

# DETECÇÃO DO PONTO DE COLAPSO USANDO O NOVO MÉTODO FSQV

António C. Andrade *Membro Estudante, IEEE*<sup>(\*)</sup>, F. P. Maciel Barbosa *Membro Sénior, IEEE*<sup>(\*\*)</sup>

<sup>\*</sup>Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto /Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida 4200-072 Porto, Portugal, ata@isep.ipp.pt

<sup>\*\*</sup> Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/Departamento de Engenharia Electrotécnica  
Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto, Portugal, fmb@fe.up.pt

**Resumo.** Este artigo apresenta um novo método de detecção do ponto de colapso e um novo índice para a definição da distância ao ponto de colapso. A detecção do ponto de colapso é imprescindível para o cálculo da distância, em termos de capacidade de carregamento de carga da rede, do ponto de funcionamento actual ao ponto extremo e que se considera limite para o funcionamento de uma rede. Neste artigo demonstra-se que no ponto onde o fluxo de cargas, pelo método Newton-Raphson, se torna singular, a soma total das derivadas parciais das equações da energia reactiva em relação ao nível de tensão é aproximadamente constante. Diversas simulações usando as redes *standard* de 14 e 57 barramentos do IEEE, provam que o método proposto, pode calcular o ponto de colapso, mesmo usando diferentes cenários de crescimento de cargas, contingências de linhas ou geradores. A metodologia proposta poderá ser com facilidade implementada nos programas de fluxos de carga.

**Palavras chave:** Método FSQV, estabilidade de tensão, colapso de tensão, singularidade do jacobiano, fluxo de cargas contínuo.

## 1. Introdução

As sociedades modernas têm uma dependência crescente de energia e em particular da energia eléctrica devido às suas especiais particularidades. Praticamente todos os sectores económicos centram as suas necessidades energéticas no consumo da energia eléctrica. Por essa razão, a avaria parcial ou total dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) paralisam a economia das zonas afectadas com custos económicos e sociais muito altos.

No ano de 2003 dois grandes *blackouts* (USA/Canada e Itália) levantaram novamente a questão da segurança dos SEE. O primeiro blackout afectou uma área estimada de cerca de 50 milhões de pessoas e uma carga de 61,8 GW. As estimativas do custo do blackout nos USA estão no intervalo de 4 a 10 biliões de dolares americanos. No Canada foram perdidas 18,9 milhões

de horas de trabalho com um custo, só em Ontário, de 2,3 biliões de dolares canadianos [1].

A liberalização do sector eléctrico possibilitou o aparecimento de produtores independentes e outras empresas distribuidoras de energia eléctrica. Se por um lado, o mercado se tornou mais competitivo, por outro lado os sistemas tendem a ser explorados muito perto dos seus limites técnicos, com uma redução de segurança do SEE e um aumento de instabilidade de tensão.

A estabilidade de tensão é uma propriedade dos SEE que os habilita a manter tensões aceitáveis em todos os barramentos, dentro das normais condições de operação, após estar sujeito a uma contingência [2].

A instabilidade de tensão pode-se iniciar com uma situação de perturbação que provoca a descida da tensão de uma forma incontrolável, como por exemplo nas situações de contingência que provocam a perda de um gerador, que estava a produzir um valor muito alto de energia reactiva, ou um aumento de cargas acentuado que ultrapasse os limites técnicos.

A estabilidade de tensão é um fenómeno dinâmico e um problema crítico para a condução dos SEE. É contudo possível medir a distância do ponto de funcionamento actual ao ponto de colapso através das equações estáticas de fluxo de cargas. A distância é calculada utilizando um fluxo de cargas contínuo, onde as cargas dos barramentos são incrementadas com um factor de carga ( $\lambda$ ) constante. Desta maneira é possível atingir o ponto onde a matriz jacobiana se torna singular e que corresponde ao ponto de colapso de tensão, também chamado de ponto limite de estabilidade de tensão [2].

Uma particular dificuldade é quando a matriz jacobiana, do fluxo de cargas pelo método Newton-Raphson, se torna singular. Esse ponto é o limite de estabilidade de tensão em estado estacionário, e também chamado de ponto crítico [3].

Para sistemas com relação constante entre as cargas P/Q, o gradual incremento das cargas conduz ao ponto

de cela que corresponde ao Ponto Máximo de Carga (PMC). Com as mesmas condições a matriz jacobiana do fluxo de cargas, pelo método Newton-Raphson, torna-se singular, mostrando dificuldades numéricas. Este ponto está muito próximo do PMC [4].

## 2. Modelo do Sistema

O modelo utilizado para o fluxo de cargas (FC) é representado pela equação [5]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde  $J$  é a matriz jacobiana.

O FC pelo método Newton-Raphson permite calcular os coeficientes de sensibilidade, como por exemplo o coeficiente de sensibilidade  $\delta Q/\delta V$ , muito importante para a identificação dos barramentos críticos, assim como o cálculo do PMC que corresponde ao ponto de colapso de tensão.

## 3. O Ponto de Colapso de tensão

Com um FC contínuo baseado no método Newton-Raphson foi possível atingir o ponto de colapso de tensão das redes de 14 e 57 barramentos do IEEE. Os pontos de colapso da rede foram obtidos quando a matriz jacobiana se tornou singular e por essa razão não foi possível obter a sua inversa.

Na figura 1 apresentam-se as curvas do número de iterações para a convergência da rede de 57 barramentos do IEEE para os critérios de convergência de  $10^{-3}$  a  $10^{-6}$ .

Como se pode ver na figura 1, depois de um reajustamento inicial devido aos valores iniciais das tensões serem 1 e os ângulos zero, o número de iterações para a convergência mantiveram-se constantes durante um largo período da curva. A simulação com o menor valor do critério de convergência ( $10^{-6}$ ), foi a que sofreu a primeira alteração do número de iterações. Esta situação está correcta dado que tem a menor tolerância para a aceitação dos valores para a convergência. A simulação com o maior valor do critério de convergência ( $10^{-4}$ ), foi a última a sofrer a primeira alteração dado que tem a maior tolerância para a aceitação dos valores para a convergência. Com o aproximar do ponto de colapso de tensão as dificuldades de convergência aumentaram, na razão inversa do valor do critério de convergência, ou seja, quanto menor era o valor do critério de convergência mais cedo apareceram as dificuldades de convergência. Estas dificuldades de convergência provocaram o aumento do número de iterações necessárias para a convergência. No ponto de colapso a convergência não foi possível, devido à matriz jacobiana não ter inversa. Nesse ponto, o número de iterações cresce infinitamente, não se podendo por isso confundir esta situação com as dificuldades de convergência sentidas até aqui. Dando uma tolerância no número de iterações, para que não se possa confundir com as dificuldades de convergência, o programa pode parar. Nestas quatro simulações definiu-se como critério de paragem as 100 iterações.

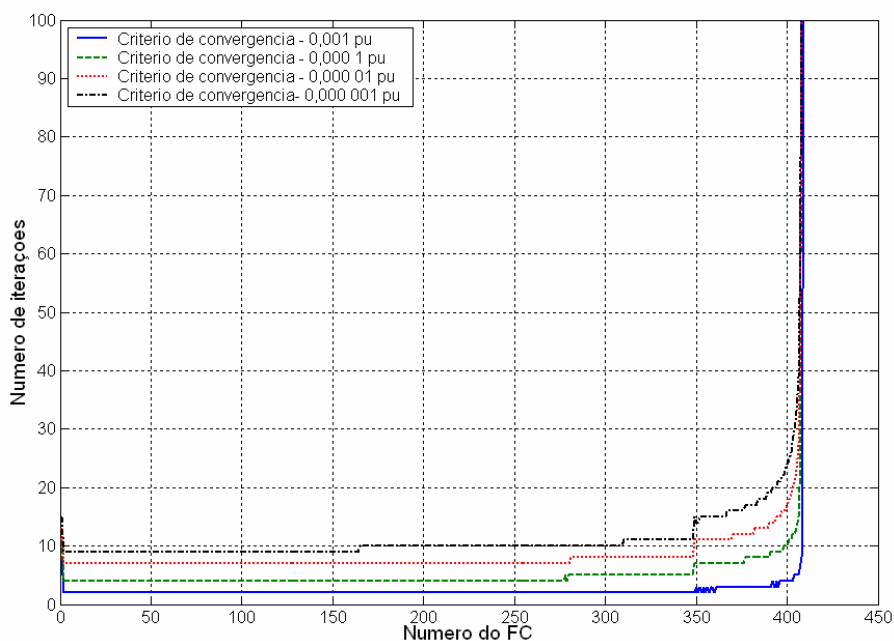


Figura 1 – Número de iterações necessárias para a convergência da rede de testes de 57 barramentos do IEEE

#### 4. Um novo Método de Detecção do Ponto de Colapso

A matriz jacobiana  $J$  (1) é constituída por quatro submatrizes:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Os elementos da diagonal da submatriz ( $J_{22}$ ) [5] são os elementos  $V_i(\partial Q_i/\partial V_i)$ . Em cada FC, é calculada a soma total dos elementos da diagonal  $\partial Q_i/\partial V_i$  (FSQV) – *Full Sum*  $\partial Q_i/\partial V_i$ :

$$FSQV = \sum_{i=1}^n \partial Q_i/\partial V_i \quad (3)$$

onde  $n=14$  ou  $57$ , dependendo do sistema de testes do IEEE utilizado.

Na tabela I são apresentados os valores característicos, iniciais e finais, das redes de teste de 14 e 57 barramentos do IEEE.

Tabela I – Valores característicos FSQV das redes de teste de 14 e 57 barramentos do IEEE

Rede de testes do IEEE	FSQV	
	Valor inicial	Valor final
14 barramentos	255,7	193,4
57 barramentos	1.467,1	1.213,8

Para a realização destas duas simulações foi utilizado um fluxo de cargas contínuo com um factor de carga ( $\lambda$ ) constante de  $10^{-3}$ , que corresponde a um incremento da carga dos barramentos de 0,1 % entre FC.

Os colapsos de tensão das redes foram atingidos após 760 FC, na rede de 14 barramentos, e 407 FC para a rede de 57 barramentos.

Como podemos ver na tabela I, cada rede de testes tem valores característicos FSQV, iniciais e finais. O valor FSQV depende do número de barramentos, quanto maior a rede, mais altos são os valores FSQV.

Nas figuras 2 e 3 apresentam-se as curvas FSQV das redes de testes do IEEE de 14 e 57 barramentos.

O ponto A, da figura 2, corresponde ao ponto de colapso de tensão da rede de 14 barramentos do IEEE, ou seja, é o ponto onde a matriz jacobiana se torna singular. As cargas da rede de testes da figura 2, no primeiro FC, são referidas às cargas base do sistema (259 MW e

73,5 MVar). O PMC corresponde a um aumento de cargas de 76 % em relação às cargas base do sistema.

O ponto C, da figura 3, corresponde ao ponto de colapso de tensão da rede de 57 barramentos do IEEE. As cargas, no primeiro FC, são referidas às cargas base do sistema (1.251 MW e 336 MVar). O PMC corresponde a um aumento de cargas de 40,7 % em relação às cargas base do sistema.

As duas curvas FSQV das figuras 2 e 3, têm pontos de quebra que as caracterizam. O ponto B para a curva referente à rede de testes de 14 barramentos, figura 2, e pontos D, E e F para a rede de testes de 57 barramentos, figura 3. Estes pontos característicos coincidem com os pontos de funcionamento onde os limites de produção de energia reactiva dos geradores são atingidos.

Como podemos ver na tabela II, todos os geradores, com excepção do gerador do barramento 8, atingem o seu limite antes do ponto de funcionamento que corresponde ao ponto característico B (1.2). A partir deste ponto característico o andamento da curva altera-se ficando a sua inclinação cada vez mais acentuada, até que é atingido o ponto de colapso.

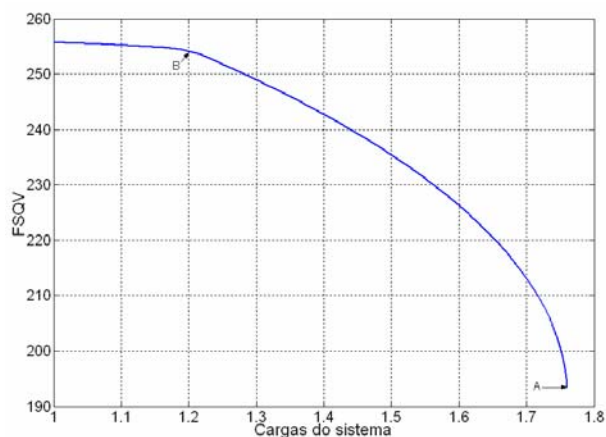


Figura 2 – Curva FSQV para a rede de testes de 14 barramentos do IEEE

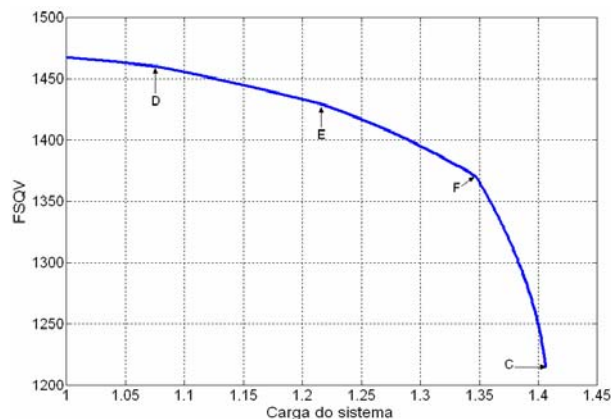


Figura 3 – Curva FSQV para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE

Tabela II – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de testes de 14 barramentos do IEEE

Barramento		Limite de Produção de energia reactiva	
Número	Tipo	Limite (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre
2	PV	0,5	1,066
3	PV	0,4	1,164
6	PV	0,24	1,190
8	PV	0,24	1,219

Nota: (1) - Potência de base de 100 MVA

A curva FSQV obtida com a rede de simulação de 14 barramentos é muito parecida com as curvas de tensão dos barramentos PQ apresentadas na figura 4 e 5. Na figura 4, também é possível analisar os pontos de funcionamento onde os geradores atingem os seus limites de produção de energia reactiva. A partir destes pontos, e unicamente produzindo o seu valor limite de energia reactiva, os barramentos PV, que até aqui conseguiam manter as tensões com um valor constante, passam a ter um comportamento de barramentos PQ, ou seja, não podendo aumentar a produção de energia reactiva, a tensão nos barramentos PV irá diminuir.

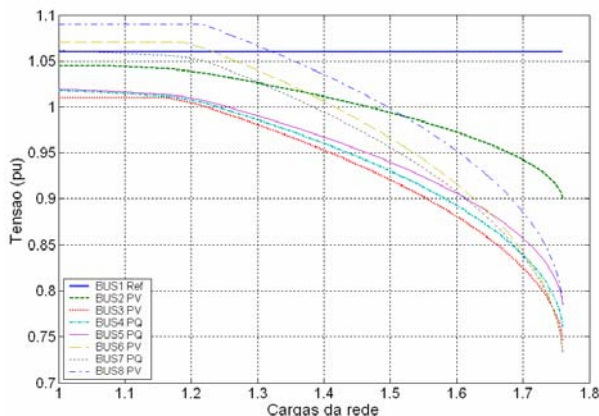


Figura 4 – Curvas de tensão referentes aos barramentos 1 a 8 da rede de testes de 14 barramentos do IEEE

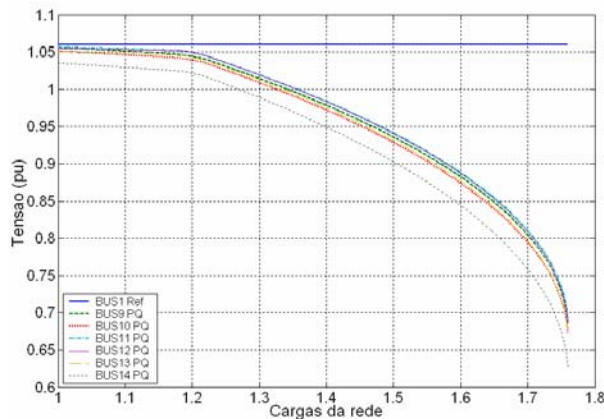


Figura 5 – Curvas de tensão referentes aos barramentos 9 a 14 da rede de testes de 14 barramentos do IEEE

Os pontos característicos da curva FSQV da rede de 57 barramentos, figura 3, coincidem com os pontos de funcionamento de limite de produção de energia reactiva (ver tabela III). O ponto D coincide com o limite de produção do gerador do barramento 12, o ponto E com o limite de produção do gerador do barramento 3 e o ponto F com o limite de produção do gerador do barramento 8. O gerador do barramento 8 é o que tem maior capacidade de produção de energia reactiva e é o último a atingir o seu limite de produção.

Tabela III – Limites de produção de energia reactiva dos geradores da rede de testes de 57 barramentos do IEEE

Barramento		Limite de Produção de energia reactiva	
Número	Tipo	Limite (pu) (1)	Ponto de carga onde ocorre
2	PV	0,5	1.280
3	PV	0,6	1.218
6	PV	0,25	1.228
8	PV	2	1.348
9	PV	0,09	1.046
12	PV	1,55	1.082

Nota: (1) - Potência de base de 100 MVA

A curva FSQV obtida com a rede de simulação de 57 barramentos é muito parecida com as curvas de tensão dos barramentos críticos apresentadas na figura 5.

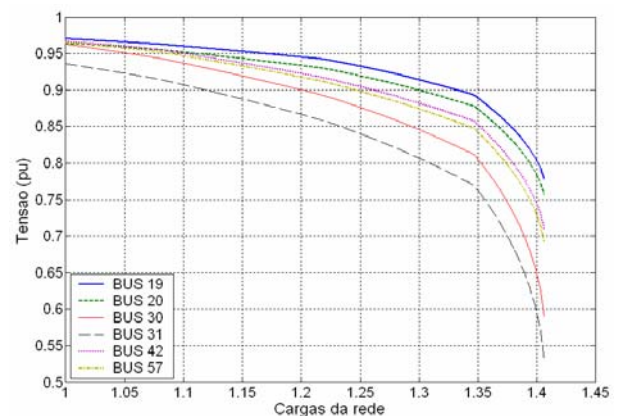


Figura 5 – Curvas de tensão referentes aos barramentos críticos da rede de testes de 57 barramentos do IEEE

## 5. Resultados numéricos

O programa para a realização do FC pelo método Newton-Raphson foi desenvolvido em MATLAB, assim como todas as rotinas para implementação de algorit-

mos desenvolvidos. Todas as simulações utilizaram um critério de convergência de  $10^{-4}$ .

### A. Cenários de crescimento de cargas

Para analisar o comportamento das curvas FSQV, perante vários cenários de cargas, foram criados onze cenários, A1 a A11, para a rede de testes de 57 barramentos e que são apresentados na tabela IV.

Tabela IV – Cenários de cargas A1 a A11 para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE

Cenário de cargas	$\lambda$ Geral	Exceções		
		Barram.	$\lambda$	Obs.
A1	$10^{-3}$	-	-	Base
A2	$10^{-3}$	2 e 3 (a)	0	Carga const.
A3	$0,667 \times 10^{-3}$	2 e 3 (a)	$10^{-3}$	Mais 50%
A4	$0,5 \times 10^{-3}$	2 e 3 (a)	$10^{-3}$	Mais 100%
A5	$0,4 \times 10^{-3}$	2 e 3 (a)	$10^{-3}$	Mais 150%
A6	$0,333 \times 10^{-3}$	2 e 3 (a)	$10^{-3}$	Mais 200%
A7	$10^{-3}$	(b)	0	Carga const.
A8	$0,667 \times 10^{-3}$	(b)	$10^{-3}$	Mais 50%
A9	$0,5 \times 10^{-3}$	(b)	$10^{-3}$	Mais 100%
A10	$0,5 \times 10^{-3}$	(b)	$10^{-3}$	Mais 150%
A11	$0,5 \times 10^{-3}$	(b)	$10^{-3}$	Mais 200%

Notas: (a) – Cargas mais altas; (b) – barramentos críticos (19, 20, 30, 31, 42 e 57)

Ao escolher os barramentos com cargas mais altas, cenários A2 a A6, e barramentos críticos, cenários A7 a A11, com os aumentos de cargas a atingirem os 200 %, pretendeu-se simular as situações que se consideram mais complicadas e extremas.

Na tabela V apresentam-se os resultados das onze simulações com os cenários de carga A1 a A11.

Como podemos ver na tabela V, os valores de FSQV para o último FC, antes do colapso, são todos iguais o que permite, desde já, avançar com a possibilidade de se usar o método FSQV para detectar o ponto de colapso, com estes cenários de carga da rede de 57 barramentos. Supõe-se que os restantes cenários são menos penalizadores, em termos de cargas. Então, poder-se-á avançar com a tese de este método ser geral para esta rede de testes. Uma confirmação total dependerá da realização de mais testes com diferentes cenários que se poderão encontrar, entre as duas situações simuladas.

Na figura 6 apresentam-se os erros de comparação das curvas FSQV referentes aos cenários A2 a A11 com o cenário A1 para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE. O erro máximo é de 0,41 % da curva correspondente ao cenário A11, ver figura 6. Os erros máximos são obtidos no ponto de funcionamento que correspon-

de ao ponto característico F. Como já visto anteriormente este ponto característico coincide com o limite de produção do gerador do barramento 8.

Tabela V – Resultados das simulações com os cenários de cargas A1 a A11 para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE

Cenário	Último FC-3	Último FC-2	Último FC-2	Último FC	PMC
A1	1234,5	1228,9	1222,3	1213,8	40,6
A2	1234,5	1228,8	1222,2	1213,8	40,6
A3	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A4	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A5	1234,5	1228,8	1222,2	1213,8	40,6
A6	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A7	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A8	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A9	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A10	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6
A11	1234,5	1228,8	1222,3	1213,8	40,6

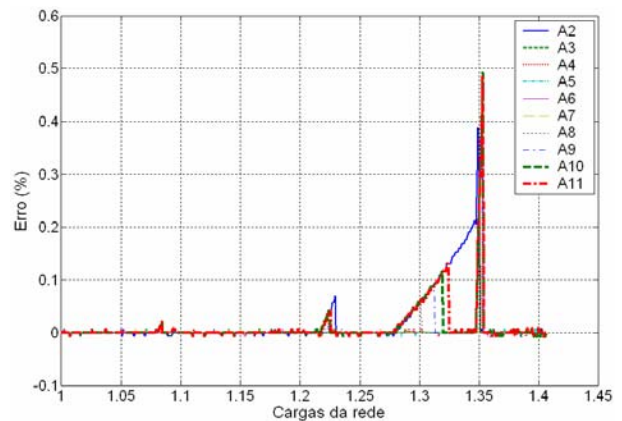


Figura 6 – Erros de comparação das curvas FSQV referentes aos cenários A2 a A11 com o cenário A1 para a rede de testes de 57 barramentos do IEEE

### B. Variação máxima do valor base de carga para um erro máximo do valor final FSQV de 1%

As simulações realizadas anteriormente partiam sempre da mesma carga base. Agora simulou-se a possibilidade de a carga base de um barramento variar. Com sucessivos FC contínuos pretende-se encontrar a variação máxima para a carga de um barramento para que o valor FSQV final varie no máximo 1%.

Na tabela VI apresentam-se os resultados mais relevantes das simulações dos aumentos máximos da carga base dos barramentos da rede de testes de 57 barramentos para o erro máximo de 1% do valor FSQV final.



Na figura 7 apresenta-se a globalidade dos aumentos de carga máximos da carga base dos barramentos da rede de testes de 57 barramentos para o erro máximo de 1%

do valor FSQV final. Todas estas simulações usaram o aumento da carga de 1 %, do barramento referido, entre sucessivos PF contínuos.

Tabela VI – Resultados mais relevantes dos aumentos máximos da carga base dos barramentos da rede de testes de 57 barramentos para o erro máximo de 1% do valor FSQV final

Número Barram.	PMC (%) (1)	Tempo (min) (2)	FSQV			Cargas				
			Inicial Valor	Final		Inicial (base)		Final		
				Valor	Erro (3)	Pot. Act. (pu) (4)	Pot. React. (pu) (4)	Pot.Act. (pu) (4)	Pot.React. (pu) (4)	Aumento (%)
2	40,6	6,01	1467,1	1203,8	-0,83	0,030	0,880	0,032	0,924	5
9	39,5	8,49	1467,0	1206,4	-0,61	1,210	0,260	1,307	0,281	8
12	39,1	6,70	1467,0	1202,2	-0,97	3,770	0,240	3,959	0,252	5
27	40,3	23,83	1466,7	1205,4	-0,70	0,093	0,005	0,116	0,006	25
30	40,6	3,42	1467,0	1207,9	-0,49	0,036	0,018	0,037	0,018	2
33	39,9	22,81	1466,0	1218,1	0,35	0,038	0,019	0,048	0,024	25
35	37,8	116,47	1460,3	1217,1	0,27	0,060	0,030	0,143	0,071	138
38	40,6	5,13	1466,9	1206,8	-0,58	0,140	0,070	0,143	0,071	2
57	40,2	21,30	1466,3	1206,8	-0,58	0,067	0,020	0,082	0,025	23

Notas: (1) – Em relação às cargas base da rede de simulação de 57 barramentos;  
 (2) – Tempo gasto nas simulações do barramento utilizando um PC Pentium IV a 2,4 GHz;  
 (3) – Erro de comparação com o valor FSQV final (1213,8) calculado com as cargas base;  
 (4) - Potência de base de 100 MVA

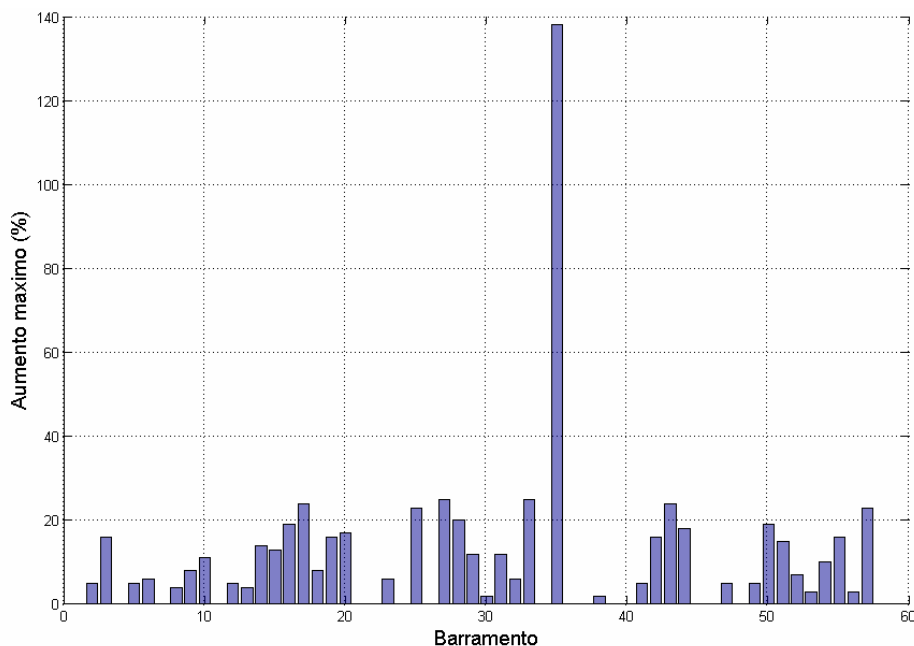


Figura 7 – Aumentos máximos da carga base dos barramentos da rede de testes de 57 barramentos para o erro máximo de 1% do valor FSQV final

Analisando os resultados apresentados na tabela VI pode-se constatar que: os barramentos 30 e 38 têm o menor crescimento, 2 %, mas não têm as menores cargas reactivas base que são respectivamente 0,018 e 0,070 pu; o barramento 35 tem o maior crescimento, 138 %, com uma carga reactiva base de 0,030 pu, que é superior à carga do barramento 30, mas inferior à carga do barra-

mento 38; o barramento 2 mesmo tendo a carga reactiva mais alta, 0,88 pu, o seu aumento é de 5%, mais do dobro do aumento mínimo verificado nos barramentos 30 e 38; o barramento 35, que tem o maior crescimento, tem o menor PMC cujo valor é 37,8. Concluiu-se, por isso, não existir uma relação directa e linear entre a carga do barramento base e o crescimento máximo possível.

A evolução dos erros do valor FSQV final também não tem um carácter não linear, mas sim oscilam entre um valor mínimo e máximo. Como exemplo, na figura 8, apresentam-se os erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base do barramento 2 e 3 da rede de simulação de 57 barramentos com incrementos de 1% entre FC contínuos.

Como se pode ver na figura 8 os valores mínimo e máximo dos erros, variam lentamente, deslocando-se ambos para valores cada vez mais negativos.

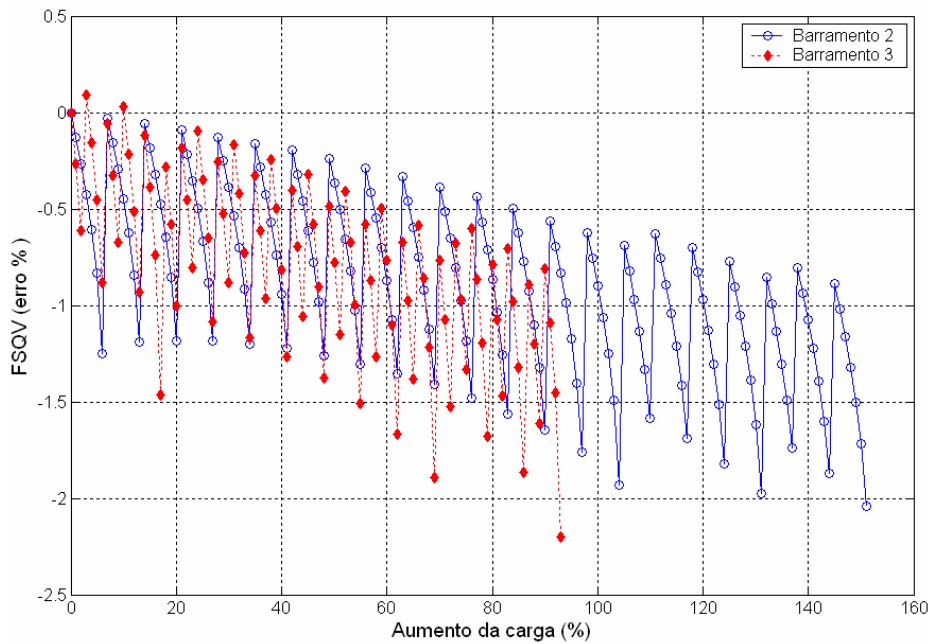


Figura 8 – Erros dos valores FSQV finais para aumentos da carga base dos barramentos 2 e 3 da rede de simulação de 57 barramentos com incrementos de 1% entre FC contínuos

### C. Simulação de contingências com o novo método FSQV

Nos estudos de estabilidade de tensão de um SEE, é importante simular a perda de uma linha, gerador ou *shunt* capacitivo, para análise do seu impacto na estabilidade de tensão da rede. O novo método FSQV permite simular uma contingência ou múltiplas contingências, e analisar o seu impacto no PMC.

O aparecimento de uma contingência de linha, gerador ou *shunt* capacitivo origina uma nova curva FSQV. Como exemplo, na figura 9, são apresentadas duas curvas FSQV referidas a simulações efectuadas com a rede de testes do IEEE de 57 barramentos. A curva 1 corresponde à curva sem qualquer contingência e é igual à curva da figura 3, e a curva 2 corresponde à perda do gerador 3. O PMC da curva 2 é menor do que o da curva 1, ou seja, o aumento de carga possível sem contingências é de 41 %, e corresponde à curva 1, com a contingência do gerador 3 o aumento de carga possível, até ao colapso, é só de 37 %.

Na figura 10 apresentam-se os resultados da simulação das contingências das 20 linhas, uma a uma, da rede de teste de 14 barramentos.

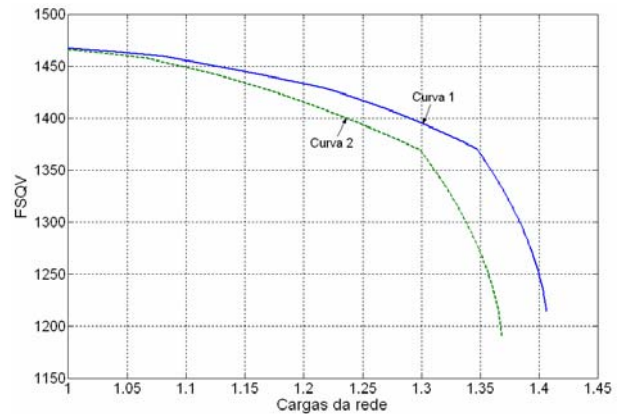


Figura 9 – Curvas FSQV sem contingência (curva 1) e com a perda do gerador 3 (curva 2) para a rede de testes do IEEE de 57 barramentos

Nas referências 8 e 9 são estudadas as aplicações do novo método FSQV respectivamente às contingências de linhas e geradores.

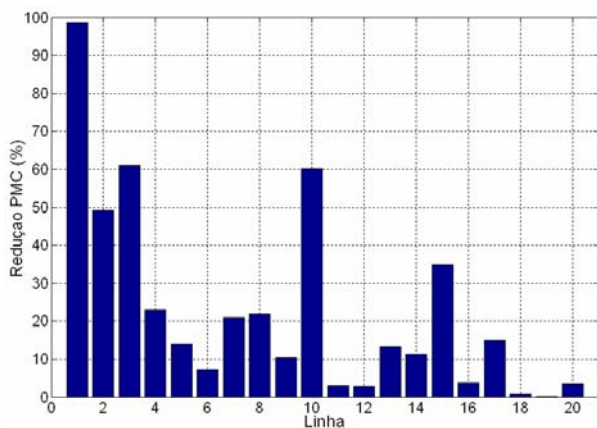


Figura 10 – Reduções dos PMC provocadas por contingências de linha de 1ª ordem na rede de testes de 14 barramentos

## 6. Um novo índice de distância ao ponto de colapso de tensão (NIVCP)

Índices de distância ao ponto de colapso de tensão são uma importante ferramenta de análise na condução e planeamento de SEE. Com estes índices é possível analisar a distância ao colapso, detectando eventuais problemas de estabilidade de tensão.

Com base nas curvas FSQV foi definido um novo índice de distância ao ponto de colapso de tensão NIVCP, apresentado na figura 11.

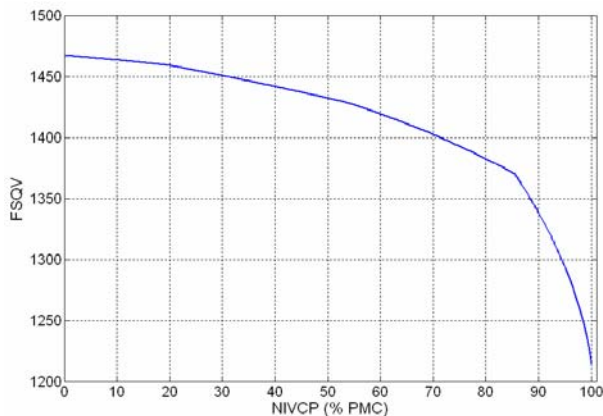


Figura 11 – Curva do novo índice NIVCP para a rede de 57 barramentos

## 7. Conclusões

Neste artigo foi apresentado um novo método de detecção de colapso de tensão FSQV, e um novo índice de distância ao colapso NIVCP.

A partir dos resultados dos testes pode-se concluir que cada sistema tem valores FSQV característicos e que aumentam com o número de barramentos da rede. O valor inicial e final é 255,72 e 193,36 para a rede de testes de 14 barramentos do IEEE. Para a rede de 57 barramentos os mesmos valores são respectivamente 1467,1 e 1213,8.

Para o estudo do comportamento do novo método FSQV na detecção do ponto de colapso de tensão foram definidos os cenários A1 a A11. Estes cenários correspondem aos barramentos com as maiores cargas reactivas ou aos barramentos críticos. Os aumentos de carga foram até aos 200 %. Pretendeu-se assim encontrar as situações que se consideraram mais penalizadoras e extremas. Os valores FSQV do último FC, antes do colapso da rede, das simulações com onze cenários são iguais o que significa que é possível detectar o ponto de colapso com esta rede e nas condições referidas.

O novo método FSQV também tolera variações de carga de barramentos. Para um erro máximo de 1 % do valor FSQV final é possível aumentar a carga de barramentos de 2 a 138 %.

Com o novo método FSQV foi possível estudar os impactos no PMC das contingências de linhas e geradores.

A partir da curva FSQV foi definido um novo índice de distância ao colapso de tensão NIVCP.

## Agradecimentos

Este artigo está inserido nos trabalhos de Doutoramento de António Andrade financiado por uma bolsa atribuída pelo programa Prodep III e pelo FSE da União Europeia.

## REFERÊNCIAS

- [1] "Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations," <https://reports.energy.gov/BlackoutFinal-Web.pdf>
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [3] V. Ajjarapu and C. Cristie, "The Continuation Power Flow: A tool for steady state voltage stability analysis," IEEE transactions on Power Systems, vol.7, pp. 416-423, February 1992.
- [4] IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools," Final document, August 2002
- [5] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, "Power System Analysis," New York, McGraw-Hill, 1994
- [6] António C. Andrade and F. P. Maciel Barbosa, "Voltage Collapse Preventive Control – A New Method" Melecon 2004 – The 12 th Mediterranean Electrotechnical Conference, Dubrovnik, Croatia, May 2004.
- [7] António C. Andrade and F. P. Maciel Barbosa, "Voltage Collapse Preventive Control – A New Method and Tools" ICKEDS 2004 – The 1º st International Conference on Engineering and Decision Support, Porto, Portugal, July 2004.
- [8] António C. Andrade and F. P. Maciel Barbosa, "A New Method for Detecting the Point of Voltage Collapse" UPEC 2004 – 39th International Universities Power Engineering Conference, Bristol, England, September 2004.
- [9] António C. Andrade and F. P. Maciel Barbosa, "Detection of the Point of Voltage Collapse Using the FSQV Method" PowerTech2005, St.Petersburg, Russia, June 2005.