



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

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA (GGH)**

**ESTUDO DOS INDICADORES DE TAXAS DE FALHA E DE REPARO PARA A FAMÍLIA DE UNIDADES
GERADORAS DE ITAIPU**

Renata de B. R. Tufaille *
ITAIPU BINACIONAL

Rui Jovita G. C. da Silva
ITAIPU BINACIONAL

Jercemil R. Ribeiro
ITAIPU BINACIONAL

RESUMO

Este artigo apresenta a análise do modelo probabilístico das unidades geradoras de Itaipu, considerando o modelo completo. A ênfase da análise está no comportamento temporal das taxas de transição. Para se obter as taxas, utilizou-se de técnicas matemáticas/estatísticas sobre os dados históricos. É verificada a aderência da taxa de falha à curva da banheira e identificado o período de mortalidade infantil e de vida útil. A influência das duas unidades geradoras, com menos de cinco anos em operação, é avaliada em separado. Os resultados são apresentados e, a partir deles, debatidos alguns aspectos que demonstram a política de manutenção adotada.

PALAVRAS-CHAVE – modelo probabilístico de unidade geradora, curva da banheira, taxa de falha, tempo médio de reparo, política de manutenção adotada.

1.0 - INTRODUÇÃO

A aplicação da teoria de confiabilidade em sistemas elétricos de potência é bastante difundida, sendo utilizada em todas as fases do processo: planejamento, projeto, operação e manutenção. A escolha do modelo probabilístico dos equipamentos é fundamental para a aplicação da confiabilidade, e este modelo é definido pelos possíveis estados do equipamento e por suas respectivas taxas de transição. Independente de qual seja o modelo escolhido, ele conterà os estados de funcionamento e de falha e suas respectivas taxas de transição: a taxa de falha e de reparo. Dado que um equipamento permanece por mais tempo no estado de funcionamento e que o estudo da confiabilidade quantifica sua possibilidade de falha, a taxa de transição que mais influencia nos resultados é a taxa de falha.

Para sistemas mecânicos, eletrônicos e sistemas elétricos, a curva da banheira representa a tendência temporal da taxa de falha de um equipamento e divide sua vida em três regiões: mortalidade infantil, vida útil e envelhecimento. Entretanto, o período de duração de cada região é indefinido e varia de acordo com o tipo de equipamento e com a qualidade da manutenção. A determinação dessas regiões é um desafio e um indicativo para a avaliação da periodicidade das manutenções, qualquer que seja o método probabilístico utilizado. Para determinar com confiança a duração de cada região é necessário o conhecimento de um histórico significativo de falhas de um equipamento ou família de equipamentos, e é o tema principal desse trabalho, que utiliza o histórico operativo das unidades geradoras da usina de Itaipu.

A atual capacidade instalada na usina de Itaipu é de 14.000MW - 20 unidades geradoras com potência nominal de 700MW, com tensão nominal de 18kV, sendo 10 em 50Hz e 10 em 60Hz. As primeiras 18 unidades entraram em operação entre 31.5.1984 e 10.4.1991, enquanto as duas últimas entraram em operação em 2006 e 2007, sendo que a diferença de idade entre estas unidades pode alcançar mais de 20 anos. O tratamento de um histórico como esse requer uma análise cuidadosa para a correta identificação dos estados do modelo probabilístico e suas respectivas taxas de transição.

Este artigo apresenta a análise do modelo probabilístico das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Itaipu, considerando os estados de funcionamento, falha, falha na partida, falha na parada, parada por conveniência operativa e parada para manutenção programada, concentrando essa análise no comportamento temporal das taxas de transição que caracterizam uma indisponibilidade, quer sejam, forçada ou não. O comportamento temporal das taxas de transição permitem conhecer o desempenho das unidades geradoras e também a evolução da política de manutenção da empresa e como tem sido a utilização da capacidade da usina de Itaipu pelo sistema interligado.

2.0 - MODELO PROBABILISTICO

A escolha do modelo probabilístico a ser utilizado é peça fundamental para a análise através de métodos probabilísticos. O modelo deve ser completo contendo todos os possíveis estados em que o equipamento possa se encontrar e suas respectivas taxas de transição. Para que o modelo retrate a realidade é necessário dispor-se de um cadastro histórico de dados que descrevem as transições temporais entre os estados desde o início da operação. O modelo adotado neste artigo é apresentado na Figura 1, tendo como base o modelo probabilístico do CIER [1], com algumas adaptações, como por exemplo a criação do estado para a falha na parada. Esse modelo é o que melhor descreve a operação das unidades geradoras de Itaipu.

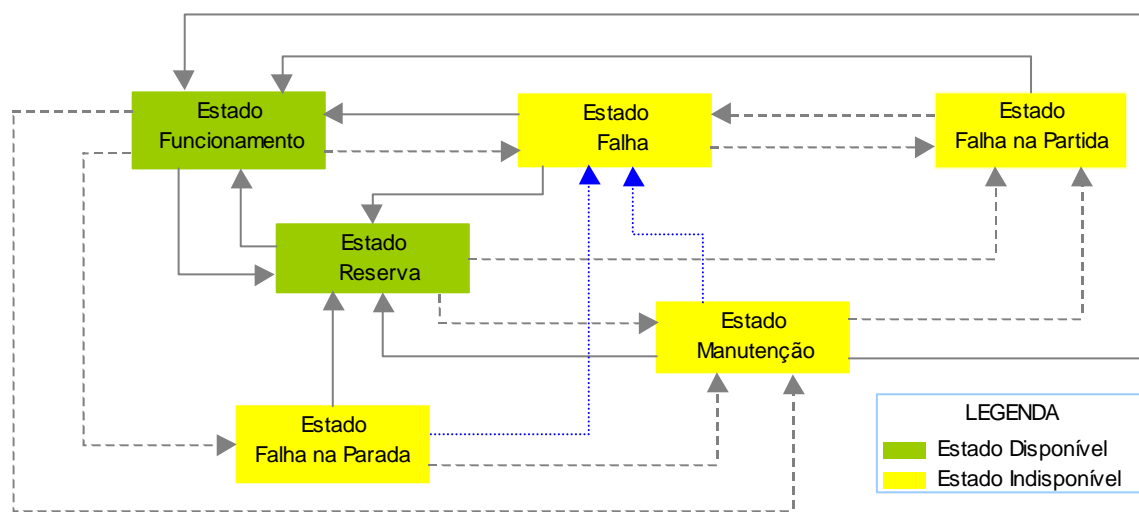


FIGURA 1 – Modelo probabilístico das unidades geradoras de Itaipu

O modelo da Figura 1 é composto de dois macro-estados:

Disponível – quando a unidade está nos estados Funcionamento ou Reserva. O estado Funcionamento é aquele em que a unidade geradora está conectada ao sistema e o estado Reserva é aquele em que a unidade está parada, desligada do sistema, e não possui impedimento para ser sincronizada de imediato.

Indisponível – quando a unidade está desligada do sistema para manutenção corretiva ou preventiva, e impedida de ser sincronizada de imediato. É composta dos estados Falha, Falha na Partida, Falha na Parada e Manutenção. O estado Manutenção é aquele que agrupa as manutenções programadas, seja ela corretiva ou preventiva. Os estados Falha, Falha na Partida e Falha na Parada são caracterizados por falhas forçadas ou desligamentos de emergência, que requerem, quase sempre, manutenção corretiva não programada. Algumas dessas falhas permitem que haja uma tentativa de retornar com a unidade geradora para funcionamento sem intervenção da manutenção.

Observa-se por esta descrição, que o conhecimento das transições entre os macro-estados Disponível e Indisponível refletem a política de manutenção da empresa, e o conhecimento das transições internas ao macro-estado Disponível refletem a política de utilização da capacidade da usina de Itaipu no sistema interligado. Assim, a determinação completa do modelo apresentado vai permitir a análise dessas políticas. Os estados e transições que compõem o modelo são descritos a seguir, sendo importante lembrar que há apenas uma única transição que não necessita de intervenção humana prévia, quando há falha forçada na unidade.

Funcionamento – é o estado em que a unidade permanece a maior parte do tempo, saindo dele de forma voluntária, por comando do operador, ou involuntária, quando há falha forçada. Porém, em qualquer dos casos, sempre há possibilidade de ocorrer uma falha durante a parada da unidade. O operador pode parar a unidade geradora para que ela permaneça à disposição do sistema - Reserva, para manutenção programada ou

não(desligamentos de emergência). Assim, do estado Funcionamento a unidade pode transitar para os estados Falha, Reserva, Manutenção e Falha na Parada. A unidade entra no estado Funcionamento quando o operador finaliza a partida da unidade e a sincroniza, existindo ainda a possibilidade de ocorrer uma falha durante o processo de partida, assim, o estado Funcionamento pode ocorrer a partir do estado Reserva, Manutenção, Falha ou Falha na Partida.

Reserva – a unidade sai do estado Reserva por decisão do operador, podendo a unidade ser sincronizada, ou entregá-la para trabalhos de manutenção. Durante o processo de partida da unidade há possibilidade de ocorrer falha. Assim, do estado Reserva a unidade pode transitar para os estados Funcionamento, Manutenção e Falha na Partida. A entrada no estado Reserva ocorre quando a máquina é desligada ou quando há o fim de uma manutenção, programada ou não, ou seja, a partir dos estados Funcionamento, Falha, Manutenção ou Falha na Parada.

Manutenção – antes da unidade sair do estado Manutenção, passa por procedimentos de entrega da unidade para a operação a fim de se realizar inspeções, podendo, nesse estágio, ser identificada uma falha iminente e transformar uma manutenção programada em manutenção corretiva não programada. Durante o processo de partida da unidade há possibilidade de ocorrer também uma falha. Assim, do estado Manutenção a unidade pode transitar para os estados Funcionamento, Reserva, Falha e Falha na Partida. A entrada no estado Manutenção ocorre quando se iniciam os procedimentos de entrega da unidade para manutenção programada, assim, o estado Manutenção pode ocorrer a partir do estado Funcionamento, Reserva, Falha ou Falha na Parada.

Falha – a unidade sai do estado Falha após o término de uma manutenção não programada. Durante o processo de partida da unidade há possibilidade de ocorrer também uma falha. Assim, do estado Falha a unidade pode transitar para os estados Funcionamento, Reserva e Falha na Partida. A entrada no estado Falha ocorre quando existe uma falha forçada ou um desligamento em emergência com início de manutenção não programada. Desta maneira, o estado Falha pode ocorrer a partir do estado Funcionamento, Reserva, Falha Partida ou Falha na Parada.

Falha na Partida – as falhas na partida ocorrem na tentativa de se levar a unidade para o Funcionamento (sincronizar). A falhas na partida são cadastradas com duração de 8 minutos quando há sucesso na segunda tentativa de partida e, em caso contrário, vão para o estado Falha para a correção do problema. O estado falha na Partida pode ocorrer a partir do estado Manutenção, Reserva ou Falha.

Falha na Parada – a unidade falha na parada saindo do estado Funcionamento por ação do operador, podendo ir para os estados de Manutenção, Reserva ou Falha, após solucionar o problema da parada.

3.0 - METODOLOGIA DE CÁLCULO E ANÁLISE

As taxas de transição do modelo apresentado foram calculadas com base no histórico de março de 1984 a setembro de 2010 utilizando a metodologia descrita em [2] cujas principais características são:

- cálculo é feito para a família de unidades geradoras e não para cada unidade individual;
- alinhamento do tempo de operação é feito pelo início da operação de cada unidade e não pelo tempo cronológico;
- cálculo considera o período com pelo menos nove unidades geradoras, que corresponde a 23 anos de operação;
- cálculo é feito para uma janela móvel de quatro anos.

A taxa de transição do estado “A” para o estado “B”, em base anualizadas [2], é dada pela equação 1.

$$Taxa_{(A \rightarrow B)} = \frac{\sum_{i=1}^n nt_{(A \rightarrow B)}}{\sum_{i=1}^n HP_{(A)}} \times 8.760 \text{ (transições / ano)} \quad (\text{eq.1})$$

sendo:

- $nt_{(A \rightarrow B)}$ é o número de transições dos estados “A” para “B”;
- $HP_{(A)}$ é o tempo de permanência no estado “A”;
- i é o contador do número de equipamentos;
- n é o número total de equipamentos ou conjuntos de equipamentos, que exercem uma função, variando de acordo com a agregação do índice.

O tempo médio de reparo é calculado pela equação 2 (1),

$$TMR = \frac{\sum_{i=1}^n nf}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{nf} hcf} (horas) \quad (eq.2)$$

sendo:

- i é o contador do número de equipamentos;
- n é o número total de equipamentos ou conjuntos de equipamentos, que exercem uma função, variando de acordo com a agregação do índice;
- nf é o número de falhas para cada equipamento i ;
- j é o contador do número de falhas;
- hcf é a duração de cada falha.

Para os estados de falha na partida e falha na parada também foram calculadas as probabilidades *a posteriori*, ou seja, obtida pela relação entre o número de falhas na partida ou parada pelos respectivos números de partidas ou paradas, considerando-se que o número de partidas é igual ao número de paradas.

A política de manutenção da empresa é identificada pelo conhecimento das transições entre os macro-estados Disponível e Indisponível, medida pela taxa de indisponibilidade e pela aderência dessa taxa à curva da banheira. De forma semelhante, o desempenho das unidades geradoras é verificado pela evolução das transições entre os estados de funcionamento e falha, medida pela taxa de falha e sua aderência à curva da banheira.

Os resultados obtidos tanto para as taxas de falha quanto para as taxas de indisponibilidade apontaram que o melhor ajuste da curva seria aquele que apresenta as características da equação 3. Para ajuste da curva foi utilizado o método de regressão dos mínimos quadrados com a tolerância de erro quadrático mínimo médio de 0,7%

$$\lambda(t) = \kappa.t + \alpha(n) + \beta(n).e^{-\delta(n).t} \quad (eq.3)$$

sendo:

- n identifica os parâmetros para a taxa de falha ($n = 1$) e taxa de indisponibilidade ($n = 2$);
- β_n e δ_n são os parâmetros que retratam o período transitório referente à mortalidade infantil;
- k e α_n são os parâmetros que retratam o período de vida útil.

Para a taxa de falha ($n = 1$):

- k é igual a zero, e
- α_1 é o parâmetro da equação que representa o valor da taxa de falha no período de vida útil, e é definido pela equação 4.

$$\alpha = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) \text{ [falhas/ano]} \quad (eq.4)$$

Para a taxa de indisponibilidade ($n = 2$):

- o resultado “ $k.t + \alpha_2$ ” reflete a evolução da política de manutenção utilizada na empresa.

Utilizando a equação 5, a partir dos parâmetros da equação 3, obtém-se o início da vida útil dos equipamentos e o final do período de mortalidade infantil dos defeitos que levariam à falha, sendo “ r ” a constante que determina a margem de proximidade da curva real com a curva ajustada, considerada 10% [2].

$$t = \frac{\ln\left(r \cdot \frac{\alpha}{\beta}\right)}{\delta} \quad (eq.5)$$

A política de utilização da capacidade da usina de Itaipu pelo sistema interligado é refletida pelo conhecimento das transições internas ao macro-estado Disponível, medida pelas taxas de desligamento para reserva e taxa de sincronização para atender a carga.

4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - Modelo Completo

As taxas de transição calculadas para a última janela de quatro anos são apresentadas na Figura 2. Cabe observar que ao longo do histórico há registro de taxas entre todas as transições, embora na última janela de cálculo apresentado tem-se verificado valor nulo em algumas transições.

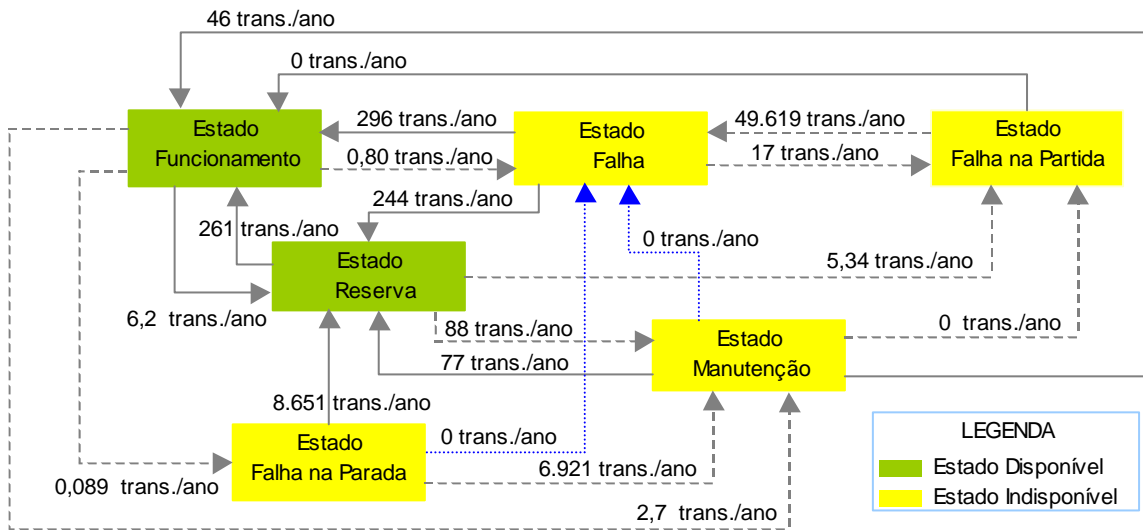


FIGURA 2 – Resultado para a última janela de 4 anos

Nos itens a seguir serão analisados os comportamentos temporais das taxas de transição que possuem histórico suficiente para se obter uma tendência.

4.2 - Transição de Funcionamento para Falha (Taxa de Falha)

A Figura 3 apresenta os resultados da taxa de falha da família de unidades geradoras de Itaipu e a curva ajustada definida pela equação 6. Observa-se uma grande aderência com a curva da banheira, sem indicar tendência do fim da vida útil e com evidência nítida da região de mortalidade infantil.

$$\lambda(t) = 0,7532 + 29,2430.e^{-0,4603.t} \quad (\text{eq.6})$$

A partir da curva ajustada e utilizando as equações 4 e 5, obteve-se que taxa de falha das unidades geradoras de Itaipu é de 0,7532 [falhas/ano] e o período de vida útil inicia-se aos 13 anos de funcionamento.

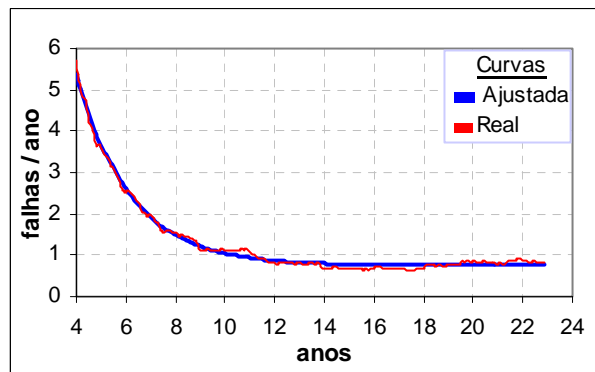


FIGURA 3 – curva ajustada da taxa de falha

Ao comparar o efeito das duas novas unidades geradoras, constatou-se que a nova unidade do sistema de 50Hz apresenta taxa de falha de 3 falhas/ano, com cerca de 4,5 anos de funcionamento, inferior ao restante do conjunto que apresentou a taxa de falha próxima a 5 falhas/ano, porém o histórico de dados são insuficientes para uma análise conclusiva sobre essa tendência. Já a nova unidade do 60Hz, embora ainda não tenha completado quatro anos (mínimo período de cálculo da taxa), a taxa de falha obtida para o histórico de 47 meses foi 5,5 falhas/ano, ou seja, semelhante à obtida para o restante do conjunto.

Cabe observar que, ao se considerar o modelo completo, existem outras transições que levam à falha, cuja grande influência verificada deve-se às falhas na partida e cuja contribuição segue a tendência da taxa de falha na Partida, porém com amplitude 20 vezes inferior. Em relação à transição da manutenção para falha não há um padrão específico, pois só se manifesta quando são identificadas falhas de longa duração durante as manutenções periódicas.

4.3 - Tempo Médio de Reparo

A Figura 4 apresenta os resultados dos tempos médios de reparo para as unidades geradoras, considerando todas falhas do histórico, quer sejam, transições dos estados de funcionamento, de manutenção, e de falha na partida e parada. Também é apresentado o resultado desconsiderando a falha ocorrida na Unidade 06 em 1992 que teve uma duração de 12.310 horas e 51 minutos. No período de vida útil, a partir de 13 anos, o tempo médio de reparo obtido foi de 12 horas, com desvio padrão médio de 5 horas ($TMR = 12 \pm 5$ horas).

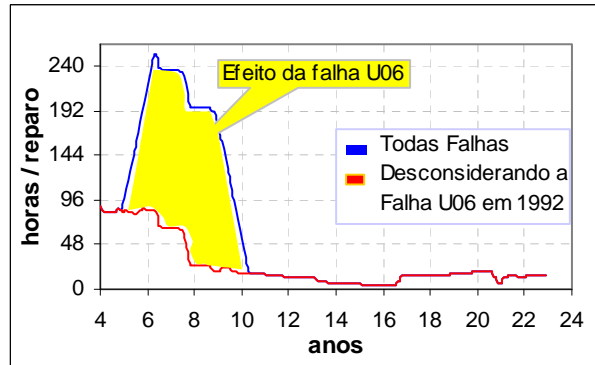


FIGURA 4 – Tempo Médio Reparo

4.4 - Taxa de Falha na Partida

As Figuras 5 e 6 apresentam as taxa e a probabilidade de falha na partida, respectivamente. Os resultados demonstram que há uma gama de oportunidades para mitigar as causas das taxas apresentadas, principalmente no período de vida útil das unidades (acima 13 anos), sendo que esta técnica poderá constituir-se numa ferramenta adicional para a análise. O histórico mostra que as falhas na partida ocorrem em sua grande maioria quando a máquina está em Reserva, isto é, normalmente quando está parada a pouco tempo (Figura 7).

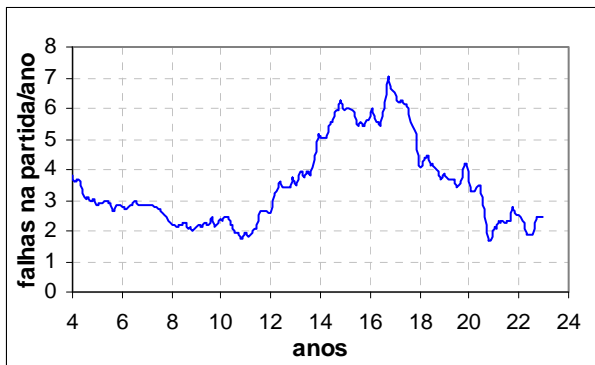


FIGURA 5 – Taxa de Falha Partida

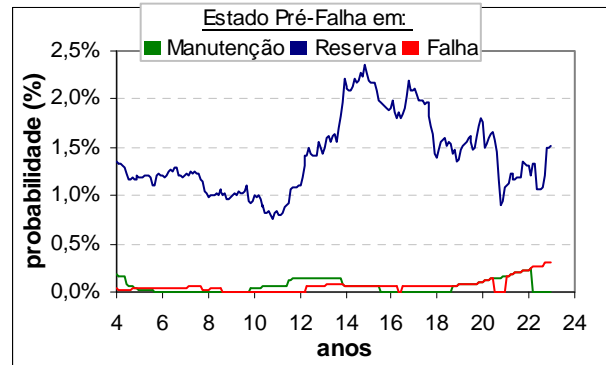


FIGURA 6– Probabilidade de Falha Partida

4.5 - Taxa e Probabilidade de Falha na Parada

Os resultados são apresentados nas Figuras 7 e 8.

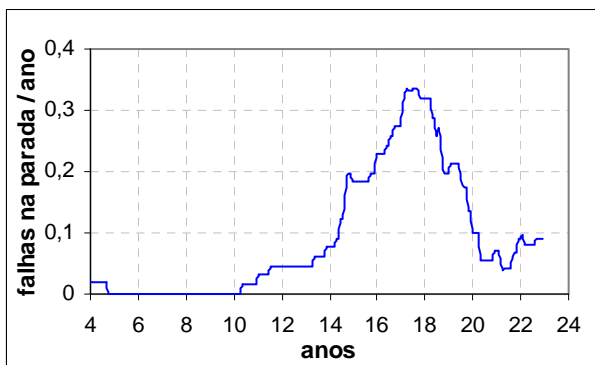


FIGURA 7 – Taxa de Falha na Parada

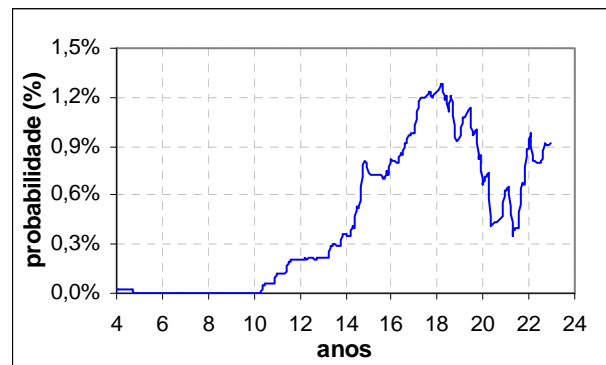


FIGURA 8 – Probabilidade Falha na Parada

Cabe destacar que os resultados demonstram que há problemas no cadastro de dados nos primeiros 10 anos, provavelmente pela falta de dados. No entanto, a partir do início de vida útil (13 anos), o comportamento apresentado para as taxas é semelhante ao verificado para a taxa de falha na partida, porém com amplitude 20 vezes inferior.

4.6 - Taxa de Indisponibilidade

A Figura 9, apresenta os resultados da taxa de indisponibilidade e a curva ajustada definida pela equação 7.

$$\lambda(t) = -0,2277.t + 10,6553 + 836,6626.e^{-1,2207.t} \quad (\text{eq.7})$$

Essa equação demonstra a redução das manutenções programadas preventivas e corretivas, ou seja, a evolução da política de manutenção adotada na empresa e a redução dos possíveis defeitos que levariam à falha. A Figura 10 apresenta a quantidade de manutenções programadas (área destacada na Figura 10) obtida pela integral da diferença entre a taxa de indisponibilidade e taxa de falha, relacionando a redução da taxa de manutenção com a estabilidade da taxa de falha. O ponto (A) – final da região transitória da curva - indicado na Figura 11, será denominado neste artigo como sendo o período de mortalidade infantil dos defeitos que levariam à falha. Utilizando a equação 5, obteve-se que este período foi de 5,5 anos. Do ponto (A) em diante, a política de manutenção praticada é refletida pela equação 8, que na última janela de cálculo corresponde a 5,4 manutenções/ano/unidade geradora.

$$\rho m(t) = 10,6553 - 0,2277.t \quad (\text{eq.8})$$

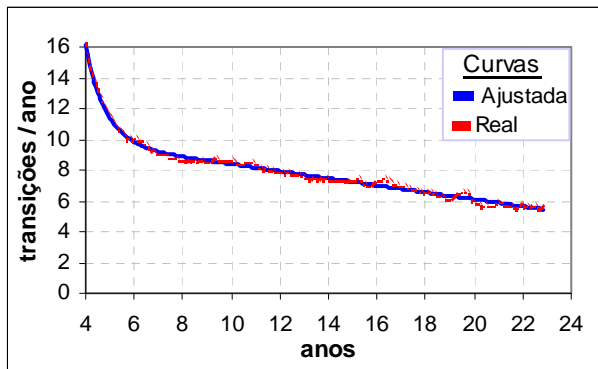


FIGURA 9 – Taxa de Indisponibilidade

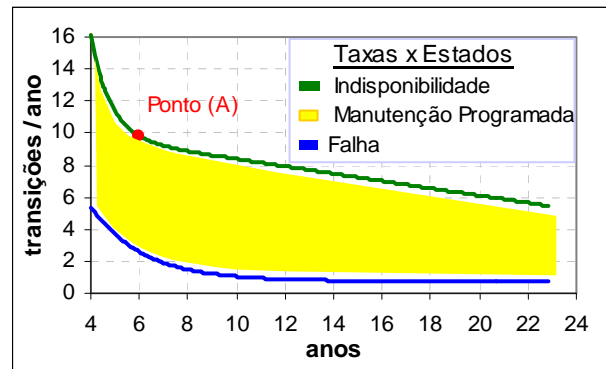


FIGURA 10 – Taxas dos Estados Indisponíveis

4.7 - Tempos Médios de Residência nos Estados

Os resultados demonstram que o tempo médio de permanência no estado de reserva (Figura 12) no período de vida útil foi de 288,3 horas, porém com tendência de queda refletindo a maior utilização dos recursos energéticos de Itaipu, a partir de 1995. Quanto ao tempo médio no estado indisponível (Figura 11), no período de vida útil (a partir de 13 anos), aquele relativo à permanência no estado de falha correspondeu em 11,8 horas enquanto no estado de manutenção programada foi de 404,8 horas, sendo este último, o estado que detém o comportamento da curva. Cabe observar que no período transitório, mortalidade infantil, a distorção na curva do tempo médio no estado de falha é devido à falha de longa duração na unidade geradora 6, ocorrida em 1992.

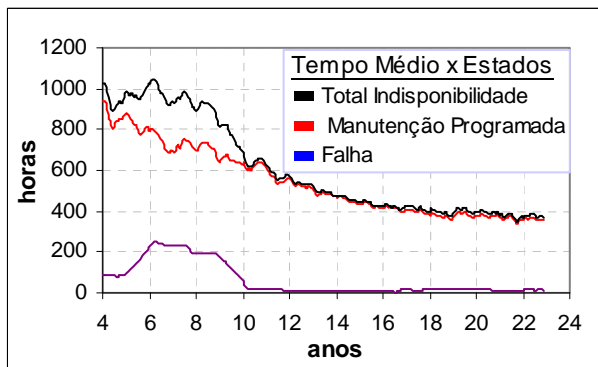


FIGURA 11 – Residência no Estado Indisponível

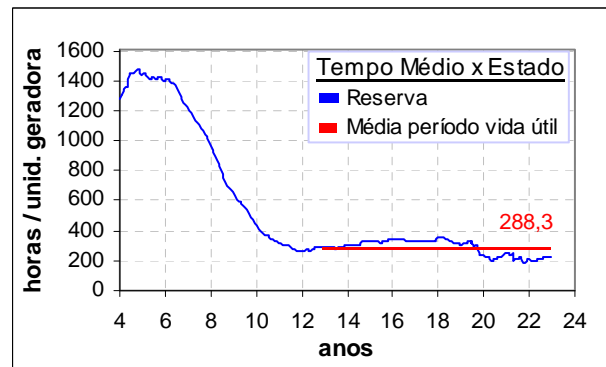


FIGURA 12 – Residência no Estado de Reserva

4.8 - Política de uso de Itaipu pelo Sistema

A Figura 13 demonstra que com o passar dos anos houve uma maior utilização dos recursos energéticos de Itaipu refletida pela taxa decrescente de desligamentos de unidades geradoras para conveniência do sistema (Reserva). A inflexão na curva entre do 14º ao 17º ano está associado ao racionamento de 2001 em decorrência da escassez hidrológica. A Figura 14 demonstra a taxa de sincronismo das unidades geradoras que tem sido praticadas, a fim de atender a sazonalidade da carga.

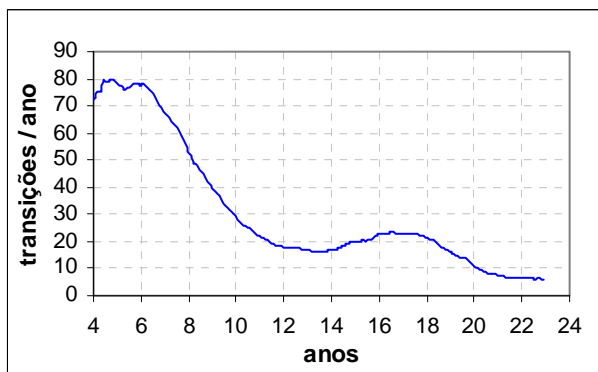


FIGURA 13 – Estado de Funcionamento para Reserva

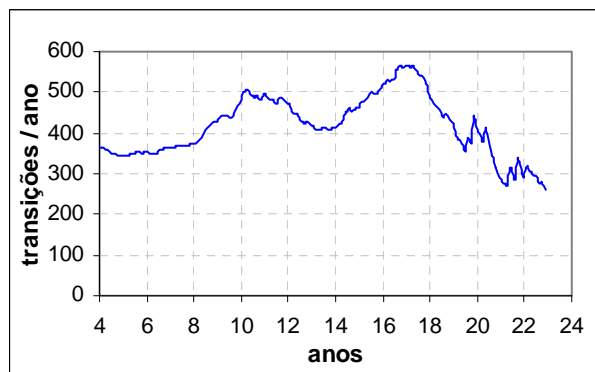


FIGURA 14 – Estado de Reserva para Funcionamento

5.0 - CONCLUSÕES

É de fundamental importância que se disponha de um cadastro de dados consistente e que retrate a realidade dos fatos para aplicar a metodologia utilizada e se obter o modelo completo apresentado neste artigo. A metodologia utilizada apresentou-se como sendo uma ferramenta adequada para avaliar o comportamento da evolução das taxas de transição entre os distintos estados operativos em que as unidades geradoras poderão se encontrar.

As falhas das unidades geradoras de Itaipu são bem representadas pela curva da banheira, com o período de mortalidade infantil de 13 anos e a taxa de falha no período de vida útil de 0,7532 falhas/ano/unidade geradora. As duas novas unidades finalizaram recentemente o primeiro período de cálculo de quatro anos de funcionamento e apresentaram taxas de falha semelhante às outras unidades geradoras, para o mesmo período, cerca de 4 falhas/ano. No período de vida útil o tempo médio de reparo é de 12 horas.

As falhas na partida e as falhas na parada apresentaram comportamento temporal semelhantes, inicialmente crescendo e depois diminuindo ao longo do período de vida útil. Assim, essas falhas não apresentaram o esperado período de mortalidade infantil. Observou-se ainda que a maioria das falhas na partida ocorrem a partir do estado de reserva, ou seja, quando as unidades encontram-se paradas por pouco tempo.

A taxa de indisponibilidade mostra que a política de manutenção da empresa ainda encontra-se em evolução, reduzindo-se a quantidade de manutenção programada na taxa de 0,2277 manutenções/ano/unidade geradora. O período de mortalidade infantil dos defeitos que poderia levar à falha é de 5,5 anos. O tempo médio de manutenção também evoluiu ao longo período de vida útil, reduzindo de cerca de 600 horas para 400 horas. Essa prática tem sido eficaz haja vista que apesar da redução das manutenções, a taxa de falha tem se mantida constante.

O uso dos recursos energéticos da usina de Itaipu foi crescente ao longo do tempo, apresentando atualmente uma estabilidade em torno de 10 desligamentos para reserva/ano/unidade geradora e tempo médio em reserva de 289 horas. A variação ocorrida entre o 14º e 17º ano está associada ao racionamento de 2001 em decorrência da escassez hidrológica.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] COMISSÃO DE INTEGRAÇÃO ELÉTRICA REGIONAL, SUBCOMITÊ DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, CIER – SEC. Manual sistema de geração.
- [2] SILVA, R.J.G.C.; RIBEIRO, J.R.; NANNI, M.; Análise da Taxa de Falha das Unidades Geradoras de Itaipu, Encontro Nacional de Monitoramento III ENAM, 2006.
- [3] COMISSÃO DE ACOMPANHAMENTO DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS INTERLIGADOS BRASILEIROS – CDB. Indicadores de Desempenho Manual de Terminologia e Critérios de Cálculo.

7.0 - 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.