



CÁLCULO DE PARÂMETROS DO MODELO DE CARGA POLINOMIAL USANDO REGISTROS

Manuel Leonardo Sosa-Ríos(*)
ITAIPU Binacional

Alfredo Javier MezgerSzostak
ITAIPU Binacional

RESUMO

Neste trabalho descreve-se uma metodologia para auxiliar o processo de modelagem de cargas, que consiste numa rotina de interação entre o Matlab e o ANAREDE, com o objetivo de estimar os parâmetros do modelo de carga polinomial (associados às potências ativa e reativa), nos níveis de 23kV e 66kV do Sistema Interligado Nacional do Paraguai (SIN-PY), a partir de registros obtidos na Subestação Margem Direita (SE-MD) da Itaipu Binacional. A interação entre esses dois programas permite executar vários casos de fluxo de potência de maneira automática, utilizando-se diferentes valores de parâmetros do modelo de carga polinomial, buscando recriar pequenas variações de tensão na SE-MD em 220kV resultantes de alterações de taps nos autotransformadores/reguladores, que interligam a Usina de Itaipu com o SIN-PY. Os resultados são validados por simulações dinâmicas, que permitem verificar semelhanças entre variações de tensão simuladas e obtidas em registros.

PALAVRAS-CHAVE

Modelo de carga polinomial, Fluxo de potência, Usina de Itaipu, SIN-PY, SE-MD.

1.0 - INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda de energia elétrica faz com que os sistemas de potência operem de forma interligada e próximos a seus níveis de sobrecarga. Desta forma, qualquer perturbação pode afetar com intensidade semelhante diversas áreas do sistema [1]. Devido a essa condição de operação e considerando a evolução da tecnologia, o sistema elétrico é supervisionado por diferentes registradores que fornecem dados que podem auxiliar nas análises, que geralmente requerem de simulações com o objetivo de recriar perturbações. Para que os resultados das simulações reflitam os comportamentos registrados, os modelos dos equipamentos do sistema elétrico analisado devem ser apurados e precisos. Isto se torna uma tarefa difícil, especialmente quando se trata de modelagem de cargas, que apresentam comportamento aleatório e localização dispersa dentro do sistema.

Este trabalho apresenta uma metodologia para auxiliar a modelagem de cargas, baseando os cálculos no ajuste dos parâmetros do modelo de carga polinomial (ou ZIP, referindo-se às suas parcelas de impedância, corrente e potência constantes). É utilizado o modelo ZIP porque representa a dependência das cargas da tensão [1] e está implementado na maioria dos programas de fluxo de potência comerciais. O procedimento apresentado utiliza registros obtidos na Subestação Margem Direita (SE-MD), a partir da qual se realiza o fornecimento de energia do setor de 50Hz da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHI 50Hz) para os Sistemas Interligados do Brasil (SIN-BR) e do Paraguai (SIN-PY). Os registros fornecem informações relativas à tensão, frequência e potências ativa e reativa, medidas em 500kV e 220kV na SE-MD. Esses registros foram utilizados para estimar os parâmetros do modelo polinomial de carga, associados às potências ativa e reativa. A metodologia busca estimar os parâmetros da carga polinomial associados às subestações de 23kV e 66kV, localizadas no SIN-PY, com o objetivo de recriar, nas

simulações, pequenas variações de potência reativa, causadas por manobras de alteração dos taps dos autotransformadores/reguladores do setor de 220kV da SE-MD, executadas para controle de tensão.

Para realizar as estimativas dos modelos de carga, foi criada uma rotina de interação entre o Matlab e o ANAREDE, software amplamente utilizado em estudos de fluxo de potência no setor elétrico brasileiro. A interação entre esses dois programas permite executar vários casos de fluxo de potência de maneira automática, utilizando-se diferentes valores de parâmetros do modelo de carga polinomial (associados às potências ativa e reativa) e buscando recriar variações de potência reativa na SE-MD 220kV, resultantes das alterações dos taps. Esse procedimento tenta minimizar a diferença de potência reativa entre os valores obtidos nas simulações e nos registros, a partir da variação dos parâmetros do modelo de carga.

Desta maneira, o trabalho propõe uma metodologia para estimar parâmetros do modelo de carga polinomial baseado em registros reais, obtidos no principal ponto de fornecimento de energia elétrica ao SIN-PY, e verificando o efeito das cargas alimentadas em 66kV e 23kV na tensão em nível de transmissão.

Os resultados obtidos foram validados através de simulações dinâmicas de perturbações, cujos transitórios de tensão serão comparados com variações reais de tensão, obtidos por registros dinâmicos, procedimento que permitirá verificar as semelhanças entre as simulações e os registros e a influência do modelo de carga nos transitórios de tensão.

2.0 - SISTEMA DE POTÊNCIA

Como foi mencionado anteriormente, a metodologia apresentada foi aplicada ao SIN-PY, considerando medições obtidas na SE-MD. O diagrama esquemático do sistema interligado à UHI 50Hz é mostrado na Figura 1 a seguir, onde se observa que existem quatro linhas de transmissão em 220kV e uma linha em 500kV, entre a SE-MD e a Subestação de Villa Hayes (SE-VHA). As medidas de tensão foram obtidas na barra de 220kV e o fluxo de potência reativa foi medido nos transformadores da SE-MD. As variações de fluxo de potência reativa foram obtidas devido a comutações dos taps dos transformadores da SE-MD, executados para controle de tensão em 220kV. Neste procedimento, também podem ser consideradas medições na carga, em distribuição, porém a Itaipu não tem acesso a esses registros.

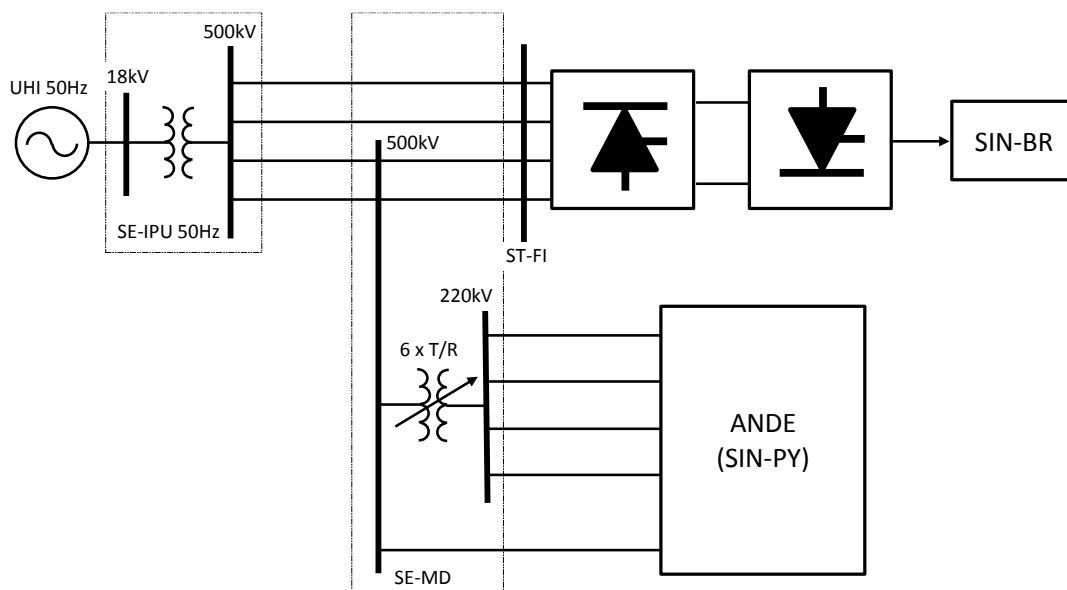


FIGURA 1 – Sistema Interligado à Usina de Itaipu em 50Hz

O SIN-PY é um sistema praticamente radial, a partir da SE-MD, onde a geração está localizada na região leste do Paraguai e o principal centro de consumo se encontra na região central do país. Essa característica dificulta o controle de tensão nas subestações, e por esse motivo, o SIN-PY está dotado de quatro compensadores estáticos de reativos (CER), especificamente nas subestações de *San Lorenzo* (SE-SLO), *Limpio* (SE-LIM) e *Guarambaré* (SE-GUA), subestações correspondentes ao sistema metropolitano. O sistema norte também conta com um CER na subestação de *Horqueta* (SE-HOR). Na modelagem do SIN-PY utilizada neste artigo, os CERs mencionados foram considerados com controle ativo, o que representa um avanço com respeito à metodologia apresentada em [2], onde a injeção de potência reativa dos CERs foi considerada constante. Esta consideração do sistema de transmissão também permite calcular os parâmetros da carga associados à potência reativa das diversas cargas do sistema, o que representa outro avanço com respeito à metodologia apresentada em [2]. Além disso, foram utilizados casos com a linha de transmissão entre a SE-MD e a SE-VHA, que também representa outro avanço.

3.0 - MODELAGEM DE CARGAS

Nesta seção são detalhados os modelos matemáticos de carga polinomial, como estão implementados no programa ANAREDE, juntamente com os seus respectivos parâmetros, que serão calculados neste trabalho.

3.1 Modelo Polinomial

O modelo de carga polinomial consiste numa somatória ponderada de cargas, representadas como impedância constante (o consumo de potência e de corrente aumentam da mesma forma que aumenta a tensão nos terminais da carga), corrente constante (em caso de variações na tensão de alimentação, a corrente permanece inalterada) e potência constante (o consumo de corrente diminui com o acréscimo da tensão) [2]. Esta função representa a potência ativa em função da tensão que está submetida a carga, como é indicado em (1),

$$P(V) = P_0 \cdot \left[a_p + b_p \cdot \frac{V}{V_0} + c_p \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde os coeficientes a_p , b_p e c_p indicam as percentagens da carga, representadas por potência, corrente e impedância constantes, respectivamente. P_0 é o valor de referência da potência ativa e V_0 corresponde a referência de tensão. Os coeficientes a_p , b_p e c_p devem ser maiores ou iguais a 0% e menores ou iguais a 100%. Por tanto, $0 \leq a_p \leq 100$, $0 \leq b_p \leq 100$, $0 \leq c_p \leq 100$. A soma destes coeficientes deve ser igual a 100%, isto é, $a_p + b_p + c_p = 100$. Também foi considerado o correspondente modelo de carga polinomial da potencia reativa, indicado em (2).

$$Q(V) = Q_0 \cdot \left[a_q + b_q \cdot \frac{V}{V_0} + c_q \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

No programa ANAREDE [3], esses modelos de carga, associados às parcelas de potência ativa e reativa, são representados pelas expressões (3) e (4), respectivamente.

$$P = \frac{P_0}{100} \cdot \left[100 - A - B + A \cdot \frac{V}{V_0} + B \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$Q = \frac{Q_0}{100} \cdot \left[100 - C - D + C \cdot \frac{V}{V_0} + D \cdot \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] \quad (4)$$

A metodologia apresentada neste artigo tem o objetivo de calcular os parâmetros A , B , C e D das parcelas de potência ativa e reativa das cargas, minimizando a diferença entre os valores de potencia reativa medidos e os seus correspondentes valores calculados, obtidos do algoritmo de fluxo de potência. As variações dessas grandezas são causadas por alterações dos taps dos autotransformadores/reguladores da SE-MD em 220kV. Os parâmetros de carga são calculados nas barras do SIN-PY, em níveis de tensão de 23kV e 66kV.

4.0 - ENXAME DE PARTÍCULAS

4.1 Método de Busca

A metodologia descrita utiliza o Enxame de Partículas ou *Particle Swarm Optimization* (PSO) para manipular as possíveis soluções na busca do melhor conjunto de parâmetros que minimize as diferenças entre os valores de potencia reativa medidos e calculados. O PSO é uma técnica metaheurística poderosa, inspirada no movimento sincronizado de enxame de pássaros sem colisão [4]. As partículas são calculadas de acordo com (5) e (6)

$$\mathbf{v}_{j,k+1} = w \cdot \mathbf{v}_{j,k} + c_1 \cdot r_{j1,k} \cdot (\mathbf{p}_{j,k} - \mathbf{X}_{j,k}) + c_2 \cdot r_{j2,k} \cdot (\mathbf{p}_{g,k} - \mathbf{X}_{j,k}) \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_{j,k+1} = \mathbf{X}_{j,k} + \mathbf{v}_{j,k+1} \quad (6)$$

onde k é o contador de iterações; \mathbf{X}_j e \mathbf{v}_j são a posição e a velocidade da partícula j , respectivamente; g é o índice que indica a melhor partícula no enxame; r_{j1} e r_{j2} são números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo [0,

1]; p_j é a melhor posição obtida até então para a j -ésima partícula. Finalmente, c_1 e c_2 são números constantes positivos, que representam os parâmetros cognitivo e social das partículas, respectivamente; e w é o peso da inércia. Neste trabalho foram utilizados os seguintes valores: $c_1 = c_2 = 2$ e $w = 0,8$ [4].

4.2 Função de Aptidão

O problema de otimização consiste na minimização da diferença do fluxo de potência reativa medido nos transformadores da SE-MD e calculado pelo algoritmo de fluxo de potência, obtido pelo software ANAREDE [3]. Essa minimização é realizada considerando os valores de potência reativa antes e depois da manobra de comutação dos taps dos transformadores, obtidos por registros do sistema Scada, que realiza o monitoramento das grandezas elétricas da SE-MD. Este procedimento foi realizado considerando a seguinte função de aptidão (7),

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{AT} \left| (Q_{med}^t - Q_{fp,j}^k) / Q_{med}^t \right| \right\} \quad (7)$$

onde Q_{med} e Q_{fp} indicam os valores de potência reativa nos transformadores da SE-MD 220kV medidos (med) e obtidos do fluxo de potência (fp). Os valores medidos foram obtidos em duas posições diferentes de tap t , isto é, o número total de alterações de taps $AT = 2$. Desta forma, a função de aptidão minimiza a diferença entre os valores de potência reativa medidos e calculados com cada partícula j , em cada iteração k .

5.0 - METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE PARÂMETROS DO MODELO DE CARGA POLINOMIAL

A metodologia apresentada neste artigo tem como objetivo calcular os valores de A , B , C e D , das cargas instaladas em diversos pontos do SIN-PY em níveis de tensão de 23kV e 66kV, de forma a minimizar a diferença entre os valores de potência reativa medidos na SE-MD e calculados pelo algoritmo de fluxo de potência [3]. Este processo de minimização foi implementado no Matlab. As variações de potência reativa serão causadas por alterações na posição dos taps dos autotransformadores/reguladores da SE-MD. A Figura 2 mostra um fluxograma simplificado dessa metodologia, onde o PSO foi utilizado para reduzir essa diferença, e foi executado por $k_{MAX} = 15$ iterações.

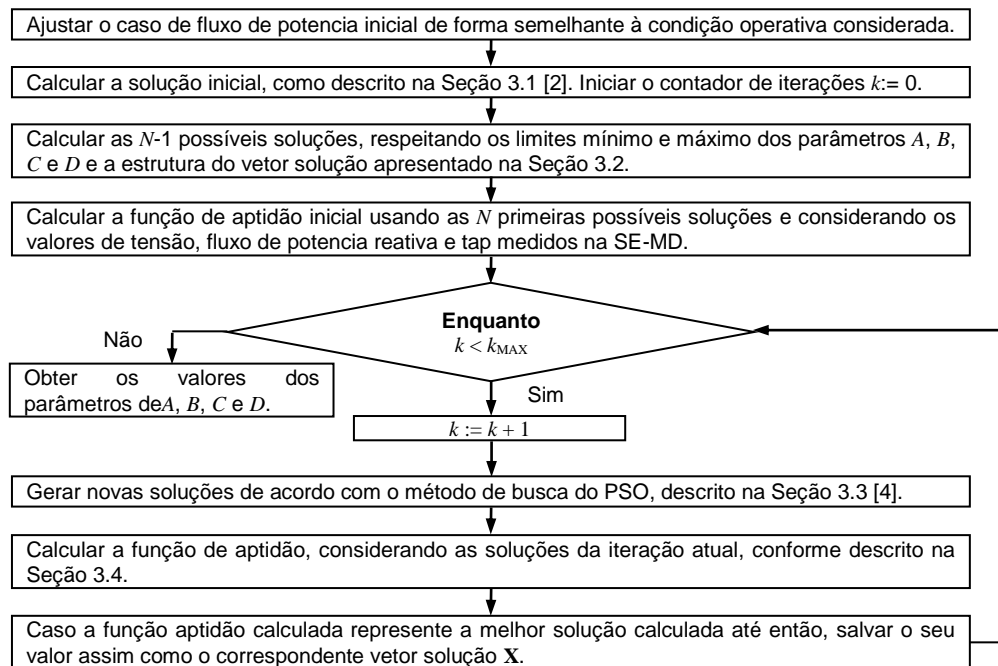


FIGURA 2 – Fluxograma da metodologia proposta

5.1 Solução Inicial

Para o PSO [5] foram geradas $N-1$ soluções aleatórias, respeitando os limites de 0% a 100% dos coeficientes A , B , C e D . A N -ésima solução restante foi obtida aplicando a metodologia descrita em [2], onde foi estimado um modelo de carga equivalente no ponto principal de fornecimento ao SIN-PY desde a UHI 50Hz, isto é, na SE-MD em 220kV. Nesta estimativa os CERs do SIN-PY foram considerados constantes, dado que seus controles alteram

muito pouco a tensão. Esse modelo de carga foi estendido a todo o sistema e apresenta os seguintes parâmetros: $A = 0\%$, $B = 65\%$, $C = 0\%$, $D = 90\%$. O procedimento descrito considerou um total de $N = 20$ possíveis soluções.

5.2 Vetor Solução

O vetor solução que será manipulado pelo PSO é composto por todos os parâmetros das barras de carga em 23kV e 66kV do SIN-PY modelado. Essa expressão é dada por (5),

$$\mathbf{X} = [A_1 \ B_1 \ C_1 \ D_1 \ \dots \ A_b \ B_b \ C_b \ D_b] \quad (5)$$

onde A , B , C e D representam os parâmetros dos modelos de carga mostrados em (3) e (4), e b indica o número total de barras, cujas cargas serão modeladas como ZIP e calculadas pelo procedimento de otimização. O modelo de carga foi calculado por área. No modelo do SIN-PY existem 65 barras de carga, desta forma, é necessário estimar 260 parâmetros de carga.

6.0 - RESULTADOS DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

Nesta seção são apresentados os resultados de regime permanente, que incluem os valores numéricos de A , B , C e D , das equações (3) e (4), da tensão e dos fluxos de potência ativa e reativa, assim como a sua validação mediante simulação dinâmica.

6.1 Cálculo dos parâmetros de carga

Como foi mencionado, os valores de A , B , C e D foram calculados por áreas, porém, como os valores obtidos da otimização foram próximos entre si, foram escolhidos os seguintes: $A = 51\%$, $B = 13\%$, $C = 61\%$ e $D = 1\%$. Neste processo, os valores dos taps foram considerados conhecidos e iguais a aqueles registrados em campo. Ainda que os valores foram calculados por área, a metodologia apresentada também permite calcular os fatores por barra. Desta forma, as cargas do SIN-PY podem ser representadas por 51% de corrente constante, 13% de impedância constante e 36% de potência constante, na parcela de potência ativa. Em tanto que na parcela de potência reativa as cargas podem ser representadas por 61% de corrente constante, 1% de impedância constante e 38% de potência constante.

6.2 Fluxo de Potência

Os demais valores obtidos do processo de otimização são apresentados na Tabela 1, que compara os valores de tensão, potência reativa e ativa, registrados na SE-MD. Nessa tabela percebe-se que o erro calculado pela função de aptidão é da ordem de 4,6%.

Tabela 1 – Resultados de otimização

Tap [kV]	Registro (Scada)			Otimização (fluxo de potência)		
	Tensão [kV]	Potencia Reativa [Mvar]	Potencia Ativa [MW]	Tensão [kV]	Potencia Reativa [Mvar]	Potencia Ativa [MW]
226,406	219,0	-140,152	527,98	215,82	-140,00	517,50
232,444	223,5	-100,052	568,65	220,66	-95,500	525,00

Na Tabela 1 se observa também que o processo de minimização resulta em valores coerentes da tensão calculada, quando comparada com a tensão medida. A potência ativa calculada pelo algoritmo de fluxo de potência também apresentou semelhança com os seus respectivos valores medidos.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos com os modelos de carga da CMO e da referência [2]. Pode se perceber que com esses valores de carga tanto a tensão, potencia reativa e potencia ativa foram próximos aos correspondentes valores registrados pelo Scada (Tabela 1).

Tabela 2 – Modelos de carga

Tap [kV]	Modelo da CMO			Modelo da referência [2]		
	Tensão [kV]	Potencia Reativa [Mvar]	Potencia Ativa [MW]	Tensão [kV]	Potencia Reativa [Mvar]	Potencia Ativa [MW]
226,406	215,82	144,50	516,0	219,56	-144	516,00
232,444	220,44	99,5	523,5	220,44	-99	523,50

6.3 Simulação Dinâmica

Ainda que o procedimento de otimização foi realizado para pequenas variações de tensão, foram utilizados os parâmetros calculados para verificar a influência dos mesmos em simulações dinâmicas de perturbações de grande impacto. Essas simulações foram motivadas por uma perturbação real, que aconteceu no sistema elétrico associado à UHI 50Hz. Essa perturbação, ocorrida no dia 07 de junho de 2014, consistiu na abertura automática de cinco disjuntores da SE-MD, que resultou na abertura da interligação da Itaipu com o SIN-PY em 220kV. A abertura dos disjuntores foi causada pela atuação de relés associados a um esquema especial de proteção, devido ao desligamento do bipolo 1 do elo de corrente contínua de Furnas. Esta perturbação provocou oscilação de potência na UHI 50Hz, que permaneceu interligada ao SIN-PY pela linha que interliga a SE-MD à SE-VHA.

O registro de oscilação de tensão da SE-VHA, obtido na perturbação indicada, foi comparado com os resultados de simulações dinâmicas, como mostrado na Figura 3, que utilizou os valores indicados na seção 6.1. A Figura 3 mostra, além do registro (curva azul) e a oscilação de tensão obtida com os parâmetros calculados (curva verde), a oscilação de tensão obtida com um modelo de carga atual (curva vermelha), utilizado pela Comissão Mista de Operação (CMO), que agrupa as empresas interligadas ao sistema associado à usina de Itaipu, assim como o Operador Nacional do Sistema (ONS). Pode se perceber que as duas curvas obtidas de simulações são semelhantes ao registro considerado, apresentando pequenas diferenças no período transitório.

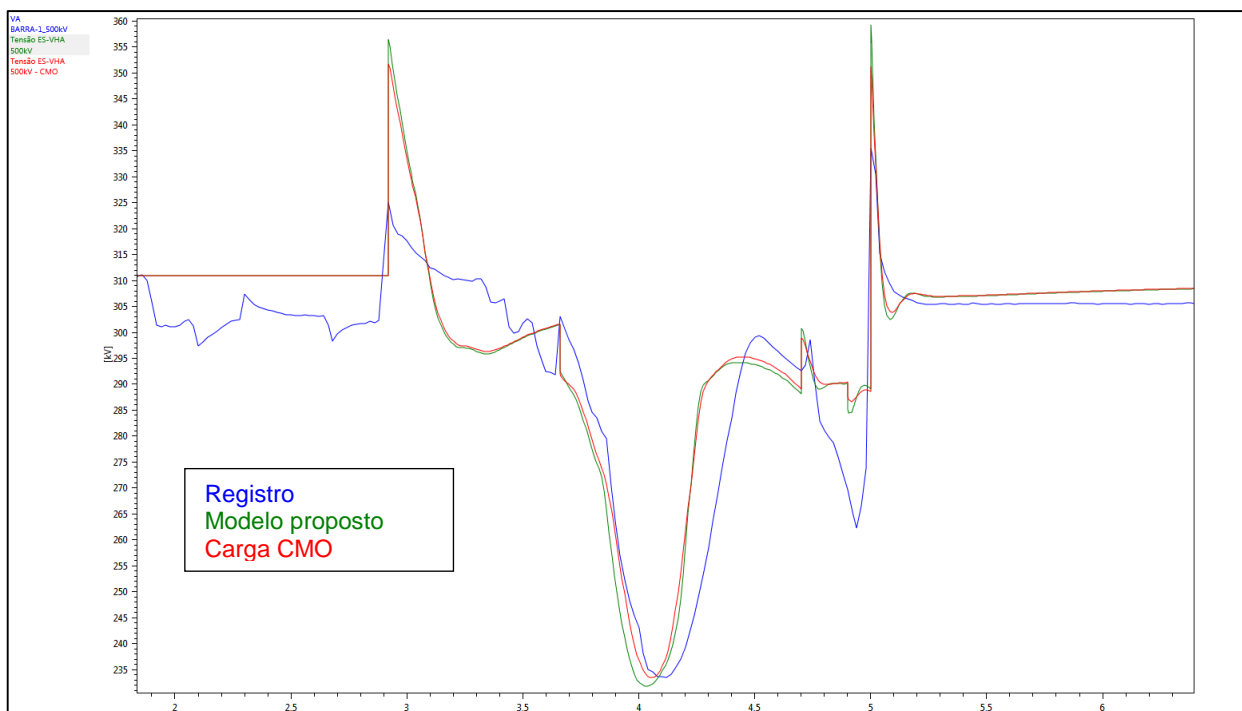


FIGURA 3 – Oscilações de tensão na ES-VHA em 500kV: Modelo calculado e utilizado na CMO

O modelo de carga utilizado pela CMO é representado por 70% de corrente constante e 30% de impedância constante, para a potência ativa. Enquanto que para a potência reativa, essa distribuição é de 0% para corrente constante e 100% para impedância constante.

A Figura 4 a seguir mostra a comparação entre o registro (curva azul) e as oscilações de tensão obtidas por simulações dinâmicas. Nesta figura, a curva vermelha foi obtida considerando um modelo de carga equivalente na SE-MD, conforme calculado em [2]. Esse modelo é representado por 0% de corrente constante, 65% impedância constante e 35% potência constante, na parcela da potência ativa. Na potência reativa, a carga foi representada por 0% de corrente constante, 90% de impedância constante e 10% de potência constante.

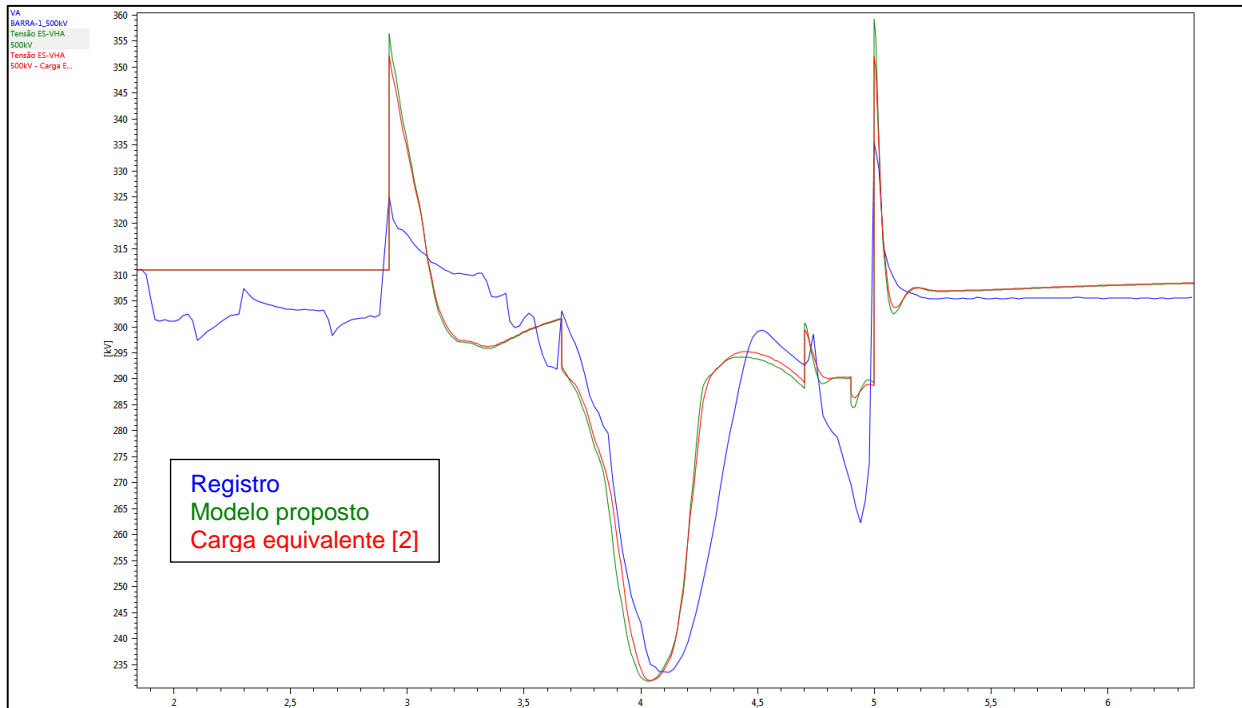


FIGURA 4 – Oscilações de tensão na ES-VHA em 500kV: Modelo calculado e carga equivalente na SE-MD

7.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma metodologia de cálculo dos fatores A , B , C e D do modelo de carga ZIP, para pequenas variações de tensão em regime permanente. Estes fatores correspondem às cargas do SIN-PY, alimentadas em 23kV e 66kV, a partir da SE-MD, subestação integrante do sistema interligado à Usina de Itaipu em 50Hz. Para realizar os cálculos foi formulado um problema de otimização, para o qual foi implementado no Matlab o algoritmo de enxame de partículas ou PSO (*Particle Swarm Optimization*). A função de aptidão utilizada considera a minimização da diferença entre os valores de potência reativa calculados (pelo algoritmo de fluxo de potência [3]) e medidos na SE-MD em 220kV. Este procedimento mostrou ser bastante eficiente para ajustar pequenas variações de potência reativa e, conseqüentemente, de tensão.

Para realizar os cálculos dos fatores do modelo de carga ZIP foi desenvolvida uma rotina entre os programas ANAREDE [3] e Matlab, o que permitiu executar vários casos de fluxo de potência de maneira automática, para minimizar a função de aptidão utilizada. Com esse procedimento foi possível modificar os dados de entrada do algoritmo de fluxo de potência e verificar a influência dos parâmetros da carga na tensão e na potência reativa, obtidos na SE-MD 220kV. Nesta metodologia também podem ser utilizadas medições na carga, em nível de distribuição, porém a Itaipu não tem acesso a esses registros do SIN-PY.

Os resultados mostraram que a minimização da diferença dos valores de potência reativa calculados e medidos, mediante a alteração dos fatores do modelo de carga ZIP resultam num excelente procedimento para ajuste dos parâmetros de carga, para pequenas alterações na tensão, causadas por alterações no tap de transformadores manobráveis sob carga. Os resultados dinâmicos obtidos com esses parâmetros foram próximos aos obtidos por outro trabalho [2], que também analisou esse mesmo sistema, porém sem considerar toda a influência do sistema de transmissão do SIN-PY e principalmente dos CER do sistema. Embora a metodologia apresentada represente um avanço com respeito a metodologia [2], os resultados mostram que ainda há investigações a serem realizadas.

Como possíveis trabalhos futuros, devido a que este trabalho se encontra em sua etapa inicial, sugere-se a inclusão de variações de frequência para o cálculo dos parâmetros da carga, utilização maior quantidade de manobras em taps de transformadores (procedimento que pode consumir tempo computacional considerável), assim como a utilização de modelos de cargas dinâmicas.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KUNDUR, P. Power System Stability and Control. Palo Alto, CA: McGraw Hill, Inc., 1994.
- (2) SOSA RÍOS, M.L., VERA AGÜERO, P.E. "Influencia de la línea de 500kV en el comportamiento de la carga del SIN-PY", XI Seminario del Sector Eléctrico Paraguayo, Asunción, Paraguay, 24 a 26 de setembro de 2014.

- (3) CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – CEPEL, Manual do Usuário, ANAREDE. V08. Março de 2005.
- (4) SOSA RÍOS, M.L.,GONZÁLEZ-FERNÁNDES, R.A. “Coordinated Tuning of Power System Controllers Using Metaheuristic Techniques”, 18th Power Systems Computation Conference, Wroclaw, Poland, 18-22 August 2014.
- (5) KENNEDY, J.,EBERHART, R. “Particle swarm optimization”, IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, Nov/Dec. 1995.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Manuel Leonardo Soza Ríos é integrante da divisão de Estudos Elétricos e Normas (OPSE.DT) da Itaipu Binacional. É formado em engenharia elétrica e mestre em engenharia elétrica, ambos pela Universidade Nacional do Leste (Paraguai), e doutorando na Universidade de São Paulo (USP). Suas áreas de interesse incluem o ajuste de dispositivos de controle, utilizados em sistemas de potencia para aumento de estabilidade transitória e à pequenas perturbações, estudos elétricos de estabilidade de tensão e análise de transitórios eletromagnéticos.

Alfredo Javier Mezger Szostak é integrante da divisão de Estudos Elétricos e Normas (OPSE.DT) da Itaipu Binacional. É formado em engenharia elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, com mestrado na Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas de interesse incluem análise da operação de sistemas elétricos, estudos de estabilidade de frequência e tensão, e estudos de transitórios eletromagnéticos.