



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

GAT 26
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

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

MODELO DA CARGA DO CONSUMIDOR INDUSTRIAL ALUMAR PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE NO DOMÍNIO DO TEMPO

Gilson Soares da Silva Júnior *
ALUMAR

Vicente Leonardo Paucar
Universidade Federal do Maranhão

Venilton Rodrigues de Oliveira
ONS

RESUMO

Nesse trabalho apresenta-se uma proposta de adequação da modelagem de carga do consumidor industrial ALUMAR, para estudos de fluxo de potência e de estabilidade no domínio do tempo, implementada nos programas ANAREDE e ANATEM. Em virtude da grande demanda e da localização da ALUMAR no Sistema Interligado Nacional (SIN), torna-se necessário modelar suas cargas com bastante precisão, nos estudos que envolvam o sistema elétrico Norte-Nordeste. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos a indústria, tornou-se necessário implementar melhorias na modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

PALAVRAS-CHAVE

ALUMAR, modelagem de carga, ANAREDE, ANATEM, estabilidade no domínio do tempo, estabilidade em regime permanente, estabilidade transitória, estabilidade de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil há duas grandes redes interligadas: os sistemas interligados Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste, tendo este último, linhas de transmissão de mais de 2000 km, em 500 kV. A interligação dessas duas grandes redes é motivo de vários estudos de estabilidade angular, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão, uma vez que qualquer instabilidade nesse trecho afeta principalmente as áreas do sistema Norte-Nordeste que possuem linhas de transmissão extensas. Uma dessas áreas afetadas é o sistema de transmissão que alimenta a ilha de São Luis, a capital do Estado do Maranhão. Os problemas de instabilidade nessa região ocorrem quando uma das duas linhas de transmissão de 500 kV, que alimenta São Luis, é desligada, uma vez que nessa condição a outra linha fica sobrecarregada. Além da grande São Luis, que hoje tem uma demanda de aproximadamente 200 MW, essas duas linhas de transmissão em 500 kV alimentam uma das maiores plantas de produção de alumina e alumínio do mundo, a ALUMAR, com uma demanda total de 825 MW.

A ALUMAR é uma indústria de produção de alumina e alumínio, sendo um consórcio formado pelas empresas Alcoa, BHPBilliton, Alcan, e Abalco. Em virtude da grande demanda e da localização da ALUMAR no Sistema Interligado Nacional (SIN), torna-se necessário modelar suas cargas com bastante precisão, nos estudos que envolvam o sistema elétrico Norte-Nordeste. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, torna-se necessário implementar melhorias na modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Esse modelo foi proposto em 1999 pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), sendo

que desse ano até os dias atuais, a indústria sofreu modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões.

Baseado nisso, o presente artigo tem como objetivo descrever as melhorias realizadas na modelagem de carga da ALUMAR, implementadas nos programas ANAREDE e ANATEM, as quais são utilizadas para representação da carga em estudos de fluxo de potência, estabilidade, planejamento e operação. Primeiramente será feita uma breve descrição da indústria ALUMAR, destacando-se as características da sua carga. Em seguida, serão descritos os modelos de cargas anteriormente disponíveis no banco de dados do ONS e o modelo proposto neste trabalho. Por fim será feita uma comparação dos resultados de simulações utilizando os dois modelos, demonstrando as vantagens do novo modelo e também uma avaliação do perfil de tensão frente a distúrbios no SIN.

2.0 - ASPECTOS DO CONSUMIDOR INDUSTRIAL ALUMAR

2.1 O consumidor industrial ALUMAR

A ALUMAR é considerada um dos maiores complexos industriais de alumina e alumínio do mundo, atualmente com uma produção anual de alumina de aproximadamente 1,5 milhões de toneladas e de 450 mil toneladas de alumínio. A fábrica está subdividida em duas áreas, a Redução e a Refinaria. Na Refinaria, ocorre o processo de refino da bauxita, tendo como produto final a alumina. O processo para extrair alumina a partir da bauxita é conhecido como "Processo Bayer", processo hidro-metalúrgico que consiste de cinco etapas: moagem, digestão, clarificação, precipitação e calcinação. A Redução recebeu esse nome devido ao processo de redução eletrolítica da alumina para a produção de alumínio que ocorre no local. Esta redução ocorre da seguinte forma: a alumina é colocada no interior de cubas eletrolíticas, que são ligadas em série por corrente contínua de aproximadamente 230 kA e alimentadas por tensão de apenas 4,5 V, sendo 2V para o processo eletrolítico, 2V para manter a temperatura da cuba em torno de 1000 °C e 0,5V corresponde a queda de tensão devido às perdas internas das cubas e as perdas nos barramentos.

A energia elétrica fornecida a ALUMAR, provém da subestação São Luís II da ELETRONORTE. Nessa subestação é realizada a redução do nível de tensão de 500 kV para 230 kV e transmitida para a ALUMAR através de duas linhas de transmissão, chamadas de Circuito 1 (C1) e Circuito 2 (C2). No trecho entre a SE São Luís II e a ALUMAR, há uma bifurcação dos dois circuitos, indo dois para a Redução (Linhas 1 e 2) e dois para a Refinaria (Linhas 4 e 5). As Linhas 1 e 2 vão para a subestação principal da Redução, chamada de SE-112Y, e as Linhas 4 e 5 vão para a subestação principal da Refinaria chamada SE-112X.

A SE-112Y é responsável pelo fornecimento de energia às Salas de Cubas e aos circuitos auxiliares da Redução. Todos os circuitos auxiliares são alimentados por dois transformadores de 50 MVA de 230 kV / 13,8 kV. As Salas de Cubas são as principais cargas da indústria, correspondendo a aproximadamente 92% do consumo total. Como o processo de eletrólise necessita de corrente contínua e como o fornecimento para a ALUMAR é em corrente alternada (CA), é necessário fazer o rebaixamento, regulação e retificação. Para cada Sala de Cubas existe um transformador abaixador de 230 kV para 34,5 kV, com potências variando de 225 MVA até 343 MVA. Conectados em série com cada transformador abaixador, estão os transformadores reguladores de 34,5 kV / 34,5 kV \pm 10%, cuja função é controlar a tensão e a corrente na Sala de Cubas. Após o rebaixamento e a regulação é feita a retificação através de 6 pontes retificadoras à diodo, sendo cada uma com capacidade de 38 kA, 45 kA e 48 kA (6 pulsos), dependendo da Sala de Cubas, conectadas em paralelo de forma a garantir uma menor corrente circulando em cada ponte. Utilizam-se transformadores com conexões especiais (zig-zag ou delta expandido) para fornecer diferentes defasagens resultando em um cancelamento harmônico de corrente no primário. Além disso, paralelo aos retificadores existe um filtro de harmônicos de 19,2 MVar sintonizado para a 5ª ordem, cuja função é melhorar o fator de potência além da sua principal função. Para regulação do nível de tensão nas barras da ALUMAR e de algumas SE's da área do Maranhão, na SE-112Y estão instalados três bancos de capacitores em 230 kV, BC-1, BC-2 e BC-3, cada um solidário a uma Sala de Cubas. Existe ainda na barra de 230 kV da SE São Luís II mais dois bancos.

Já a alimentação elétrica da Refinaria é feita através da subestação SE-112X, que por sua vez alimenta cubículos de 13,8 kV, fornecendo assim energia elétrica aos transformadores das subestações internas à área da Refinaria, Porto e Retroporto. Para correção do fator de potência da Refinaria, estão instalados na barra de 13,8kV da SE-112X, dois bancos de capacitores de 12 MVar.

3.0 - MODELO DE CARGA DA ALUMAR

3.1 O modelo de carga anterior

A modelagem da ALUMAR atualmente disponibilizada pelo ONS para os programas ANAREDE e ANATEM fornece uma representação do sistema CC das Salas de Cubas baseado em modelos de conversores CA-CC para transmissão em corrente contínua, sendo modelado tanto o comportamento estático quanto o dinâmico das cubas.

O comportamento dinâmico de cada cuba é basicamente representado por um circuito RL em série além de uma fonte de tensão constante. A resistência corresponde à dissipação de energia durante o processo de redução do alumínio, e a indutância é responsável (junto com a resistência) pela constante de tempo de decaimento da corrente CC quando a cuba é desenergizada. A fonte de tensão representa a tensão residual (V_{res}) após a interrupção de corrente pelos diodos (chamado efeito "pilha" decorrente do processo de eletrólise), permanecendo sempre constante, independentemente do ponto de operação em carga, variando somente com o número de células conectadas em cada linha de cubas.

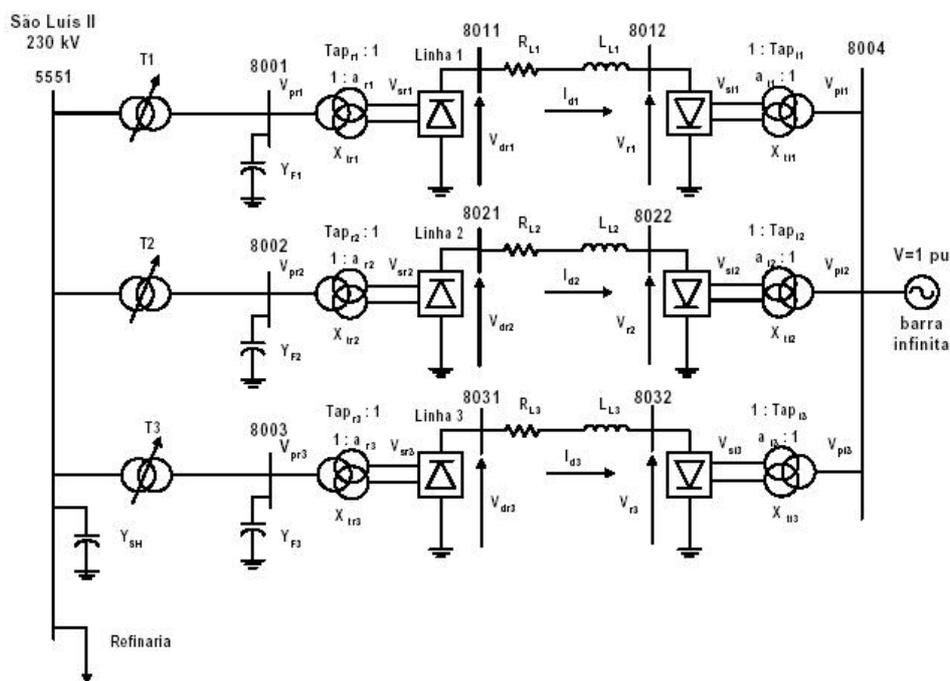


FIGURA 1 – Modelo de carga atual

Na Figura 1 é demonstrada a representação do sistema CA que alimenta a Alumar, o qual foi modelado considerando algumas simplificações, principalmente nas linhas de transmissão entre a SE São Luis II e a Alumar. As barras de São Luis II 230kV e ALUMAR 230kV são eletricamente muito próximas e, portanto foram representadas por uma única barra (5551). Os bancos de capacitores presentes nas duas barras mencionadas foram somados e colocados como um "shunt" total na barra da SE São Luis II. Já a Refinaria e os circuitos auxiliares da Redução foram modelados como potência constante, ou seja, com P e Q fixos e colocados na barra de São Luis II 230kV. Nas barras de 34,5 kV CA que alimentam os conversores (8001, 8002 e 8003) foram colocados os filtros de harmônicos de 19,2 MVar para cada linha de cubas, na tensão de 1,0 pu. A barra 8004 é uma barra fictícia associada à representação das tensões residuais em cada Sala de Cubas.

3.2 O modelo de carga proposto

A modelagem disponível nos arquivos do banco de dados disponibilizado pelo ONS foi proposta em 1999, sendo que desse ano até os dias atuais, a indústria sofreu modificações tais como mudança de parâmetros de processo e algumas expansões. Além disso, a necessidade de realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, tornou-se necessário implementar melhorias em alguns aspectos na modelagem. As melhorias consistiram basicamente em modelar com mais detalhes o sistema de transmissão entre a ELETRONORTE e a ALUMAR e inserir um modelo mais adequado a Refinaria e aos circuitos auxiliares da

Redução. No sistema CC não houve alterações de componentes da modelagem, no entanto, foi necessário atualizar vários parâmetros de processo.

No sistema de transmissão, embora as barras da SE São Luís II e ALUMAR sejam eletricamente muito próximas foram criadas mais duas barras (8100 e 8200), separando os circuitos que alimentam cada Sala de Cubas. O Circuito 1 foi modelado como a barra 8100 e o Circuito 2 como a barra 8200. Os bancos de capacitores foram separados, de acordo com a potência em cada barra. Sendo assim, foram conectadas à essas barras os circuitos das Salas de Cubas conforme mostrado na Figura 2.

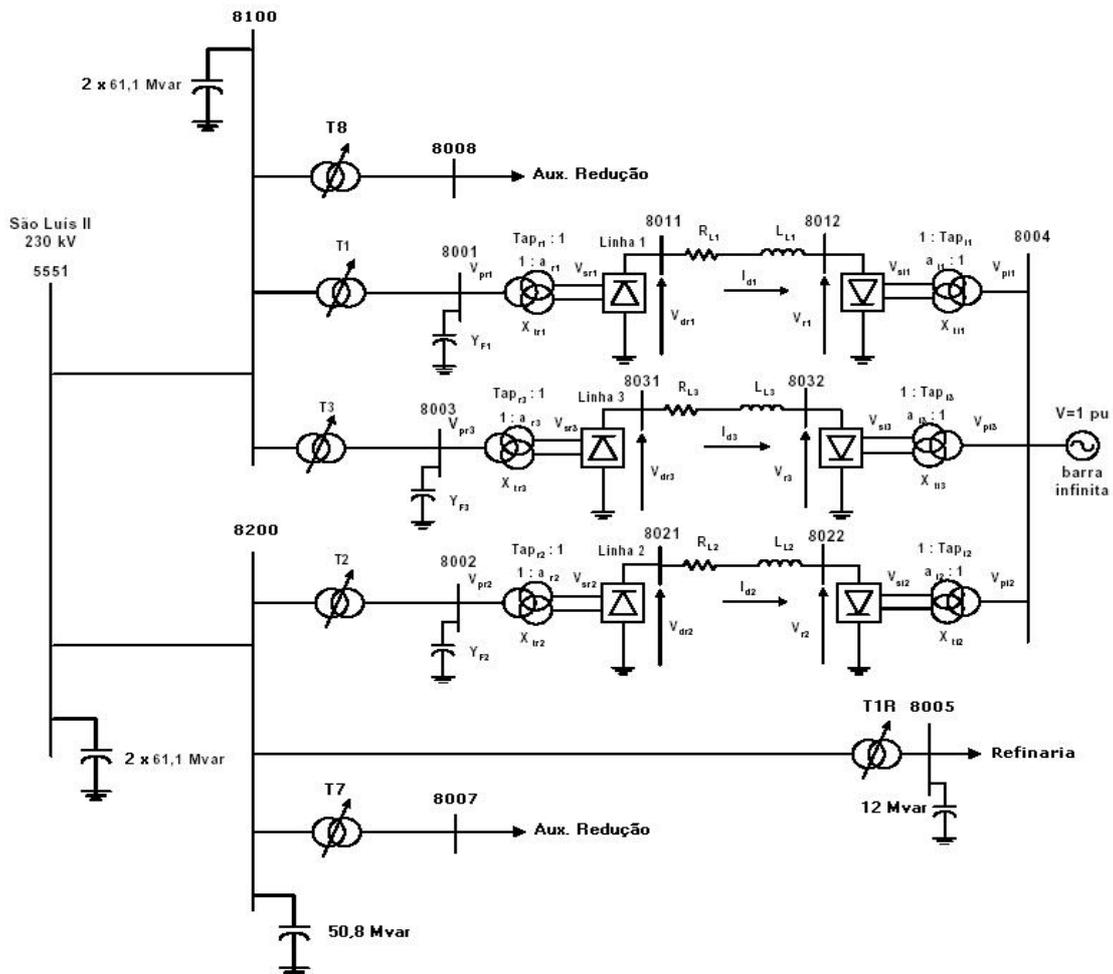


FIGURA 2 – Modelo de carga proposto

A carga da Refinaria e dos circuitos auxiliares da Redução é constituída na sua grande maioria por motores de indução com potências elevadas. Logo, a modelagem utilizada para a Refinaria e aos circuitos auxiliares da Redução foi representada por cargas tipo motores de indução, e não como modelos potência constantes. Essa modelagem é de essencial importância na análise do comportamento do sistema, uma vez que os motores de indução apresentam alto consumo de potência reativa durante as condições em que há queda de tensão e, portanto, merecem cuidadosa consideração nos estudos de estabilidade, principalmente quando parcelas significativas deste tipo de carga estão presentes em áreas críticas.

Durante simulações com os dados da modelagem anterior, foi observado que os valores de correntes nos elos CC e de potência em cada Sala de Cubas estavam incoerentes com os valores reais. Ao avaliar todos os dados da modelagem, foi verificado que os principais parâmetros tiveram que ser modificados. Primeiramente, foram feitas várias medições em situações normais de operação, durante transitórios eletromagnéticos no sistema e após desligamentos para avaliar os dados. A partir desses novos dados, pode-se calcular todos os parâmetros necessários tais como: tensão residual total, resistência total, a indutância total, e a constante de tempo para cada Sala de Cubas, além das tensões especificadas em cada barramento, ajustes dos controles dos conversores,

dentre outros. Na Tabela 1 mostra-se um comparativo do modelo anterior com o modelo proposto, dos principais parâmetros das Salas de Cubas.

TABELA 1 – Parâmetros das Salas de Cubas

	Sala de Cubas 1		Sala de Cubas 2		Sala de Cubas 3	
	Anterior	Proposto	Anterior	Proposto	Anterior	Proposto
Número de cubas	204	204	250	250	156	256
Correntes CC (kA)	216,4	230	217	230	218	230
Tensão CC (V)	918	918	1125	1125	700	1152
Tensão por cuba (V)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Potência (MW)	201	216	245	265	153	271
Resistência total (Ω)	0,00294	0,00271	0,00352	0,00332	0,00219	0,00341
Indutância total (mH)	1,0126	1,0126	1,2410	1,2410	0,7744	1,2708

4.0 - SIMULAÇÕES

Todas essas melhorias foram apresentadas ao ONS em reunião na sede do Rio de Janeiro no final do mês de março de 2006, sendo todas elas validadas e aprovadas e já estão disponíveis na nova revisão dos arquivos do banco de dados disponibilizados pelo ONS. Em estudos envolvendo o SIN, a fim de evitar problemas de convergência, devido a grande quantidade de barras do SIN, o ONS irá adotar o modelo proposto, mas sem as alterações realizadas na arquitetura do sistema. Para estudos que necessitem de mais precisão ou estudos envolvendo diretamente o consumidor ALUMAR será adotado o modelo proposto com todas as alterações.

Os resultados comparativos apresentados durante a validação serão apresentados nesta seção. Primeiramente foi realizada uma simulação em regime permanente através do ANAREDE. A comparação dos resultados obtidos com valores medidos em campo é apresentada na Tabela 2.

TABELA 2 – Comparação dos resultados em regime permanente

Barra	Anterior	Proposto	Medido
5551	1,021	1,022	1,022
8100	-	1,022	1,021
8200	-	1,022	1,021
8001	1,027	1,001	1,001
8002	0,971	0,961	0,960
8003	0,651	0,983	0,982
8005	-	1,022	1,022

Como se pode observar, existem diferenças entre os três resultados, sendo que o modelo proposto apresentou resultados muito mais aproximados dos medidos em campo. As diferenças entre os resultados do modelo anterior e o proposto, devem-se principalmente a modificação nos parâmetros CC das Salas de Cubas, uma vez que as tensões e correntes aumentaram. Os dados de algumas barras não puderam ser comparados uma vez que o modelo anterior é simplificado.

Em seguida foram feitas algumas simulações em regime transitório através de programa ANATEM. O caso escolhido foi a desligamento intempestivo de um dos dois circuitos de 500 kV entre as SE's de Presidente Dutra e São Luís II.

Nesse caso, observou-se uma pequena diferença entre os resultados dos dois modelos, sendo que durante o transitório o perfil de tensão para o modelo anterior atingiu valores menores que o do modelo proposto, embora se estabilizando no mesmo nível. Essas diferenças são ocasionadas principalmente pela redução do valor do banco de capacitores shunt instalado na barra, uma vez que no modelo anterior todos os bancos foram conectados nessa barra e no modelo proposto foram distribuídos em cada barra de acordo com o arranjo físico. O mesmo comportamento ocorreu nas barras dos Circuitos 1 e 2 (8100 e 8200) da Redução.

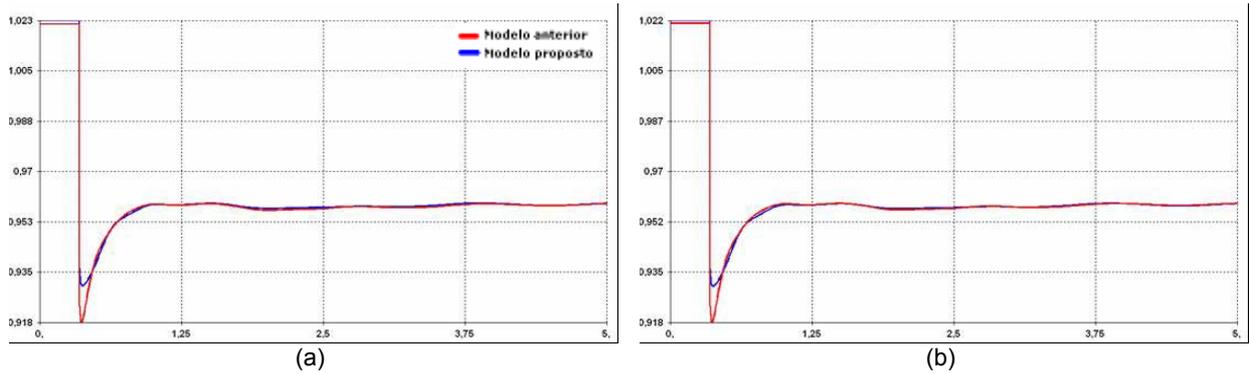


Figura 3 – (a) Comparação da tensão na Barra 5551

(b) Comparação da tensão nas barras 5551 e 8100

Nas barras de alimentação das Salas de Cubas e no sistema CC houve também diferenças entre os dois modelos. Nesse caso, o comportamento da tensão foi praticamente o mesmo, uma vez que a modelagem não foi modificada, no entanto observou-se uma grande diferença entre os níveis de tensão, ocasionada pela modificação dos parâmetros CC das três Salas de Cubas, conforme mostrado na Figura 4. Para a Sala de Cubas 3, essa diferença foi mais acentuada que das outras duas Salas de Cubas, conforme Figura 4(b). Tal diferença deve-se à ampliação da Sala e Cubas 3 que acrescentou 100 cubas, aumentando a tensão CC e consequentemente a tensão CA, além da grande variação no valor da resistência e reatância indutiva dessas cubas.

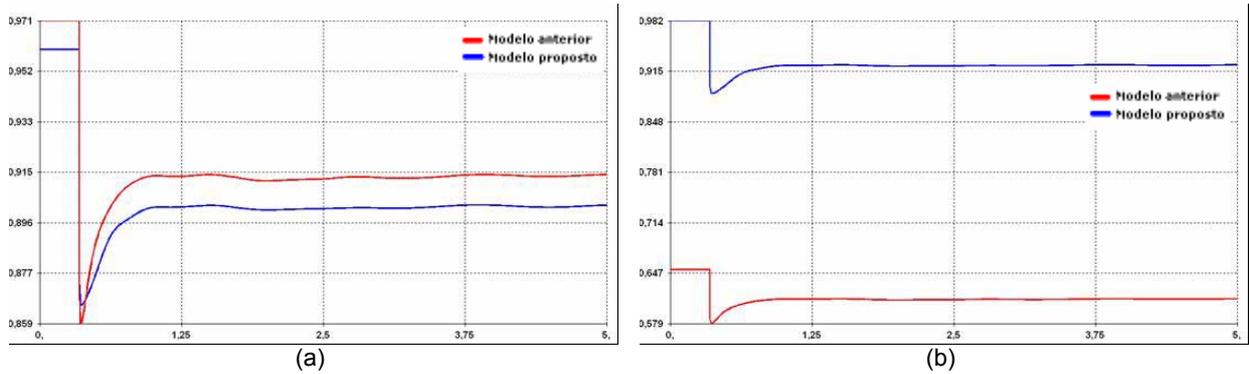


Figura 4 – (a) Comparação tensão na barra 8002

(b) Comparação tensão na barra 8003

Foi verificado também o comportamento da tensão nas barras da Refinaria e dos Circuitos auxiliares da Redução. Como no modelo anterior essa essas cargas estavam concentradas na barra 5551, foi comparado o perfil de tensão entre as barras 5551 com 8005 e 5551 com 8007. Como se pode observar nas Figuras 5(a) e 5(b), ocorreram significativas diferenças, as quais são ocasionadas pela absorção da potência reativa dos motores de indução durante o transitório e quando eles estão trabalhando com subtensão.

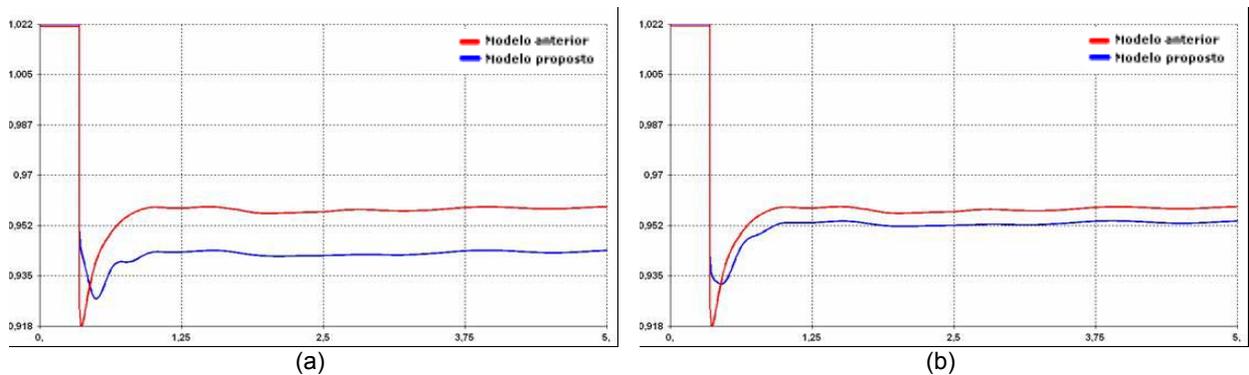


Figura 5 – (a) Comparação tensão na barra 5551 e 8005

(b) Comparação tensão nas barras 5551 e 8007

Além disso, foi verificado o perfil de tensão nas SE's de Presidente Dutra (5580) e Imperatriz (5590). Nessas duas subestações também houve diferenças entre os dois modelos, conforme mostrado na Figura 5.

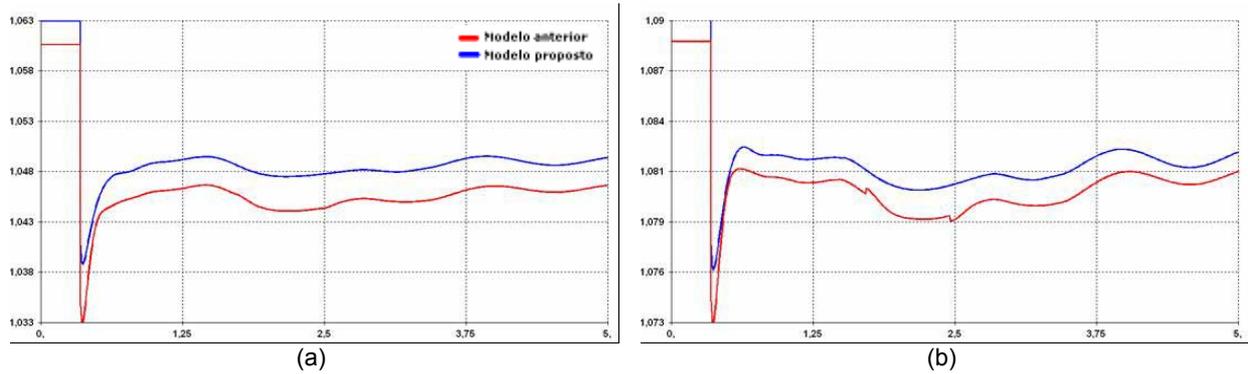


Figura 5 – (a) Comparação tensão na barra 5580

(b) Comparação tensão na barra 5590

Em todos os gráficos mostrados nesta seção foram observadas diferenças consideráveis entre os resultados do modelo anterior e o modelo proposto. Em algumas barras, foi possível monitorar e comparar esses resultados com valores medidos em campo sendo constatado que os resultados do modelo proposto estão mais aproximados que os do modelo anterior.

5.0 - CONCLUSÃO

Os estudos elétricos constituem uma etapa importante no planejamento e avaliação da performance de qualquer sistema elétrico de potência. Para que esses estudos sejam confiáveis, é imprescindível que a modelagem dos componentes seja a mais real possível. No caso da modelagem do consumidor industrial ALUMAR nos programas ANAREDE e ANATEM, ela foi elaborada de forma precisa a atender as necessidades na época em que foi elaborada e visando somente avaliar o SIN. No entanto, com o passar dos anos, essa modelagem não foi atualizada, fazendo com que houvesse diferenças entre os valores encontrados na simulação e os valores reais, principalmente na área Maranhão do SIN. Além disso, o modelo proposto aqui neste artigo, visa a realização de simulações mais detalhadas, principalmente para os casos de defeitos internos à indústria, sem perder a precisão para o restante do SIN.

Os resultados das simulações confirmaram a adequação do modelo para representação dos fenômenos dinâmicos associados à carga da ALUMAR. Em regime permanente, pode-se observar significativa diferença entre o modelo atual e o proposto, sendo comprovado que o modelo proposto está mais aderente com as medições realizadas. O mesmo aconteceu com as simulações no regime dinâmico, sendo verificadas significativas diferenças, causadas principalmente pelo aumento da carga da Sala de Cubas 3.

Nesse contexto, pode-se avaliar que os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que o modelo proposto da ALUMAR obteve resultados satisfatórios e, além disso, todas as melhorias foram validadas e aprovadas pelo ONS e estão disponíveis na nova revisão dos arquivos do banco de dados disponibilizados pelo ONS. Sendo assim, este trabalho é apenas uma contribuição inicial neste vasto campo que vão além do que foi aqui exposto.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RANGEL, R. D., GOMES JR., S. Modelagem da Carga do Consumidor Industrial ALUMAR nos Programas ANAREDE e ANATEM; CEPEL, 1999.
- (2) KUNDUR, P. Power System Stability and Control; McGraw-Hill, 2002.
- (3) ARRILLAGA, J., WATSON, N. R. Computer Modelling of Electrical Power System; Wiley & Sons Ltd, 2001
- (4) GROETAERS, M., Gomes, P. M., SCHILLING, Th. Interligação Norte-Sul: Desafios, Problemas, Soluções e Perspectivas para a Operação Elétrica Integrada Nacional; XV SNPTEE, 1995.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Gilson Soares da Silva Júnior
 Nascido em São Luis, MA em 27 de julho de 1979.

Graduação (2002) em Engenharia Elétrica: UFMA – Universidade Federal do Maranhão – São Luis MA
Mestrado em andamento na UFMA – Universidade Federal do Maranhão – São Luis MA
Empresa: ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão, desde 2002
Engenheiro Eletricista Sênior do Sistema de Força da ALUMAR

Vicente Leonardo Paucar

Doutor em Engenharia Elétrica: UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
Empresa: UFMA – Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia de Eletricidade.
Professor Adjunto, UFMA

Venilton Rodrigues de Oliveira

Nascido no Rio de Janeiro, 18, em Outubro de 1968.
Graduação (1992) em Engenharia Elétrica: UFF – Universidade Federal Fluminense – Niterói – RJ
Mestrado em andamento na UFF - Universidade Federal Fluminense – Niterói – RJ
Empresa: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, desde 2000.
Engenheiro do Sistema de Potência Sênior do ONS.