão realizadas considerando subestações convencionais e subestações híbridas.

3.0 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS TIPOS DE SUBESTAÇÕES

Para a análise entre os tipos de subestações, o CIGRÉ adota os seguintes fatores para orientar fabricantes e concessionárias na escolha correta da tecnologia de uma subestação:

Fator Meio-Ambiente

Aspectos a considerar:

- Licença prévia: a sua obtenção para implantação de um empreendimento depende do impacto que ele causará ao meio-ambiente, que pode ser avaliado por estudos de impacto ambiental relativos ao empreendimento.
- Impacto Visual: Subestações convencionais normalmente oferecem impacto maior, devido à ampla área a ser ocupada e à exposição dos equipamentos ao tempo. A necessidade de minimizar os impactos visuais se deve ao fato da sua influência no valor dos imóveis adjacentes. Nas subestações híbridas o impacto é reduzido quando comparado as subestações convencionais.
- Ruídos: A subestação blindada praticamente elimina este problema. No caso das subestações convencionais, os ruídos podem ser minimizados com a aquisição de transformadores de baixo nível de ruído. Nas híbridas, esse problema é reduzido por que parte dos equipamentos é encapsulada.
- Poluição Atmosférica e Clima: O clima pode ter grande influência nas áreas onde haja alto nível de precipitação, que juntamente com a poluição poderá diminuir o nível de isolamento dos equipamentos. As subestações convencionais ficam em desvantagem sob esse aspecto, bem como em áreas onde se verifica um alto nível de poluição atmosférica. Nesses casos, pode implicar maior necessidade de limpeza e manutenção dos equipamentos expostos, evitando problemas operacionais. Nos equipamentos isolados a gás, esse problema não é verificado em função do encapsulamento.
- Interferências Eletromagnéticas: Melhor desempenho para as subestações compactas, seguido pelas híbridas. O pior desempenho nesse aspecto é da subestação convencional.

Fator Espaço

Aspectos a considerar: grau de ocupação da região, regularidade do terreno, possibilidade de verticalização da SE para futuras expansões, disponibilidade de área para construção de uma subestação convencional.

Quanto ao espaço, as subestações blindadas ocupam cerca de 40% da área de uma subestação convencional, enquanto as híbridas ocupam cerca de 60% (ver Figura 4). Em centros urbanos, esse fator é preponderante. Uma subestação que necessita de uma menor área para implantação torna-se mais adequada também quando os terrenos disponíveis são irregulares e a necessidade de terraplenagem ou de muros de arrimo encarecem a obra.

Fator Custos

Aspectos a considerar: custo do investimento (construção da subestação e metro quadrado do terreno), custo de operação, custos de manutenção.

- Custos de Investimentos: tomando como referência o custo de uma subestação convencional, a subestação híbrida apresenta investimento inicial superior. Esse aspecto torna a subestação convencional mais atrativa.
- Custos Operacionais: As subestações híbridas apresentam vantagem quanto à automação dos equipamentos, pois os equipamentos encapsulados já acoplam aos dispositivos de automação.
- Custos de Manutenção: Nas subestações híbridas os custos de manutenção são cerca de 30% dos custos de uma subestação convencional.

A Figura 1 a seguir apresenta uma comparação em relação aos custos de implantação, operação e manutenção de uma subestação convencional e uma subestação híbrida.

Comparações Simples em Termos Econômicos Híbrida x Convencional

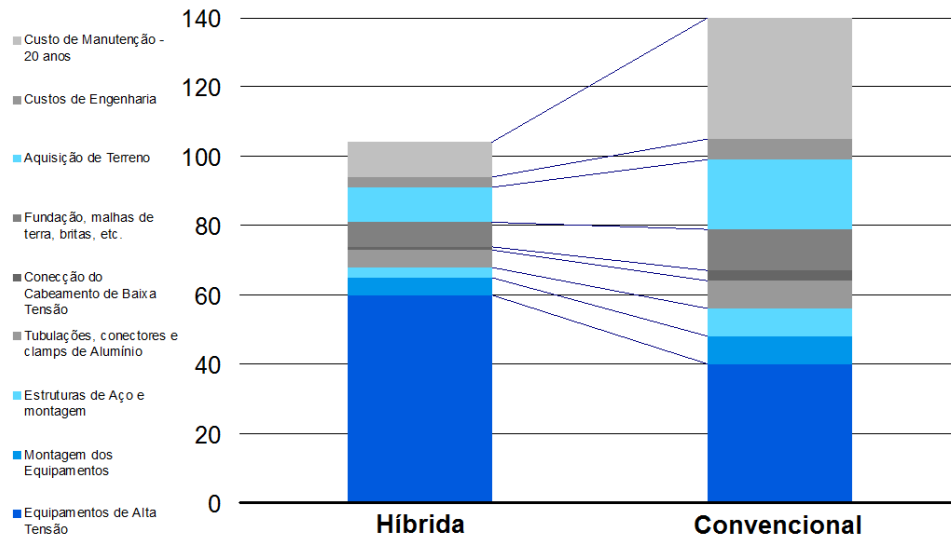


Figura 1 - Análise comparativa percentual dos custos de implantação de uma subestação convencional e uma subestação com tecnologia híbrida

Fatores Técnicos

Aspectos a considerar:

- Flexibilidade das Subestações para Manobras: Não se observam vantagens significativas dentre os tipos de subestações. O arranjo escolhido deverá prover as manobras necessárias.
- Segurança: A implantação de subestação híbrida apresenta grande vantagem, pois o encapsulamento dos componentes minimiza inclusive os riscos de acidentes. Caso a subestação esteja localizada em região sujeita a vandalismo, a blindagem será bastante indicada.
- Previsão de expansões: Nas subestações isoladas e híbridas, existe a possibilidade de verticalização da subestação, o que minimiza a demanda de espaço para ampliações.
- Grau de importância: A depender da importância da subestação a ser implantada para sistema elétrico, justifica-se o investimento em uma subestação compacta, híbrida ou isolada a gás.
- Confiabilidade: As soluções isoladas a gás (GIS) e híbridas apresentam grande vantagem com relação às soluções convencionais quando se avaliam aspectos relacionados à Confiabilidade, tais como frequência de interrupções e disponibilidade.

4.0 - EQUIPAMENTO HÍBRIDO DE ALTA TENSÃO

Pela definição "compact switchgear assemblies" são conjuntos compactos de equipamentos de manobra.

Os fabricantes de equipamentos buscam alternativas para a compactação da subestação através de soluções convencionais, blindadas isoladas a gás SF6 (GIS) e equipamentos com tecnologia híbrida. Porém, a alta compactação aliada ao custo são fatores preponderantes na escolha da tecnologia híbrida. Essa tecnologia promove a compactação por meio da disposição de equipamentos de manobra e medição em módulos compactos isolados a gás SF6 e permite a conexão externa com equipamentos isolados a ar. A compactação obtida não é maior do que oferecida por uma subestação GIS, entretanto seu custo é menor. Esta tecnologia ocupa uma área menor que uma subestação convencional, tornando-se uma solução atraente para aplicação em locais de grande concentração urbana e onde as questões estéticas, ambientais e de aquisição de terreno são pontos preponderantes.

A grande vantagem na utilização desse tipo de solução em relação às alternativas convencionais, além do ganho de espaço físico, está na flexibilidade de conexão dos módulos compactos da maneira que seja mais conveniente, conseguindo soluções específicas de arranjos em função das condições de espaço ou disposição dos circuitos de alimentação e demais equipamentos da subestação.

No equipamento híbrido os módulos são compostos de invólucros de gás separados. Cada invólucro abriga todos os dispositivos de manobra para cada fase: disjuntores, seccionadores e chave de aterramento, além de dispositivos de medição (transformadores de corrente) que podem ser adicionadas nas buchas de cada invólucro.

Devido ao seu *design* compacto, esse equipamento oferece mais do que simplesmente a economia de espaço. Também existem vantagens importantes a serem levados em consideração: o requisito para reduzir consideravelmente o metro quadrado de instalação é devido à combinação de todas as funções de desligar e desconectar em uma única unidade, minimizando também as despesas de construção civil. Esta unidade é de fácil transporte e instalação, reduzindo os custos de engenharia e o tempo total para instalação da subestação como podemos ver na Figura 2. Devido ao total encapsulamento em SF₆, a manutenção é simples e com intervalos maiores em comparação com outros equipamentos de manobra.

Montagem, Instalação e Comissionamento

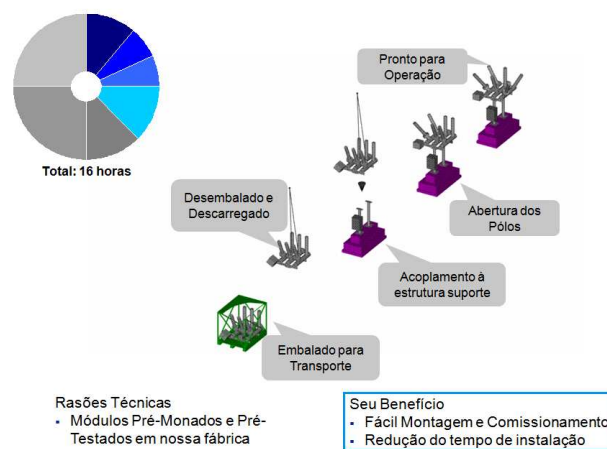


Figura 2 – Tempo médio para montagem de um módulo híbrido novo

O projeto do encapsulamento também aumenta a confiabilidade operacional e de segurança em condições ambientais severas, sendo especialmente adequado para ambientes empoeirados ou corrosivos e climas extremos.

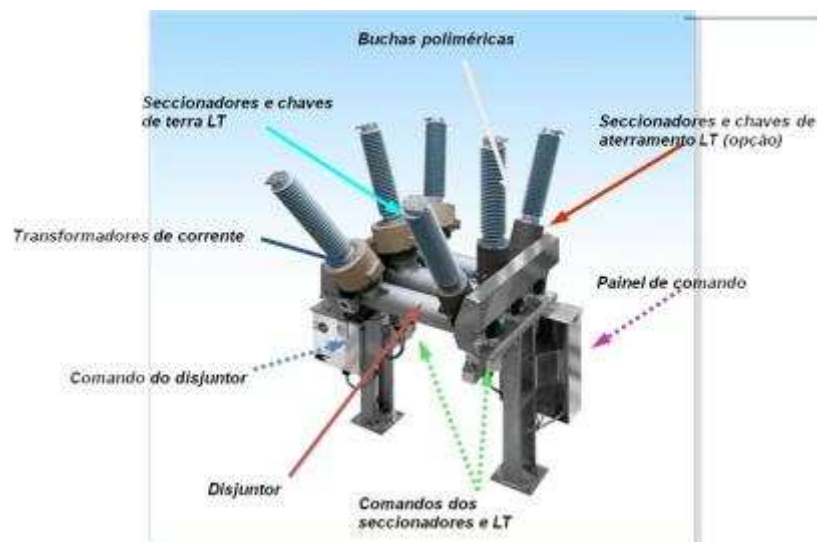


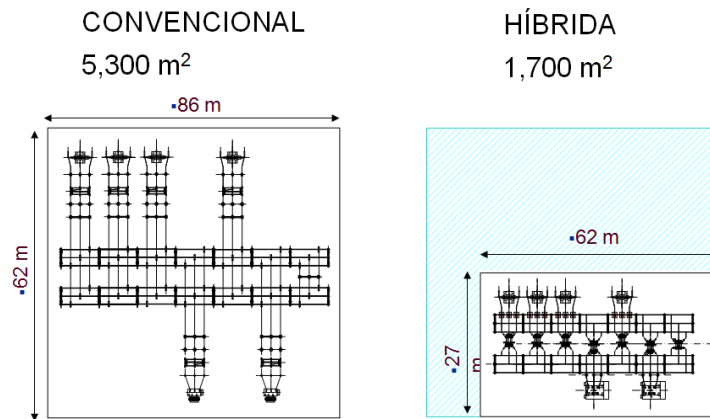
Figura 3 – Módulo Híbrido e seus componentes

A solução híbrida tem atendido as principais questões enfrentadas pela área de engenharia, tais como: Mais circuitos (bays) em menor espaço; layout mais simples; rápido tempo de instalação; alta padronização e modularidade; redução das obras de construção civil; transporte facilitado, dimensões predefinidas; facilidade de comissionamento.

Em um pátio instalado um conjunto completo de equipamentos necessário para uma conexão de linha, o equipamento híbrido obtém uma redução maior que 50%.

A figura abaixo ilustra um comparativo não somente do equipamento mas também os espaços necessários entre um equipamento e outro.

Comparações Gerais em Termos de Espaço Redução de Espaço em 70%



Barra Dupla (04 bays linha, 02 bays de trafo, 01 barramento de interconexão)

Figura 4 - Análise comparativa das áreas para implantação de uma subestação convencional e uma subestação com tecnologia híbrida

A figura abaixo mostra o equipamento híbrido de 230 kV e suas dimensões.

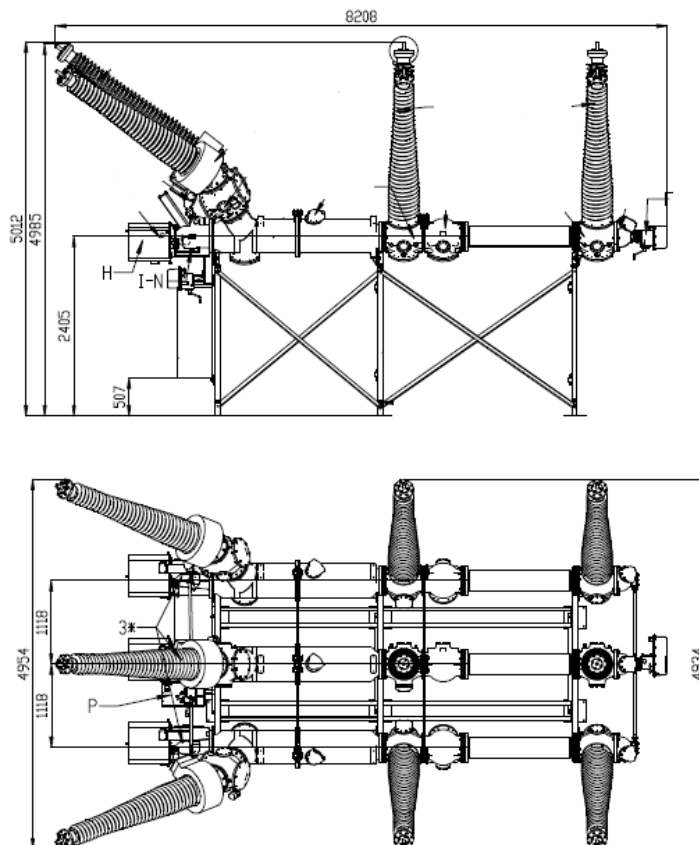


Figura 5 – Dimensões do Módulo Híbrido da ABB 230 kV – Barra dupla a três chaves

Na sessão pública ocorrida em 16 de dezembro de 2011, no recinto da BM&BOVESPA, São Paulo – SP, a Chesf arrematou o Lote B do Leilão ANEEL 006/2011, o qual contempla as Subestações de Maceió II, Nossa Senhora do Socorro e Poções II, respectivamente situadas nos Estados de Alagoas, Sergipe e Bahia. A Chesf firmou contrato com a empresa ABB para o projeto, fornecimento e construção das subestações em foco.

Após tratativas de cunho técnico, a Chesf e a ABB verificaram a oportunidade de aplicar para estes empreendimentos uma solução de melhor confiabilidade e disponibilidade. Trata-se da aplicação da tecnologia com módulo híbrido a qual consiste de módulos isolados em SF6, sendo denominado sistema híbrido à SF6.

Como respaldo contratual para esta opção, encontramos no item 1.1.2 – Configuração Básica, página 109, volume III do Anexo 6B – Lote B, Edital de Leilão Nº 06/2011 – ANEEL, o que segue:

“A utilização pelo empreendedor de outras soluções, que não a de referência, fica condicionada à demonstração de que a mesma apresente desempenho elétrico equivalente ou superior àquele proporcionado pela alternativa de referência.”

Reforçando a tomada de decisão, encontramos no Procedimento de Rede elaborado pelo ONS, Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos, Submódulo 2.3, Revisão 2.0, item 6.1.2 Instalações da Subestação, Arranjo de barramento, Condições especiais, página 5/18, o que segue:

“6.1.2.1 Arranjos de barramento alternativos podem ser utilizados, inclusive os de tecnologia com isolamento em SF6, desde que apresentem desempenho igual ou superior ao dos arranjos estabelecidos no item 6.1.1.1 deste submódulo, o que deve ser comprovado pelo agente por meio de estudos de confiabilidade e disponibilidade (saída forçada e programada).”

Originalmente as subestações foram concebidas atendendo a configuração mínima exigida pelos Procedimentos de Rede, ou seja, barra dupla a quatro chaves. Foram elaborados estudos que demonstraram que a solução proposta apresenta um desempenho elétrico superior a solução com tecnologia convencional.

5.1 Estudos de Avaliação da Solução Híbrida

O estudo teve como objetivo fazer uma comparação técnica, do ponto de vista de confiabilidade do sistema elétrico, entre possíveis soluções para os pátios de 230 kV, 138 kV e 69 kV das Subestações Poções II, Maceió II e Nossa Senhora do Socorro, pertencentes ao Lote B, Leilão ANEEL 006/2011, vencido pela Chesf, justificando-se a adoção de tecnologia híbrida para os equipamentos de alta tensão. Para tanto, foram analisadas duas configurações:

- Barra Dupla a 4 chaves (BD4) com equipamentos convencionais isolados em ar (AIS) para os pátios de 230 kV e 138 kV, e Barra Principal e Transferência (BPT) para o pátio de 69 kV;
- Barra Dupla a 3 chaves (BD3) com os equipamentos híbridos para os pátios de 230 kV, 138 kV e de 69 kV.

Do ponto de vista técnico, a comparação em questão mostrará as diferenças para cada solução em relação à confiabilidade quanto à função de suprimento de energia, isto é, continuidade da alimentação desde as entrada em 230 kV até as saídas em 138 / 69 kV para as LT, e também quanto à função de transferência de energia, isto é, continuidade da alimentação via linha de transmissão 230 kV, que passa pelas subestações sob análise como um entra-e-sai. Com o objetivo de exemplificar os resultados obtidos apresentaremos a seguir o estudo realizado para a subestação de Nossa Senhora do Socorro. Foram assumidas duas configurações básicas:

- a) Configuração 3.1: Barra Dupla a 4 Chaves (BD4) para o pátio de 230 e Barra Principal e Transferência (BPT) para o pátio de 69 kV, utilizando equipamentos convencionais (Disjuntores, Chaves, PR, TC e TP em 230 / 69 kV). Este foi o arranjo definido inicialmente para a subestação;
- b) Configuração 3.2: Barra Dupla a 3 Chaves (BD3), para os pátios de 230 e 69 kV, utilizando o equipamento híbrido de 230 kV e 69 kV, que agrega as funções de disjuntor, chave e chave de terra no mesmo equipamento, os quais ficam imersos em um meio comum em gás SF6 (apenas as buchas do equipamento são isoladas em ar), além de TC de bucha convencionais.

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos nas simulação para as funções de suprimento de energia e função de transferência de energia.

Comparando-se os resultados das configurações 3.1 e 3.2, observa-se uma significativa queda na frequência de falhas do sistema, quando se utiliza o equipamento híbrido (o MTBF passa de 1,0 anos para 9,4 anos para a função suprimento e de 1,6 anos para 11,3 anos para a função transferência), o que implica uma redução na indisponibilidade do sistema devido a desligamentos forçados, da ordem de 8 vezes para a função de suprimento e 3,5 vezes para a função de transferência de energia. Da mesma forma, verifica-se uma diminuição na frequência de interrupções devido a manutenções programadas, da ordem de 8 vezes para a função de suprimento e 12 vezes para a função de transferência, bem como no tempo em que o sistema ficaria indisponível (redução de 1,6 h para 0,5 h por ano para função de suprimento e de 4,8 h para 1 h para a função transferência).

Tabela 1 – Resultados das simulações de confiabilidade

| Função Suprimento de Energia | | | | | | | | |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Config. | f (1/ano) | A' (h/ano) | f_M (1/ano) | A'_M (h/ano) | f_T (1/ano) | A'_T (h/ano) | A'₃₀ (h) | MTBF (anos) |
| 3.1 | 1,0519 | 1,2896 | 0,4000 | 1,6000 | 1,4519 | 2,8896 | 86,7 | 1,0 |
| 3.2 | 0,1069 | 0,1659 | 0,0500 | 0,5000 | 0,1569 | 0,6659 | 20,0 | 9,4 |
| Função Transferência de Energia | | | | | | | | |
| Config. | f (1/ano) | A' (h/ano) | f_M (1/ano) | A'_M (h/ano) | f_T (1/ano) | A'_T (h/ano) | A'₃₀ (h) | MTBF (anos) |
| 3.1 | 0,6148 | 1,1893 | 1,2000 | 4,8000 | 1,8148 | 5,9893 | 179,7 | 1,6 |
| 3.2 | 0,0888 | 0,3335 | 0,1000 | 1,0000 | 0,1888 | 1,3335 | 40,0 | 11,3 |

Onde:

| | |
|------------------|--|
| f | Frequência de interrupção devido a falhas |
| A' | Indisponibilidade devido a falhas |
| f _M | Frequência de interrupção devido à manutenção (programada) |
| A' _M | Indisponibilidade devido à manutenção (programada) |
| f _T | Frequência de interrupção total |
| A' _T | Indisponibilidade total |
| A' ₃₀ | Indisponibilidade total durante a vida útil da subestação |
| MTBF | Mean Time Between Failure (= 1/f) |

6.0 - CONCLUSÕES

A aplicação de tecnologia híbrida permite economia de espaço com conseqüente diminuição de obras civis e menor utilização de estruturas metálicas, mantendo a mesma funcionalidade das subestações convencionais, porém com tempo de implantação menor. Além disso, permite alta modularidade e flexibilidade graças à disponibilidade de combinações e opções. Este tipo de solução pode ser a única viável tecnicamente quando as questões de espaço físico são decisivas e extremamente competitivas quando a questão de custo da área for levada em consideração.

Do ponto de vista da confiabilidade, conforme apresentado no item 5.1, conclui-se que a melhor solução para os pátios de 230 kV, 138 kV e 69 kV das subestações Poções II, Maceió II e Nossa Senhora do Socorro, dentre as opções analisadas, é indubitavelmente a solução com equipamentos híbridos em arranjo barra dupla a três chaves, a qual proporciona os melhores índices de confiabilidade e, portanto, a menor frequência de interrupções e a maior disponibilidade do sistema quando comparado ao arranjo em barra dupla a quatro chaves / barra principal e transferência com equipamentos convencionais.

Do ponto de vista do empreendimento, houve um ganho no prazo contratual com a ABB para implantação de cada uma das subestações, um ganho na expectativa de disponibilidade das instalações e conseqüentemente uma diminuição da expectativa de pagamento de parcela variável contribuindo assim para um melhor resultado do empreendimento, inclusive do ponto de vista financeiro.

Todos os estudos foram encaminhados para a ANEEL, que em 01 de março de 2013 publicou na Seção 1 da página 41 do Diário Oficial da União o despacho da Superintendência de Concessões e Autorizações de Transmissão e Distribuição, sob o número 539, dando anuência a alternativa técnica proposta pela Chesf referente ao arranjo das subestações em foco, com módulos híbridos isolados a SF6.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) D. Meireles, M. H. Murta Vale, A. N. Cortez, "Avaliação da Substituição de Subestações de Distribuição Convencionais por Subestações Compactas Isoladas a Gás em Centros Urbanos" - THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, 2009.
- (2) A. Mantovani, A.Yamashita, D.Silva, E.Prado, J.Gonçalves, R.Souza, Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Bandeirante de São Paulo, como exigência do Curso de Engenharia Elétrica, 2010.
- (3) Estudo de Confiabilidade – CHESF LOTE B 006/2011 SE Poções II, Maceió II e N.Sra. do Socorro, Nº Doc 1HBR44000630-100, Rev. 2, ABB 2012.
- (4) THE IMPACT OF NEW FUNCTIONALITIES ON SUBSTATION DESIGN Working Group B3.01, Brochure 380, Cigré 2009.
- (5) COMBINING INNOVATION WITH STANDARDISATION Working Group B3.11, Brochure 389, Cigré 2009.
- (6) EDITAL DO LEILÃO Nº 06/2011, ANEEL, 2011.
- (7) Procedimento de Rede, Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos, Submódulo 2.3, Revisão 2.0, item 6.1.2 Instalações da Subestação, Arranjo de barramento, Condições especiais, página 5/18. ONS, 2011.