

Influence of the Composite Load Models in the Dynamic Voltage Stability

Influência dos modelos das Cargas na Estabilidade Dinâmica de Tensão

R. M. Monteiro Pereira - rmfm@isec.pt

IPC/ Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Adelino J. C. Pereira - ajcp@isec.pt

IPC/ Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

C. M. Machado Ferreira - cmacfer@isec.pt

IPC/ Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, INESC Coimbra

F. P. Maciel Barbosa - fmb@fe.up.pt

INESC Porto, DEEC/FEUP,

Abstract

In the last years, important studies have shown the critical effect of load representation in stability studies and, therefore, the need to find more accurate load models than those traditionally used. It is generally recognized that load representation is an important element in voltage stability studies since it affects power system dynamic performance. Given an electric power system topology, the behaviour of a system following a contingency, or the possibility of voltage collapse occurring, depends to a great extent on how the loads are represented. In this paper it is studied and analysed the effect of the composite load models in the dynamic voltage stability of an electric power network. A severe contingency situation was simulated. The automatic voltage regulators of the generating units, the turbine speed governors, and the under load tap changers models were taken into account. The simulation results were obtained using the EUROSTAG software package. Finally, some conclusions that provide a better understanding of the dynamic voltage stability are pointed out.

Resumo

Ao longo destes últimos anos, vários estudos têm demonstrado o efeito crítico da representação das cargas em estudos de estabilidade de tensão e, portanto, a necessidade de encontrar modelos de carga mais precisos do que os utilizados tradicionalmente. Não sendo possível representar de forma exata e para cada momento a composição das cargas de uma rede elétrica, optou-se neste estudo por considerar diferentes cenários para a modelização das cargas, procurando desta forma identificar quais as piores situações do ponto de vista da estabilidade de tensão. Neste artigo é estudado e analisado a estabilidade dinâmica de tensão de numa rede de teste. Nas simulações realizadas foram modelizados as cargas, os reguladores automáticos de tensão dos geradores síncronos e os dispositivos de regulação de velocidade das turbinas. Os resultados das simulações foram obtidos utilizando o pacote de programas computacionais EUROSTAG, desenvolvido pela Tractebel e pela Electricité de France.

Keywords

Electric Power System, Load Models, Voltage Collapse, Voltage Stability

Palavras-chave

Colapso de tensão, estabilidade de tensão, modelos de cargas, sistema de energia elétrica.

Influência dos modelos das Cargas na Estabilidade Dinâmica de Tensão

1. Introdução

Nos últimos anos, o fenómeno da estabilidade de tensão tem merecido muita atenção por parte dos investigadores, devido ao número significativo de colapsos de tensão que ocorreram nos Sistemas de Energia Elétrica (SEE) de diferentes países. A importância da escolha dos parâmetros e dos modelos das cargas em estudos de estabilidade de tensão das redes elétricas é bem conhecida. Nenhum modelo de carga é unanimemente aceite nos estudos de estabilidade de tensão. Em comparação com os geradores e o sistema de transmissão de energia elétrica, as cargas têm características próprias e especiais. De facto, as cargas podem apresentar um comportamento estocástico, transitório, não contínuo e são habitualmente dispersas. É difícil, senão mesmo impossível, encontrar um único modelo para descrever tanto as características dinâmicas, como as características estáticas de um SEE de grandes dimensões. Além disso, o comportamento dinâmico dos modelos agregados de cargas em baixa tensão tem um efeito importante na estabilidade dinâmica da tensão de um sistema elétrico [1], [2].

Neste artigo, é analisada a estabilidade dinâmica de tensão de uma rede de teste, investigando-se o comportamento de diferentes modelos, incluindo modelos agregados de cargas. Para cada um destes modelos de cargas é analisado, após a saída de serviço de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, o comportamento dos diferentes dispositivos da rede tais como: a evolução do consumo das cargas; as mudanças de tomadas do transformador com tomadas de regulação em carga ULTC (*Under Load Tap Changers*); a atuação do regulador automático de tensão AVR (*Automatic Voltage Regulator*) e do Limitador de sobre-exitação OXL (*Overexcitation Limiter*). Os resultados das simulações efetuadas neste estudo foram obtidos utilizando o pacote de programas computacionais EUROSTAG [3], desenvolvido pela Tractebel Engineering e pela RTE (*Réseau de Transport d'Électricité*).

2. Análise da estabilidade de tensão

A figura 1 representa o esquema unifilar da rede de teste utilizada nos estudos da análise de estabilidade de tensão. Os dados da rede e os resultados do trânsito de potências estão disponíveis em [4]. O transformador elevador localizado entre os barramentos N1 e N2, da figura 1, é um transformador sem tomadas de regulação em carga. O transformador redutor situado entre os barramentos N3 e N4 está equipado com tomadas de regulação em carga, para regular a tensão no barramento N4.

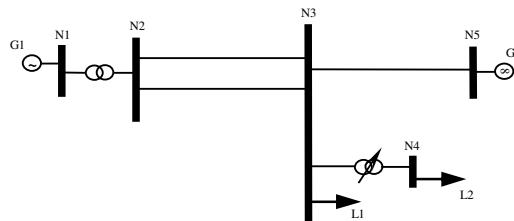


Figura 1 - Esquema unifilar da rede de teste

2.1 Descrição dos cenários

A perturbação considerada consiste na saída de serviço (no instante de tempo igual a 50 s) da linha aérea de transmissão de 380 kV entre os barramentos N3 e N5. Com o objetivo de

mostrar a importância do modelo das cargas no estudo da estabilidade de tensão, optou-se pela simulação de dois cenários.

No cenário I são simulados dois casos com diferentes modelos de cargas exponenciais para a carga L1 do barramento N3. No caso A, a carga é modelizada como 100 % impedância constante (tabela 1) e, no caso B, a carga é modelizada como 100 % potência constante (tabela 2). No cenário II analisam-se dois modelos de um agregado de cargas para a carga L1 do barramento N3. No caso C, o agregado de cargas representa consumidores residenciais (tabela 3) e, o caso D, retrata consumidores industriais (tabela 4) em que o modelo de carga utilizado é composto por um modelo exponencial (potência constante) e um modelo dinâmico (motores de indução). Nos dois cenários a carga L2 do barramento N4 é sempre modelizada como 100 % impedância constante.

A modelização estática das cargas utilizada neste estudo é realizada através do modelo exponencial representado pelas equações (1) e (2):

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\alpha \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^\gamma \quad (1)$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\beta \left(\frac{\omega}{\omega_o} \right)^\delta \quad (2)$$

onde:

P e P_o - valores da potência ativa atual e inicial (ou de referência), respetivamente;

Q e Q_o - valores da potência reativa atual e inicial (ou de referência), respetivamente;

V e V_o - valores da tensão atual e inicial (ou de referência), respetivamente;

ω e ω_o - velocidade angular e velocidade de referência, respetivamente;

α , β , γ e δ - fatores exponenciais.

Tabela 1- Caso A, modelização da carga L1 como impedância constante

Carga L1	Caso A	Características estáticas			
		α	β	γ	δ
100 %	Impedância constante	2	2	0	0

Tabela 2- Caso B, modelização da carga L1 como Potência constante

Carga L1	Caso B	Características estáticas			
		α	β	γ	δ
100 %	Potência constante	0	0	0	0

Tabela 3 - Caso C, modelização da carga L1 como carga residencial

Carga L1	Caso C	Características estáticas			
		α	β	γ	δ
25 %	Lâmpadas incandescente	1.54	0	0	0
30 %	Frigorífico e congelador	0.8	2.5	-1.4	0.5
25 %	Máquina de lavar roupa	0.08	1.6	1.8	2.9
20 %	Televisão a cores	2	5.2	-4.6	0

Tabela 4 - Caso D, modelização da carga L1 como carga industrial

L1	Caso D				
	Carga Industrial				
		Características estáticas			
		α	β	γ	δ
25 %	Potência constante	0	0	0	0
		Características dinâmicas			
		H [s]	R_s [p.u.]	X_s [p.u.]	X_m [p.u.]
75 %	Motores de indução	0.600	0.010	0.145	3.300
				R_r [p.u.]	X_r [p.u.]
				0.008	0.145

onde:

- H - é a constante de inércia
- R_s - é a resistência do estator
- X_s - é a reactância de fugas no estator
- X_m - é a reactância magnetizante
- R_r - é a resistência do rotor
- X_r - é a reactância de fugas no rotor

Os motores de indução são representados com rotor de dupla gaiola em curto-círcuito. A curva da velocidade do binário da carga mecânica do motor é aproximada por uma função linear *piece-wise* [3]. Com este estudo pretende-se mostrar, para os quatro casos de modelização da carga, como a ação dos diferentes dispositivos (ULTC e OXL,) após a saída de serviço da linha aérea de transmissão de 380 kV irá afetar a estabilidade de tensão da rede elétrica.

2.2 Estudo e análise do cenário I

Com a simulação do cenário I, pretende-se avaliar o efeito de dois modelos genéricos de cargas exponenciais, frequentemente utilizados em estudos deste tipo, e das ações dos diferentes dispositivos da rede elétrica, após a ocorrência da perturbação (saída de serviço da linha aérea de transmissão de 380 kV entre os barramentos N3 e N5, no instante de tempo igual a 50 s), na estabilidade de tensão da rede de teste. Neste cenário são analisados dois casos o caso A e o caso B.

Caso A

No caso A, a carga L1 do barramento N3 e a carga L2 do barramento N4 são modelizadas como 100 % impedância constante. Na figura 2, pode-se visualizar a evolução do comportamento dinâmico da tensão no barramento N3 e no barramento N4 após a ocorrência da contingência. Como consequência direta da saída de serviço da linha aérea de transmissão de 380 kV entre os barramentos N3 e N5, aos 50 s, assiste-se à diminuição da tensão nos barramentos N3 e N4. Face a esta situação, o transformador com tomadas de regulação da tensão em carga que liga o barramento N3 ao barramento N4 é chamado a atuar (30 s após a saída de serviço da linha como se pode ver na figura 3a) baixando a sua razão de transformação, alterando a posição das tomadas (o intervalo de tempo entre duas mudanças de tomadas é de 5 s) com o objetivo de repor a tensão no barramento N4 no seu valor pré contingência, o que acontece próximo dos 140 s.

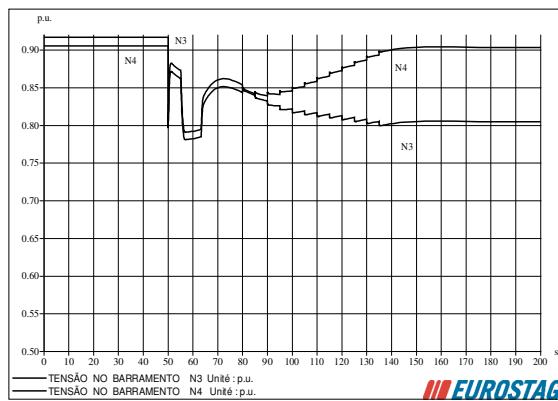


Figura 2 - Variação da tensão nos barramentos N3 e N4

Neste caso, como se pode ver na figura 2, a tensão no barramento N4 após a atuação do ULTC estabiliza num valor muito próximo do valor de tensão pré-contingência. Se se observar a curva da tensão do barramento N3, verifica-se que, ao contrário do que acontece no

barramento N4, a tensão nesse barramento desce com a atuação do ULTC. A carga L2 ligada ao barramento N4 é uma carga de impedância constante, isto é, o valor da potência consumida pela carga depende do valor da tensão aos seus terminais. Com a atuação do ULTC no intervalo de tempo 80 a 135 s a tensão no barramento da carga L2 sobe (figura 2), originando nesse mesmo intervalo de tempo um aumento do consumo de potência ativa e reativa por parte da carga L2 (figura 3b e 3c). Conforme é mostrado na figura 2, este aumento leva a maiores correntes e a maiores quedas de tensão, diminuído assim a tensão no barramento N3.

Perante esta situação, o gerador G1 é chamado a produzir mais energia reativa, aumentando a sua corrente de excitação como se pode ver na figura 3d, no entanto, a corrente de excitação do gerador G1 permanece próxima mas abaixo do seu valor limite (3.025 p.u.) garantindo que o valor da tensão aos terminais do gerador se mantenha no seu valor inicial através da atuação do AVR.

Neste caso, a carga L1 é modelizada como impedância constante, pelo que o consumo destas cargas varia com o quadrado da tensão aos seus terminais. Na figura 4, pode-se observar a variação do consumo de potência ativa e reativa da carga L1, variação esta que tem um perfil semelhante à variação da tensão no barramento N3. Após a saída de serviço da linha aérea o consumo de potência ativa e reativa da carga L1 diminui. Esta diminuição de consumo vai permitir que o sistema estabilize e não entre em colapso de tensão.

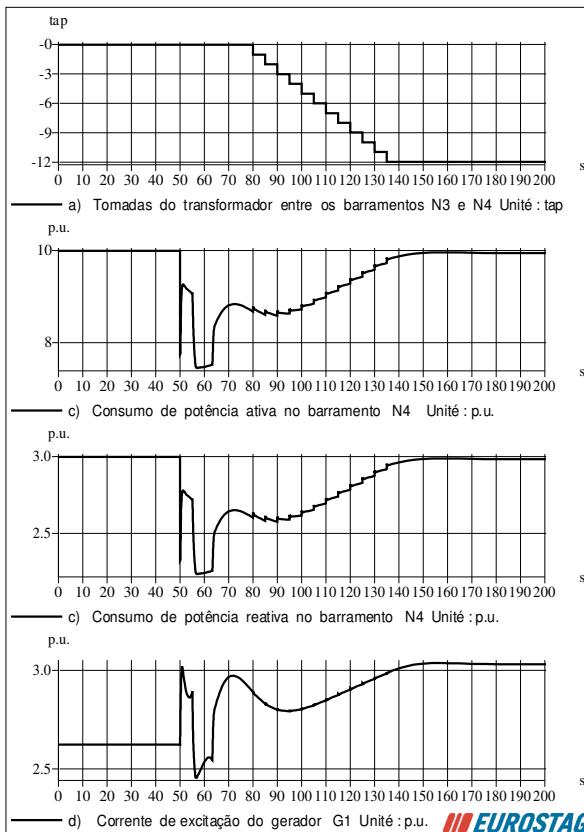


Figura 3 - a) Tomadas do ULTC entre os barramentos N3 e N4
 b) Variação do consumo de potência ativa no barramento N4
 c) Variação do consumo de potência reativa no barramento N4
 d) Variação da corrente de excitação do gerador G1

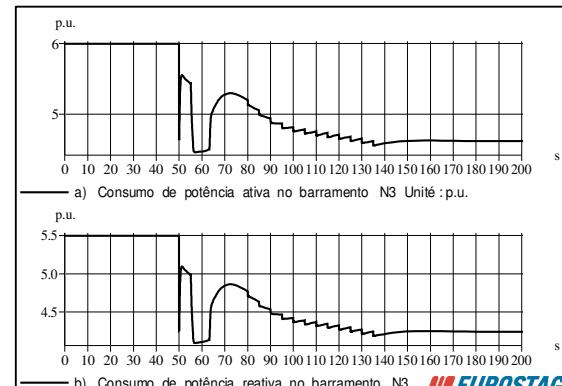


Figura 4- a) Variação do consumo de potência ativa no barramento N3
 b) Variação do consumo de potência reativa no barramento N3



Caso B

No caso B a carga L1 do barramento N3 é modelizada como 100 % de potência constante enquanto a carga L2 do barramento N4 é modelizada como 100 % impedância constante. Na figura 5, pode-se visualizar o comportamento da tensão nos barramentos N3 e N4.

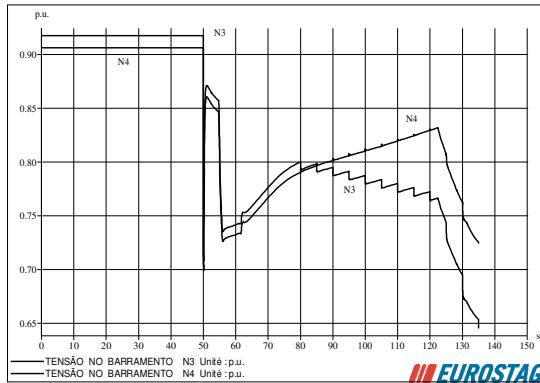


Figura 5 - Variação da tensão nos barramentos N3 e N4

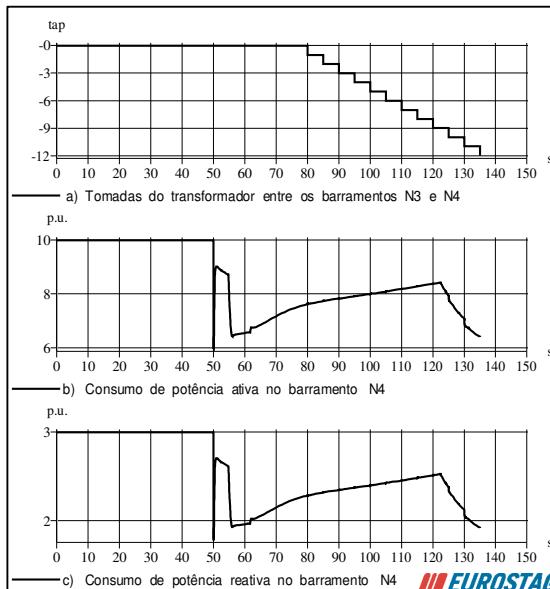


Figura 6 - a) Tomadas do ULTC entre os barramentos N3 e N4
 b) Variação do consumo de potência ativa no barramento N4
 c) Variação do consumo de potência reativa no barramento N4

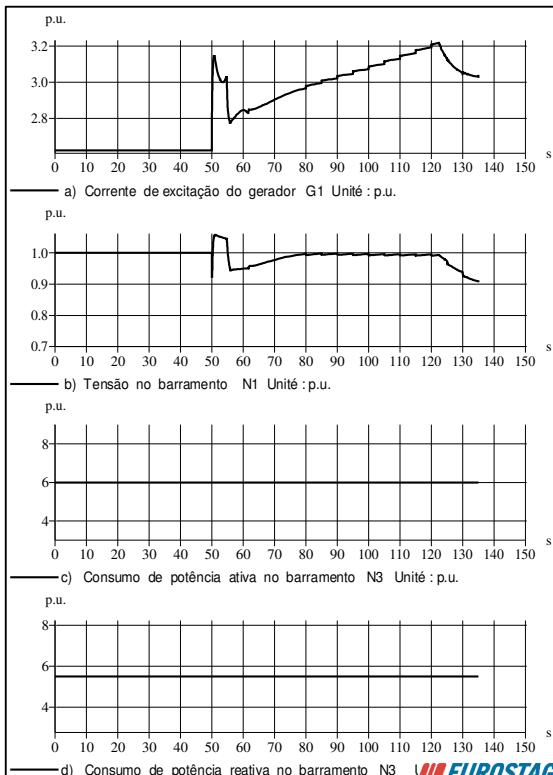


Figura 7 - a) Evolução da corrente de excitação do gerador G1
 b) Evolução da tensão no barramento N1
 c) Variação do consumo de potência ativa no barramento N3
 d) Variação do consumo de potência reativa no barramento N3

No caso B, como se pode analisar na figura 5, 30 s após a perturbação, o ULTC começa a atuar (figura 6a) para repor a tensão no barramento N4 no seu valor de referência. Pelos mesmos motivos até aos 124 s a tensão nos barramentos N3 e N4 tem um comportamento idêntico ao

caso A. Neste caso, porém, o pedido de energia reativa ao gerador G1 é superior, uma vez que a modelização da carga no barramento N3 é de potência constante (a carga não depende do valor da tensão aos seus terminais como se pode observar nas figuras 7c e 7d) fazendo com que a corrente de excitação do gerador G1 exceda o seu limite. O limitador de sobre excitação (OXL) do gerador G1 é chamado a atuar por volta dos 124 s (figura 7a), diminuindo a corrente de excitação para o seu valor limite (3.025 p.u.) e originando a seguinte cadeia de acontecimentos:

- a tensão aos terminais do gerador G1 deixa de ser controlada pelo AVR, deixando de ser constante e passando a diminuir como se pode observar na figura 7b; no instante em que o OXL atua, o barramento N1 deixa de ser um barramento PV (uma vez que a tensão deixa de ser constante e passa a ter valores desconhecidos) e passa a ser um barramento PQ (em que o valor da potência reativa produzida se torna constante e igual ao valor de potência reativa produzida máxima, valor limitado pelo OXL);
- a tensão nos barramentos N3 e N4 também diminui, como se pode ver através da figura 5 devido à perda do suporte reativo. O ULTC continua a tentar repor a tensão no barramento N4 mas, após a atuação do OXL, a tensão nesse barramento deixa de subir e passa a diminuir com a atuação do ULTC;
- o colapso de tensão do sistema acaba por se verificar aos 135 s como se pode observar na figura 5.

2.3 Estudo e análise do cenário II

Neste cenário foi simulada a mesma perturbação do cenário I, utilizando dois modelos diferentes de um agregado de cargas para modelizar a carga L1 do barramento N3, correspondentes ao caso C e ao caso D [5].

Caso C

No caso C a carga L1 do barramento N3 é caracterizada por um agregado de cargas que representa consumidores residenciais. Os parâmetros definidos para a aplicação deste modelo encontram-se na tabela 3. Na figura 8, pode visualizar-se o comportamento dinâmico da tensão nos barramentos N3 e N4 após a ocorrência da contingência.

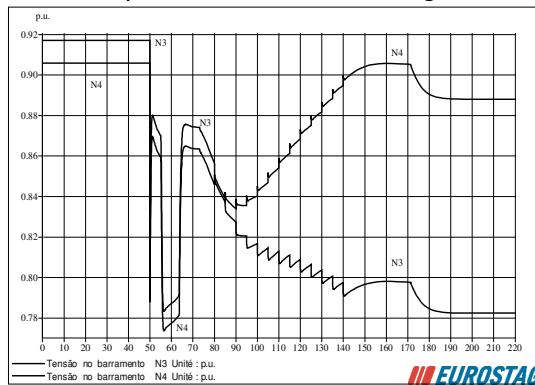


Figura 8 - Variação da tensão nos barramentos N3 e N4

No caso C, como se pode visualizar na figura 8, após a ocorrência da contingência aos 50 s as tensões nos barramentos N3 e N4 diminuem. O ULTC deteta a diminuição de tensão no barramento N4 e, 30 s depois começa a atuar (figura 10a) para repor a tensão no barramento N4 no seu valor de referência, o que acontece aproximadamente aos 150 s. Com o aumento da tensão no barramento N4, o consumo de potência ativa e reativa da carga L2 do barramento N4 também aumenta (figura 9a e figura 9b). Este aumento de consumo provoca uma diminuição da tensão nos outros barramentos PQ (N2 e N3). A diminuição da tensão no barramento N3 leva a uma diminuição do consumo de potência ativa e reativa da carga L1 (figuras 9c e 9d). Observando a figura 10b verifica-se que a partir dos 130 s a corrente de excitação do gerador G1 excede o seu valor limite, iniciando-se o mecanismo de tempo



inverso do OXL, que atua aproximadamente aos 170 s, reduzindo a corrente de excitação para o seu valor limite (3.025 p.u.). Após a atuação do OXL, verifica-se uma diminuição da tensão nos barramentos N1, N3 e N4 devido à diminuição de produção de energia reativa. No entanto, as tensões acabam por estabilizar, o que se deve sobretudo à diminuição do consumo da carga L1 e, também, após a atuação do OXL, à diminuição do consumo da carga L2 (figura 9).

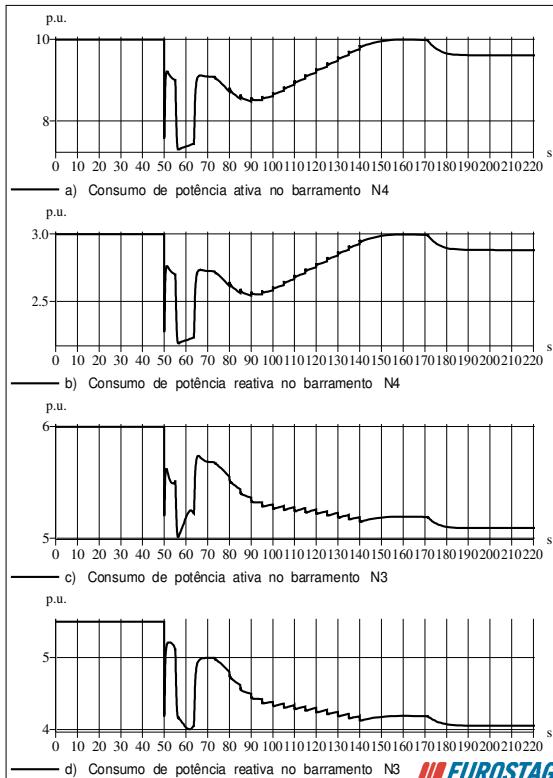


Figura 9 - a) Variação do consumo de potência ativa no barramento N4
 b) Variação do consumo de potência reativa no barramento N4
 c) Variação do consumo de potência ativa no barramento N3
 d) Variação do consumo de potência reativa no barramento N3

Caso D

No caso D a carga L1 do barramento N3 é modelizada como consumidores industriais em que o modelo utilizado representa as características estáticas (potência constante) e as características dinâmicas (motores de indução) de um agregado de carga (tabela 4). A carga L2 do barramento N4 é modelizada como 100 % impedância constante. Na figura 11, pode visualizar-se o comportamento dinâmico da tensão nos barramentos N3 e N4. Neste caso, como se pode ver na figura 11, a variação dinâmica da tensão nos barramentos N3 e N4 tem um comportamento muito semelhante com a variação dinâmica da tensão nos mesmos barramentos do caso B (figura 5). No entanto, neste caso, como a carga L1 é constituída por motores de indução as tensões da rede, acabam por entrar em colapso cerca de 10 segundos antes, quando comparado com o caso B. Os motores de indução têm um comportamento que não favorece a estabilidade de tensão. Perante uma acentuada diminuição da tensão aos seus terminais, os motores aumentam de forma considerável o consumo de energia reativa. Neste caso o OXL do gerador G1 atua aos 120 s (figura 13b) baixando o valor da corrente de excitação para o seu valor limite (3.025 p.u.). A partir deste instante a tensão

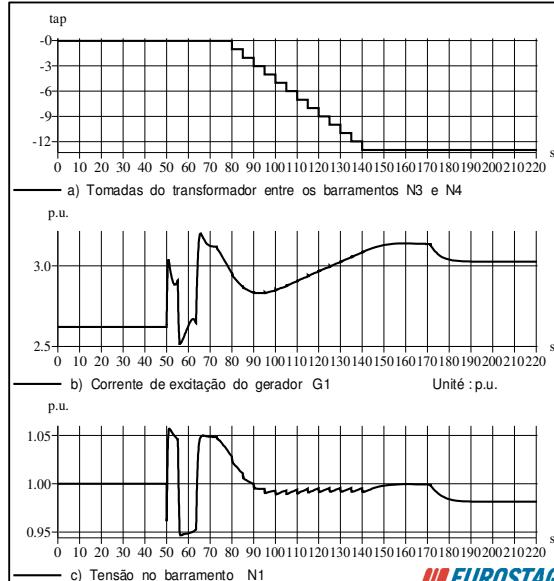


Figura 10 - a) Tomadas do ULTC entre os barramentos N3 e N4
 b) Evolução da corrente de excitação do gerador G1
 c) Evolução da tensão no barramento N1

aos terminais do gerador deixa de ser controlada pelo AVR e começa a diminuir (figura 13c). Na figura 12 estão representadas as variações do consumo de potência ativa e reativa das cargas L1 e L2.

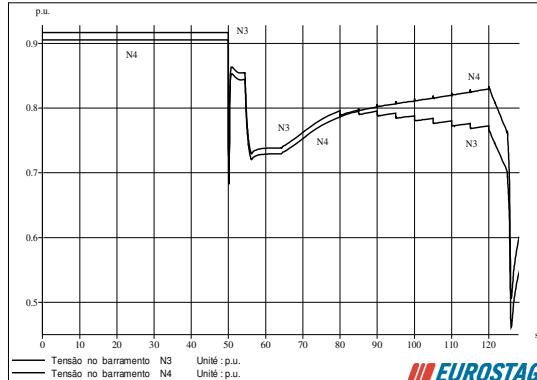


Figura 11 - Variação da tensão nos barramentos N3 e N4

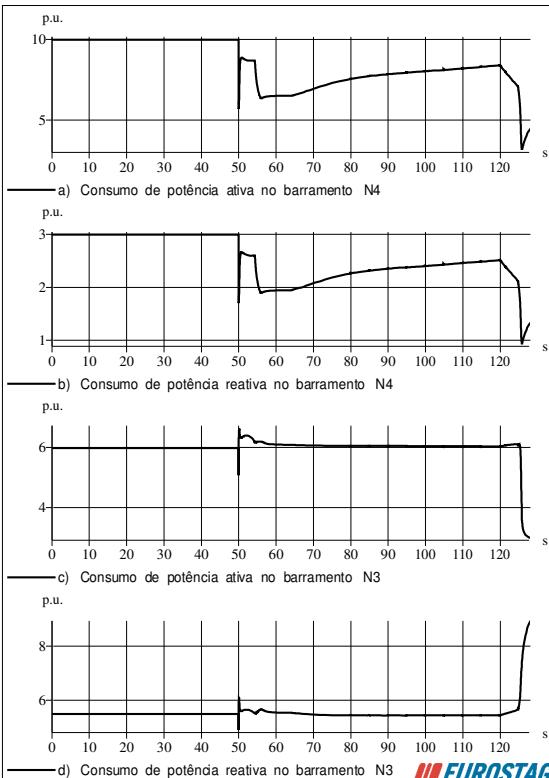


Figura 12 -
 a) Variação do consumo de potência ativa no barramento N4
 b) Variação do consumo de potência reativa no barramento N4
 c) Variação do consumo de potência ativa no barramento N3
 d) Variação do consumo de potência reativa no barramento N3

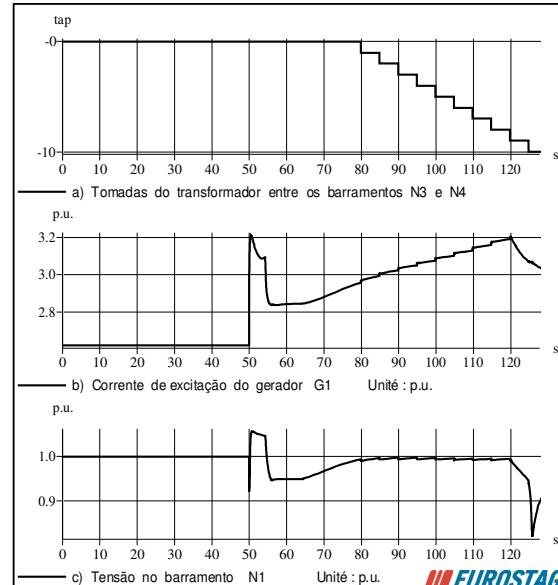


Figura 13 -
 a) Tomadas do ULTC entre os barramentos N3 e N4
 b) Evolução da corrente de excitação do gerador G1
 c) Evolução da tensão no barramento N1

Analizando agora o comportamento dinâmico do motor de indução através da figura 14, que mostra de forma ampliada a parte final (a partir dos 105 s) da tensão no barramento N3 e do consumo de potência ativa e reativa da carga L1, verifica-se que, devido à diminuição da tensão aos terminais da carga L1 (causada pela perturbação, pela atuação do OXL e do ULTC)

a potência ativa consumida pelo motor se mantém praticamente constante (figura 14b). O consumo da potência reativa sofre um aumento significativo (figura 14c). Este aumento acarreta uma maior degradação dos níveis de tensão, levando o sistema ao colapso de tensão.

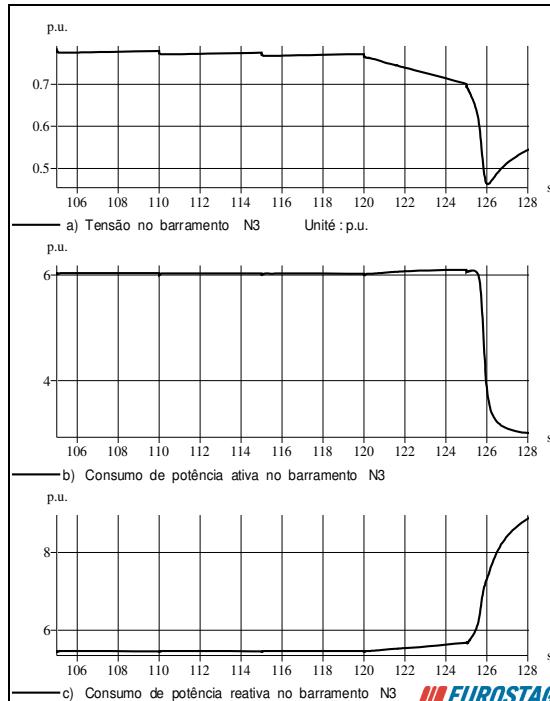


Figura 14- a) Evolução da tensão no barramento N3
 b) Variação do consumo de potência ativa no barramento N3
 c) Variação do consumo de potência reativa no barramento N3 

3. Conclusões

A análise do caso A mostra que a atuação do ULTC, após a ocorrência da contingência, a tensão no barramento N4 retoma o seu valor inicial. A tensão no barramento N3 acaba por estabilizar em valores abaixo dos valores registados antes da ocorrência da perturbação. O sistema mantém-se com tensões estáveis, atendendo a que as cargas do sistema são representadas como impedâncias constantes e, assim, o valor da potência baixa com a diminuição da tensão aos terminais da carga. Os geradores, normalmente, representam as fontes mais importantes da potência reativa e são o suporte de tensão de um sistema. A ação do AVR tem por objetivo manter a tensão aos terminais do gerador no seu valor de referência pré-ajustado através de um ajuste contínuo da tensão de excitação e, consequentemente, da corrente de excitação. O AVR porém, apenas pode regular a tensão aos terminais do gerador se a corrente de excitação se encontrar dentro do limite. Uma vez que a corrente de excitação excede o seu limite, inicia-se o mecanismo de tempo inverso do limitador de sobre excitação que ao atuar reduz a corrente de excitação para o seu valor limite. No caso B, após atuação do OXL o ULTC continua a operar só que desta vez a tensão no barramento N4 começa a baixar com a diminuição da razão transformação ao invés de aumentar, vários aspectos desta operação instável do ULTC foram descritos em [6], [7]. É importante observar que a instabilidade transitória é o resultado, e não a causa, da redução da tensão. A causa da instabilidade de tensão do sistema é a reposição da potência da carga pela operação do ULTC e a limitação da corrente de excitação do gerador G1.

Com o estudo do cenário II pretendeu-se analisar a estabilidade dinâmica de tensão da rede elétrica utilizando dois modelos diferentes de um agregado de cargas, residencial e industrial, para modelizar a carga L1 do barramento N3. Estes dois tipos de cargas foram escolhidos para

tornar o estudo mais real. A carga é um conjunto geralmente complexo constituído por um grande número de cargas de natureza diversas incluindo a própria rede de distribuição, o que torna difícil a modelização da mesma. As mesmas cargas também variam em função das horas, dos dias, das estações do ano, entre outros fatores relevantes. Por este motivo, optou-se por modelizar as cargas residenciais e industriais com os parâmetros definidos nas tabelas 3 e 4 por representarem uns parâmetros aceitáveis para modelizar estes dois tipos de cargas. Dos dois casos simulados, o modelo do agregado de cargas do caso C é o que menos penaliza a estabilidade de tensão, apesar de após a ocorrência da perturbação os valores das tensões estabilizarem em valores inferiores aos valores das tensões de pré-contingência. No caso D, a carga L1 é modelizada como consumidores industriais em que o modelo utilizado é representado por características estáticas (potência constante) e por características dinâmicas (motores de indução) de um agregado de carga, mostrou-se que o consumo da potência reativa sofre um aumento significativo quando o valor da tensão aos terminais do motor de indução diminui significativamente. Neste caso está-se perante uma situação de instabilidade de tensão.

Verificou-se que a modelização adotada para as cargas apresenta uma grande influência no comportamento dinâmico da tensão. Não sendo possível representar de forma exata e para cada momento a composição das cargas, optou-se por considerar diferentes cenários para a modelização das mesmas, procurando desta forma identificar quais as piores situações do ponto de vista da estabilidade de tensão.

Bibliography

- [1] A. Keyhani, W. Lu, G.T. Heydt, “Composite neural network load models for power system stability analysis”, IEEE Power Systems Conference and Exposition, Vol. 2, pp. 1159-1163, October 2004.
- [2] Konar, S., Chatterjee, D., “Impacts of wind power on large signal voltage stability of power systems with different types of loads”, Power Engineering Conference (AUPEC), 2014 Australasian Universities, Sept. 28 2014-Oct. 1 2014.
- [3] Tractebel Energy Engineering and Réseau de Transport d’Electricité (RTE), “Eurostag Software user’s Manual and Release Notes”, Eurostag Package Release 4.5, June 2010.
- [4] R. M. Monteiro Pereira, “Estudo da Estabilidade Dinâmica de Tensão em Redes com levada Penetração de Energia Eólica” Universidade do Porto Faculdade de Engenharia, Dissertação de Doutoramento, 2013.
- [5] R. M. M. Pereira, A. J. C. Pereira, C. M. M. Ferreira e F. P. M. Barbosa, “Dynamic Voltage Stability Assessment of an Electric Power System Using composite load models”, 43th International Universities Power Engineering Conference, UPEC’08, Faculty of Science and Engineering, University of Brighton, Padova, Italy, September 1-4, 2008.
- [6] H. Ohtsuki, A. Yokoyama and Y. Sekine: “Reverse Action of On-load Tap Changer in Association with Voltage Collapse” IEEE Transaction on Power Systems, No.6, pp. 300-306, 1991.
- [7] T. K. Vu and C. C. Liu: “Shrinking Stability Regions and Voltage Collapse in Power Systems” IEEE Transaction on Circuits and Systems-I, No.39, pp. 271-289, 1992.