



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/06
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**RESERVA DE POTÊNCIA OPERATIVA E CONFIABILIDADE DA GERAÇÃO DE ITAIPU 50HZ NO ANO DO
RECORDE DE GERAÇÃO**

Renata B. R. Tufaille*
ITAIPU BINACIONAL

Rui J. G. C. Silva
ITAIPU BINACIONAL

Jercemil R. Ribeiro
ITAIPU BINACIONAL

Reinaldo A. Gonzalez-Fernandez
ITAIPU BINACIONAL

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise da reserva de potência operativa de Itaipu 50 Hz no ano em 2013 com o propósito de avaliar o desempenho da reserva de potência operativa dimensionada para o setor de 50 Hz. A análise comparou a reserva de potência operativa real com os valores alocados e utilizou uma ferramenta desenvolvida no MATLAB, cuja modelagem considera a convolução dos modelos de geração e de carga em base horária, para calcular os índices de confiabilidade resultantes da operação. Como resultados foram obtidos os índices de frequência e duração da geração não atender a carga, e o índice da expectativa de energia não suprida.

PALAVRAS-CHAVE

Itaipu Binacional, Confiabilidade da Geração, Frequência e Duração, Reserva de Potência Operativa, Análise de Desempenho.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma das atividades importantes no planejamento da operação de sistemas de potência é a determinação da capacidade de geração para o atendimento adequado e confiável aos clientes. Assim, o dimensionamento adequado da reserva operativa deve ser suficiente para contemplar as indisponibilidades forçadas de geração e de seus equipamentos, bem como os desvios de carga derivados de erros de previsão. Este artigo apresenta uma análise da reserva de potência operativa de Itaipu 50 Hz (1) no ano de 2013; ano em que a usina de Itaipu estabeleceu seu recorde anual de geração de energia atingindo aproximadamente 98,64 TWh, frente a uma energia assegurada de 75 TWh. O ano de 2013, portanto, se caracterizou pela maior utilização das unidades geradoras, com um maior nível de carregamento, maior número de partidas e paradas, tornando-se um caso de estudo apropriado para a reserva de potência operativa. O propósito da análise é avaliar o desempenho da reserva de potência operativa dimensionada para o setor de 50 Hz, utilizando-se indicadores de confiabilidade de curto prazo associados à operação da usina de Itaipu 50 Hz.

Para a análise de confiabilidade de curto prazo foi utilizada uma ferramenta (2) desenvolvida pela Itaipu em MATLAB, cuja modelagem considera a convolução dos modelos de geração e de carga em base horária, de forma a calcular os índices de confiabilidade; quer sejam, índices de frequência e duração no horizonte de curto prazo na fase transitória das probabilidades; índice da expectativa de energia não suprida, a semelhança do índice utilizado pelo ONS para dimensionar a reserva de potência operativa. A partir dos índices de confiabilidade obtidos para cada horário, será avaliado o montante da reserva operativa dimensionada e realizada ao longo do ano, sendo os riscos resultantes comparados com os critérios adotados pelo ONS (3). O desempenho da reserva operativa e os índices de confiabilidade associados serão apresentados e discutidos considerando os distintos cenários de operação verificados ao longo do ano, subsidiando, assim, um futuro debate sobre o que é aceitável para um sistema de geração no que tange ao montante da reserva operativa dimensionada. O debate pode ser estendido também para a

conveniência ou não, com base na confiabilidade, de parar ou de partir uma unidade geradora quando sua presença não é necessária para atender o programa de geração. Dessa maneira, os resultados obtidos permitem determinar o montante adequado de reserva operativa, girante ou parada, através da confiabilidade do sistema de geração.

A importância de debater o critério utilizado na determinação da reserva operativa é bem caracterizada com o exemplo de Itaipu 50Hz. O trabalho mostra que, na condição em que todas as unidades geradoras disponíveis estão sincronizadas e são necessárias para atender a programação de geração, o risco do sistema é independente se a usina está ou não atendendo a reserva recomendada, ou seja, é possível usar parte da reserva para atender a carga sem comprometer a confiabilidade do sistema. Entretanto, essa conclusão seria diferente se a reserva de potência operativa fosse definida pela expectativa de energia não suprida.

2.0 - MODELAGEM ESTOCÁSTICA DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ITAIPU

Para a modelagem do sistema de geração foram considerados cinco estados para cada unidade geradora, que são: funcionamento, falha, reserva, falha na partida e falha na parada. As taxas de transição foram obtidas de um estudo feito das unidades de Itaipu para os anos de 1984 a 2010 (4). O modelo Markoviano de cinco estados é apresentado na Figura 1. Estes estados contemplam a possibilidade de que unidades sincronizadas sejam desligadas intempestivamente, intencionalmente (por conveniência operativa) e que também existe uma determinada probabilidade de falharem na parada. De maneira semelhante, unidades em reserva podem ser comandadas para partir e sincronizar ao sistema, com certa probabilidade de falhar na partida.

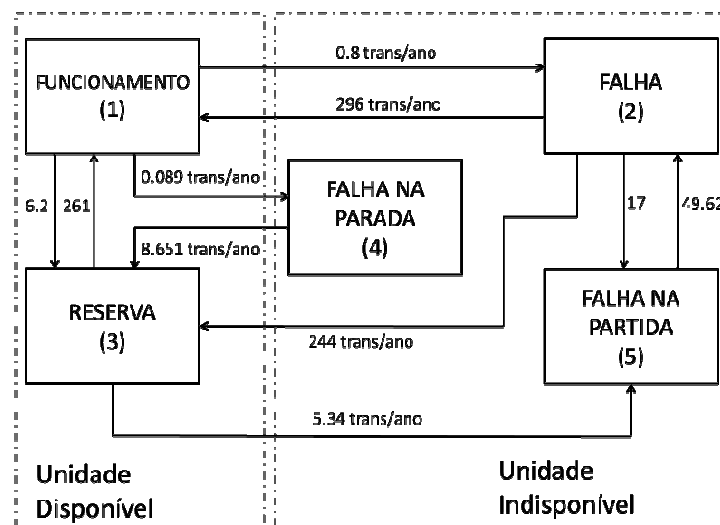


Figura 1—Modelo Markoviano de unidade geradora

Para modelar a incerteza associada ao nível de geração é necessário conhecer as probabilidades de falha das unidades geradoras sincronizadas, também a probabilidade de falha na partida, para as unidades que estão disponíveis em reserva, e a probabilidade de falha na parada, para as unidades que estão sincronizadas e podem não mais ser necessárias para o atendimento da demanda. Assim, o modelo estabelece as seguintes probabilidades estacionárias: probabilidade de falha de 0,27%; probabilidade de falha na partida de 2,0% e probabilidade de falha na parada de 1,4%. A partir do modelo determinam-se também as probabilidades transitórias da unidade se encontrar em cada um dos cinco estados, no caso do estudo, a cada 6 horas à frente, dado que seu estado no instante inicial é conhecido. Uma unidade que inicia o estudo no estado de funcionamento (Estado 1) pode falhar (Estado 2) ou ser desligada do sistema intencionalmente (Estado 3).

A modelagem da carga foi feita considerando o programa de geração previsto e o executado, em base horária. A partir do modelo da capacidade de geração e geração verificada foi aplicado o método da frequência e duração (1)-(2) para calcular os índices de confiabilidade do sistema de geração de Itaipu com os seguintes índices:

- **Risco:** estima a probabilidade de falhas do sistema de geração em um intervalo de tempo, calculado de acordo com a definição do método PJM, isto é, a partir da variação da probabilidade de falha do sistema em cada mudança de capacidade de geração ou de demanda. O risco é apresentado com o percentual do número de dias nos quais ocorreria falha no sistema. Em (1),(2) já foi mostrado que o Risco calculado de acordo o método PJM original não apresenta resultados consistentes quando se considera o desligamento intencional de unidades geradoras, desta forma ele não será utilizado neste trabalho;
- **Frequência:** representa o número esperado de falhas do sistema de geração, sendo composto pelo número de falhas devido à indisponibilidade forçada das unidades somado ao número de falhas devido ao crescimento da demanda. A Frequência é apresentada com base anual, ou seja, quantas falhas ocorreriam se as características do intervalo estudado permanecessem durante o ano. Também foi mostrado em (1),

(2) que este índice é equivalente ao Risco do método PJM, portanto, ele será utilizado para comparações com os estudos do ONS;

- **Duração:** É a quantidade esperada de tempo no qual o sistema se encontrará em falha, apresentada com base anual, ou seja, quantas horas por ano o sistema estaria em falha se as características do intervalo permanecessem durante o ano;
- **Energia Não Suprida:** Valor esperado da quantidade de energia que não será atendida no intervalo de estudo, em base anual.

Foram realizadas simulações de meia em meia hora, durante todo o ano de 2013, totalizando 17.520 intervalos simulados. Cada simulação analisou uma janela de cálculo de seis horas a frente daquele instante. Assim foram calculados os índices de confiabilidade para o período de seis horas considerando a condição de geração e carga que ocorreu nesse período, como se fosse à visão de quem estivesse operando o sistema naquele momento. Os índices refletem a confiabilidade de a geração atender a carga e são apresentados no item 5.

3.0 - RESERVA OPERATIVA

Um fator importante para a operação do sistema é a reserva operativa de geração, pois assim se garante o controle da frequência e da segurança operacional elétrica do Sistema Interligado Nacional. A reserva operativa é importante para compensar aumentos inesperados na demanda, saídas forçadas de unidades geradoras, entre outros eventos alheios à programação energética.

O Operador Nacional do Sistema – ONS que estabelece a quantificação e alocação da reserva entre as áreas do SIN (3), mas em termos gerais, adota-se o acréscimo de 5% à demanda máxima de cada região. Em 2013, a Usina de Itaipu operou durante 55% do tempo sem unidades geradoras paradas e disponíveis simultaneamente nos dois setores. No setor de 50Hz, objeto desta análise, este tempo foi de 88%, enquanto no setor de 60Hz foi de 61%.

A Figura 2 representa a curva de permanência da reserva operativa do 50Hz em 2013, sem unidades na reserva. Cabe observar que cerca de 50% do tempo a reserva operativa ficou menor que a potência nominal de uma unidade geradora, 700 MW, ou seja, esse foi o período em que o setor de 50Hz ficou exposto à não atender a carga se houvesse desligamento forçado de pelo menos uma unidade geradora.

A reserva operativa alocada em 2013 pelo ONS para o setor de 50Hz foi, em média, de 110MW, sendo 61 MW da parcela R1, referente a regulação da frequência, e o restante, que variou ao longo do ano, da parcela R2, referente a incerteza na geração e na carga. A reserva foi inferior ao valor alocado durante 2,25% do tempo, sendo ainda 0,15% do ano inferior ao valor da parcela R1.

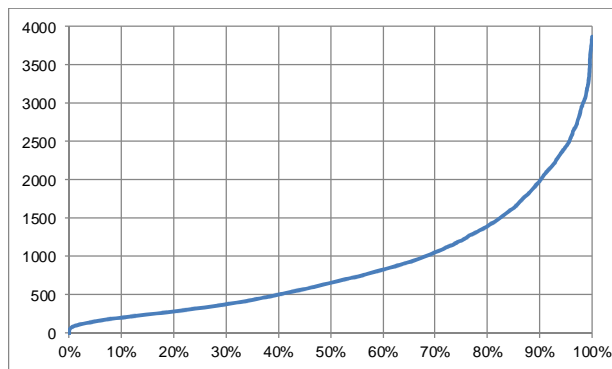


FIGURA 2 – Curvas de Permanência da Reserva operativa sem unidades em reserva do 50Hz em 2013

4.0 - A OPERAÇÃO EM 2013

A usina hidrelétrica de Itaipu possui 14GW de potência instalada, com 20 unidades geradoras de 700MW. Dez unidades operam em 60Hz enquanto as outras dez operam em 50Hz. A energia produzida no setor de 60Hz é transmitida pelo sistema de transmissão de 765kV para as regiões Sudeste e Sul do Brasil. A energia produzida no setor de 50Hz é transmitida para o Paraguai, por linhas de 500kV e 220kV, e para o Brasil, pelo sistema de transmissão em corrente contínua de Foz do Iguaçu. Em 2013 a produção da usina foi de 98.630 GWh, o que representa o abastecimento de 72% do mercado elétrico paraguaio e 17% do brasileiro.

Em 2013 na Usina de Itaipu, setor de 50hz, a distribuição da quantidade de unidades sincronizadas e em reserva é mostrada na Figura 3. Essa forma de distribuição foi resultado de 112 partidas/paradas de unidades geradoras, com três falhas durante a partida e sete falhas durante as paradas, também ocorreram 11 desligamentos forçados. Mais da metade das partidas/paradas de unidades geradora foi para atender o programa de carga, isto é, as unidades ficaram desligadas em reserva, disponíveis para operar, totalizando 63 desligamentos no ano. Cabe resaltar que

dos 11 desligamentos forçados quatro desligamentos resultaram em falha do sistema. Em relação as falhas na partida e na parada, nenhuma dela resultou em falha do sistema de geração em atender a carga.

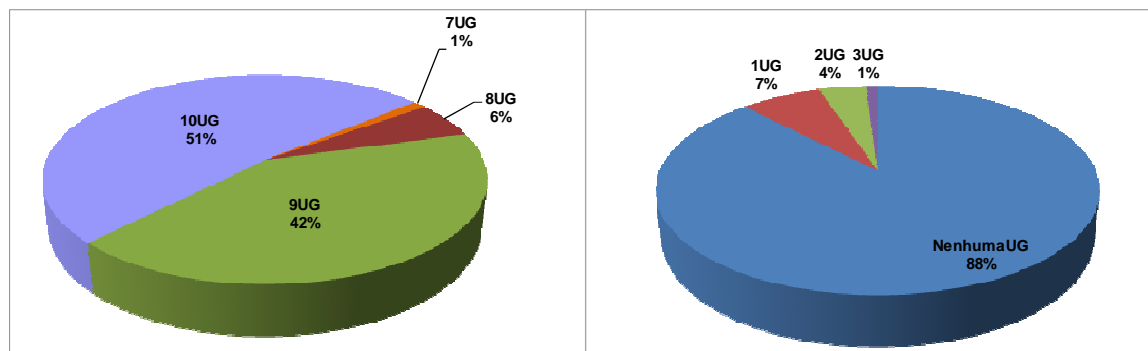


FIGURA 3 – Unidades sincronizadas e em reserva do 50 Hz em 2013

O resultado da operação de 2013 contabilizou para as unidades geradoras de Itaipu 50Hz: taxa de falha de 1,17 falhas/ano, taxa de reparo de 1.282 reparos/ano, probabilidade de falha de 0,09%; probabilidade de falha na partida de 2,7% e probabilidade de falha na parada de 6,3%. Ao comparar esses resultados com os dados utilizados no modelo, verifica-se que o modelo é pessimista quanto as falhas das unidades em operação e otimista em relação as falhas na partida e falhas na parada. Destaca-se que os parâmetros do modelo foram calculado no período de quatro anos para todas as unidades geradoras de Itaipu, de 50Hz e de 60Hz (4).

A Figura 4 apresenta a curva de permanência da geração de 50 e 60Hz em 2013. Em 80% do tempo a geração do setor de 50Hz ficou acima de 5.100 MW, sendo necessário de 9 a 10 unidades sincronizadas para atender o programa de carga a depender da queda bruta. Nesse tipo de operação procurou-se manter o despacho das unidades geradoras minimizando o consumo de água, ou seja, o mais próximo possível do ponto de maior rendimento.

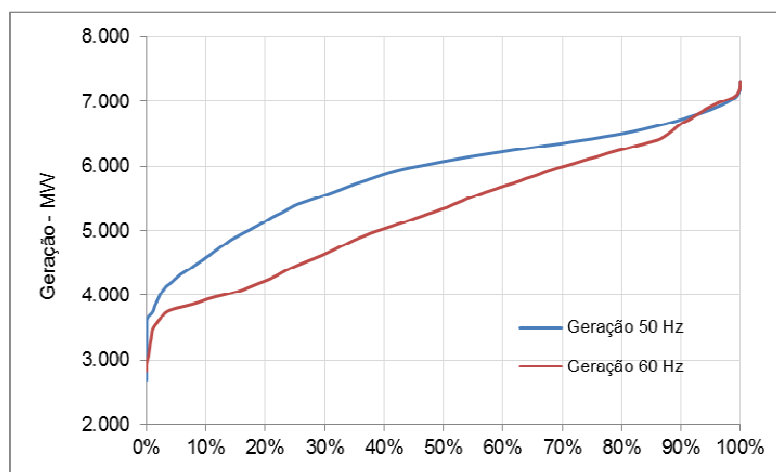


FIGURA 4 – Curvas de Permanência da Geração em 2013

5.0 - RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados dos índices de confiabilidade simulado e observado do setor de 50 Hz da UHE Itaipu para o ano de 2013.

Tabela 1 – comparação dos resultados

Índice	Observado	Simulado
Duração	8h15min /ano	11h54min /ano
Frequência	4,0 falhas/ano	6,8 falhas/ano
Energia não suprida	2.369 MWh	3.566 MWh

Diante dos resultados observa-se que os índices de confiabilidade simulados foram superiores aqueles realizados em 2013, ou seja, um sistema operando com um grau de confiabilidade menor. Essa diferença pode ser explicada, principalmente, pela diferença entre as taxas de transição utilizadas no modelo e as taxas de transição resultantes

da operação do setor de 50Hz em 2013. Entretanto, esses resultados podem balizar o estabelecimento de um critério para a determinação da reserva de potência operativa.

Um dos principais problemas associados a estudos de confiabilidade é o estabelecimento de um critério aceitável por todos os envolvidos com a operação do sistema. Diante do cenário de produção da UHE em 2013 e os resultados obtidos na Tabela 1 pode-se considerar que os riscos assumidos na operação foram aceitáveis para a confiabilidade do sistema. Dessa forma, cabe analisar o desempenho dos índices de confiabilidade em algumas condições específicas apresentadas a seguir.

5.1. Influência do montante da reserva de potência operativa

A condição mais crítica em relação à confiabilidade se dá quando as 10 unidades de 50Hz são necessárias para atender a carga. A Tabela 2 compara duas situações em que isso ocorre, uma delas atende o valor alocado pelo ONS e outra não.

Tabela 2 - Influência do montante da reserva de potência operativa

Dia [intervalo]	Reserva Alocada	Carga [MW]	Duração [horas/ano]	Frequência [falhas/ano]	Energia não suprida [MWh]
15.8 [06:30-12:30]	sim	6.778	21,1	7,6	5.191
15.8 [12:30-18:30]	não	6.864	21,1	7,6	7.634

Os resultados mostram que apenas a expectativa de Energia não suprida é influenciada pelo montante em reserva, não havendo, portanto, influencia dos indicadores de duração e frequência. Esses resultados levam a uma reflexão quanto ao indicador utilizado pelo ONS, o Risco do método PJM (1)-(2). Dado que o Risco é uma aproximação da Frequência, ele não é um bom indicador para dimensionar a reserva, já que neste caso específico foi mostrado que mesmo sem atender a reserva alocada é possível atender o critério do Risco.

Uma vez que a operação com dez unidades geradoras é aceita, a confiabilidade associada também é aceita e pode servir para balizar um critério. Dessa forma, para a operação de uma área específica do sistema, o risco pode ser maior que o risco assumido para todo o sistema. No caso de Itaipu 50Hz, pode-se aceitar operar, por exemplo, com o risco de ocorrerem até 8 falhas/ano no atendimento da carga, que essa falhas resultem em uma duração de até 22 horas/ano e que a expectativa de energia não suprida seja inferior a 7 GWh/ano.

5.2. Influência da reserva, sincronizada ou parada

Para avaliar essa influência foram comparadas quatro situações semelhantes:

- 10 unidades sincronizadas durante todo o período;
- 10 unidades sincronizadas, com desligamento de uma unidade para reserva no início do período;
- 10 unidades sincronizadas, com desligamento de uma unidade para manutenção no início do período;
- 9 unidades sincronizadas durante todo o período.

Em todos os casos o programa de carga poderia ser atendido com nove unidades geradoras. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Influência da reserva parada

item	Dia [intervalo]	Capacidade de Geração [MW]	Carga [MW]	Duração [horas/ano]	Frequência [falhas/ano]	Energia não suprida [MWh]
a)	6.1 [13:30-19:30]	7.000	6.193	0,03	0,02	9,9
b)	6.1 [13:30-19:30]	6.300+700	6.193	0,03	0,02	53
c)	6.1 [13:30-19:30]	6.300	6.193	19	6,83	3.007
d)	22.5 [13:00-19:00]	6.300+700	6.175	0,17	0,17	29,9

Os resultados mostram que tanto a reserva girante quanto a reserva parada resultam em indicadores de falha de valor desprezível quando comparados aos indicadores ocorridos na operação em 2013, isto é, uma unidade de reserva garante a segurança do sistema quer ela esteja parada, quer ela esteja sincronizada (reserva girante). Sendo assim, cabe o questionamento se a parcela R2 da Reserva de Potência Operativa pode ser atendida com unidade disponível fora do sistema.

Considerando ainda que o Risco utilizado como critério pelo ONS é de 0,5%, o que resulta em uma Frequência de 1,8 falhas/ano, a reserva parada atende esse índice com folga. Assim, a decisão de parar ou não a unidade geradora pode ser, nestes casos, para economia de vazão turbinada, isto é, em alguns casos do ponto de vista energético é melhor operar com nove unidades sincronizadas, ao invés de 10.

Os resultados também mostram que a possibilidade de falha durante a parada influencia pouco na confiabilidade do sistema, sendo mais sensível a influência no caso da unidade ser parada para manutenção, quando fica indisponível e, portanto, o sistema fica sem reserva parada.

5.3. Influência do instante da partida da unidade em reserva

Para avaliar essa influência foram comparados os indicadores de confiabilidade considerando a partida da unidade em reserva cada vez mais próxima do aumento da carga. Na simulação original a unidade foi sincronizada às 11h, mas seria necessária somente às 19h. Refazendo a simulação o horário ótimo de sincronismo seria antes das 16h, uma vez que as simulações partindo a unidade até às 15h30min os índices foram similares à simulação original, isto é, unidade sincronizada às 11h. A Tabela 4 apresenta os resultados das simulações para três situações não ideais no que tange aos indicadores de confiabilidade obtidos em 5.1.

Tabela 4 – Influência do instante da partida da unidade em reserva

Dia [intervalo]	Hora sincronismo	Carga [MW]	Duração [horas/ano]	Frequência [falhas/ano]	Energia não suprida [MWh]
03.5 [13:30-19:30]	16:00	6.212	42,1	29,5	16.667
03.5 [13:30-19:30]	17:00	6.212	55,8	30,2	21.888
03.5 [13:30-19:30]	18:00	6.212	69,7	30,9	26.375

Esta simulação mostrou-se ainda que a unidade poderia ser sincronizada quatro horas depois, sem no entanto alterar os riscos para o sistema, do ponto de vista da confiabilidade. Assim, como verificado no item 5.2, este também é um caso em que a operação hidroenergética pode determinar o horário correto de sincronismo da unidade geradora ao sistema.

6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os indicadores de confiabilidade da operação do setor de 50Hz da Usina de Itaipu, sob o aspecto da capacidade de geração atender a carga programada para as próximas 6h, no ano de 2013, ano que a geração da usina foi a maior de sua história. Os indicadores obtidos foram pessimistas em relação ao que realmente aconteceu naquele ano, diferença explicada principalmente pelas taxas de transição utilizadas na modelagem, que considera o período dos últimos quatro anos de todas as unidades geradoras, terem sido pessimistas em relação ao desempenho das unidades geradoras de 50Hz em 2013.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem motivar o debate sobre o estabelecimento de um critério a ser utilizado na determinação da Reserva de Potência Operativa, considerando a metodologia de frequência e duração utilizada. Dado que a operação da Usina de Itaipu em 2013 foi considerada um sucesso, pode-se então considerar que os riscos assumidos são aceitáveis para a confiabilidade do sistema. Dessa forma, para a operação de uma área específica do sistema, no caso em questão para Itaipu 50Hz, o risco pode ser maior que o risco assumido para todo o sistema, propondo-se o critério de até 8 falhas/ano no atendimento da carga, que essas falhas resultem em uma duração de até 22 horas/ano e que a expectativa de energia não suprida seja inferior a 7 GWh/ano.

O único indicador que permite dimensionar a alocação da reserva de potência operativa é a expectativa de energia não suprida, dado que tanto a frequência quanto a duração não são impactadas pelo montante de reserva, haja vista que o impacto ocorre somente quando esse montante é superior ou inferior a uma unidade geradora. Além disso, mostrou-se que uma unidade geradora parada e disponível, pode ser considerada para atendimento da parcela R2 da Reserva de Potência Operativa, dado que sua influência na confiabilidade é da mesma ordem de grandeza da unidade em reserva sincronizada.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SILVA, R.J.G.C., ALMEIDA, M.P..A confiabilidade Operativa de atendimento a carga da Usina de Itaipu 50 Hz no ano de 1992 – Uma Avaliação pós-operativa, IV SEPOPE, Foz do Iguaçu.
- (2) SILVA, R.J. G. C., LOTERO R. C., COLOMBARI L. F. S.. Estudo de Confiabilidade em Curto Prazo Aplicado à Operação da Usina de Itaipu, XIII SEPOPE, Foz do Iguaçu.

(3) TUFAILE, R.B.R., SILVA, R.J.G.C., RIBEIRO, J.R., Estudos dos Indicadores de Taxas de Falha e de Reparo para a Família de Unidades Geradoras de ITAIPU, XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2011.

(4) Procedimento de Rede do ONS – Submódulo 21.7 “Estudos de reserva de potência operativa”.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Renata de Biasi Ribeiro Tufaile, natural de Campinas, SP, nascida em 01/09/1974, Engenheira Eletricista formada pela Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, em 1998. Especialista nas seguintes áreas: Programação não Linear e Dinâmica no Planejamento da Operação Energética pela Universidade de Campinas, UNICAMP, em 2007 e Gestão de Pessoas pela União Dinâmica Cataratas, UDC (Foz do Iguaçu-PR), em 2008. Mestre na área de qualidade de Energia pela UNIFEI em 2002. Atua na área de análise e estatística de pós-operação e planejamento energético, na Superintendência de Operação da Itaipu Binacional.

Rui Jovita Godinho Corrêa da Silva (ruijgcs@itaipu.gov.br). Nasceu em Belém-PA em 1962, graduou-se em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Pará (1983), sendo mestre (1990) e doutor (2007) pela Universidade Federal de Itajubá, também em engenharia elétrica. Trabalha na Itaipu Binacional desde 1989 envolvido com a elaboração de procedimentos operativos e com a realização de estudos elétricos voltados para o horizonte de operação de médio e curto prazo, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle.

Reinaldo Andrés González-Fernández nasceu em Assunção, Paraguai, em 1985. Obteve sua graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, em 2007. Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Brasil, em 2009 e 2012, respectivamente. Ele trabalha na Superintendência de Operação da Itaipu Binacional, Hernandarias, Paraguai, desde 2012. Suas principais áreas de interesse são métodos probabilísticos aplicados a sistemas elétricos, estatística, confiabilidade e inteligência artificial. Em 2011, ele recebeu o IEEE PES Technical Committee (PSACE) Prize Paper Award.