

3

Avaliação da segurança dinâmica de sistemas de energia elétrica: Resultados

3.1

Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos da aplicação do método de avaliação da segurança dinâmica de sistemas elétricos, através da determinação da estabilidade na primeira oscilação.

A estabilidade na primeira oscilação é determinada a partir do cálculo da margem de estabilidade do sistema. Mensura-se a distância entre o ponto de operação em questão e o limite de estabilidade, através da análise das variáveis de estado.

Inicialmente, observa-se a aceleração das unidades geradoras do sistema em dois instantes. O primeiro imediatamente após a ocorrência da falta (t_0^+), e o segundo imediatamente após a eliminação da falta (t_{cl}^+).

Em seguida, define-se o grupo de geradores severamente perturbados. Este grupo é composto pelo gerador que apresentar a maior aceleração dentre todos os geradores do sistema e pelos geradores que apresentem a razão entre suas acelerações e a maior aceleração dentre todos os geradores do sistema, maior ou igual a um parâmetro σ . Neste trabalho, considerou-se σ igual a 0,7. Valores de σ menores geram grupo de geradores severamente perturbados maiores, e vice-versa.

No conjunto de máquinas severamente perturbadas, aquela que apresentar a menor margem de estabilidade é a mais afetada pelo distúrbio, e define a margem de estabilidade do sistema.

Na medida em que aumentamos o nível de severidade de um distúrbio, através de um incremento na duração do curto-circuito, a margem de estabilidade decresce devido à proximidade em relação ao limite de estabilidade.

No instante em que a margem de estabilidade do gerador mais severamente perturbado assume valores próximos a zero, determina-se o tempo crítico de eliminação do distúrbio.

Com base nos tempos críticos calculados para cada uma das faltas do sistema é feita uma hierarquização das contingências. Tem-se como objetivo priorizar o grupo de faltas severas a ser estudado, reduzindo-se o conjunto de contingências.

3.2

Análise de desempenho do método nos sistemas avaliados

Os estudos foram realizados em 3 sistemas de pequeno porte: um sistema com duas máquinas e uma barra infinita, o sistema CIGRÉ com 7 geradores e 10 barras, e o sistema New England, com 39 barras e 10 geradores.

A ferramenta utilizada para a avaliação da estabilidade transitória foi desenvolvida em linguagem de programação FORTRAN [17]. Este programa calcula as margens de estabilidade, e determina os tempos críticos de eliminação da falta. Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos por simulação utilizando o programa ANATEM [18].

Utilizou-se o modelo clássico de máquina, isto é, tensão constante atrás da reatância transitória.

No cálculo dos tempos críticos, considerou-se passos de integração das equações dinâmicas de 1ms e 5 ms, e tempo de simulação de 2 segundos.

Curtos-circuitos trifásicos sólidos foram aplicados e, em seguida, foi avaliado o comportamento dinâmico dos geradores. Em algumas simulações os curtos-circuitos foram eliminados com a remoção de linha de transmissão, isto é, após a eliminação da falta o sistema passa a operar sem a linha de transmissão, ao contrário da situação pré-falta. Em outras, considera-se a configuração pós-falta idêntica à pré-falta, ou seja, o curto-circuito é simplesmente aplicado e removido sem alteração de configuração.

Não foi considerada a atuação de esquemas de proteção, isto é, uma vez que uma das máquinas perde a estabilidade, o sistema também se torna instável.

Observou-se a variação dos ângulos, velocidades angulares e potências acelerantes, tendo sempre como referência o centro de inércia do sistema (COI).

O conjunto de máquinas severamente perturbadas para cada contingência é determinado, e suas margens de estabilidade são calculadas em função do tempo de duração da falta. Os tempos críticos são determinados quando a margem for nula. A seguir são apresentados os resultados da avaliação da estabilidade transitória dos sistemas de energia elétrica considerados.

3.2.1

Sistema com duas máquinas e barra infinita

A figura 3.1 apresenta um sistema de cinco barras, dois geradores, dois transformadores, quatro linhas de transmissão e uma barra infinita [20]. Avaliou-se o comportamento dos geradores para curtos-circuitos trifásicos sólidos na barra 4, eliminado com e sem a remoção de linha de transmissão (LT), e na barra 5, eliminado com a remoção de um circuito da LT 3-5. Os dados deste sistema são apresentados no Apêndice 1.

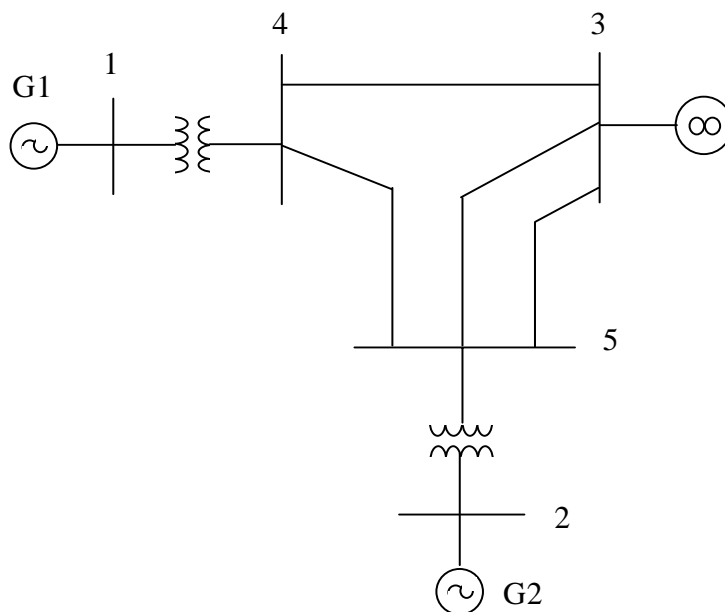


Figura 3.1 – Diagrama unifilar do sistema de potência composto por dois geradores e uma barra infinita.

Para um curto-circuito na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5, definiu-se o conjunto de máquinas críticas a partir das acelerações dos geradores no instante imediatamente após a aplicação da falta.

A tabela 3.1 apresenta as acelerações dos geradores para alguns tempos de eliminação da falta em questão.

Tabela 3.1 – Aceleração dos geradores em t_0^+ , para diversos tempos de eliminação da falta.

ACELERAÇÃO DOS GERADORES (em P.U.)		
Tempo de falta (ms)	Gerador 1	Gerador 2
150	-0,373	-0,044
185	-0,472	-0,056
200	-0,490	-0,061
205	-0,491	-0,062

Sendo a aceleração do gerador 2 aproximadamente igual a 12 % da aceleração do gerador 1, apenas este último pertence ao grupo de geradores severamente perturbados, portanto, mais propício a perder o sincronismo. Logo, a estabilidade do sistema, para um curto na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5, é determinada pelo gerador 1.

Com base nesse resultado, calcula-se a margem de estabilidade do gerador 1, que será a margem de estabilidade do sistema.

A tabela 3.2 apresenta as margens de estabilidade dos geradores 1 e 2, para diversos tempos de eliminação da falta em questão, e a figura 3.2 mostra estes resultados.

Tabela 3.2 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{cl} (ms)	ME 1	ME2
150	1,00	1,00
175	0,905	1,00
185	0,734	1,00
195	0,447	1,00
200	0,250	1,00
201	0,206	1,00
202	0,160	1,00
203	0,111	1,00
204	0,061	1,00
205	0,007	1,00
206	0,000	1,00

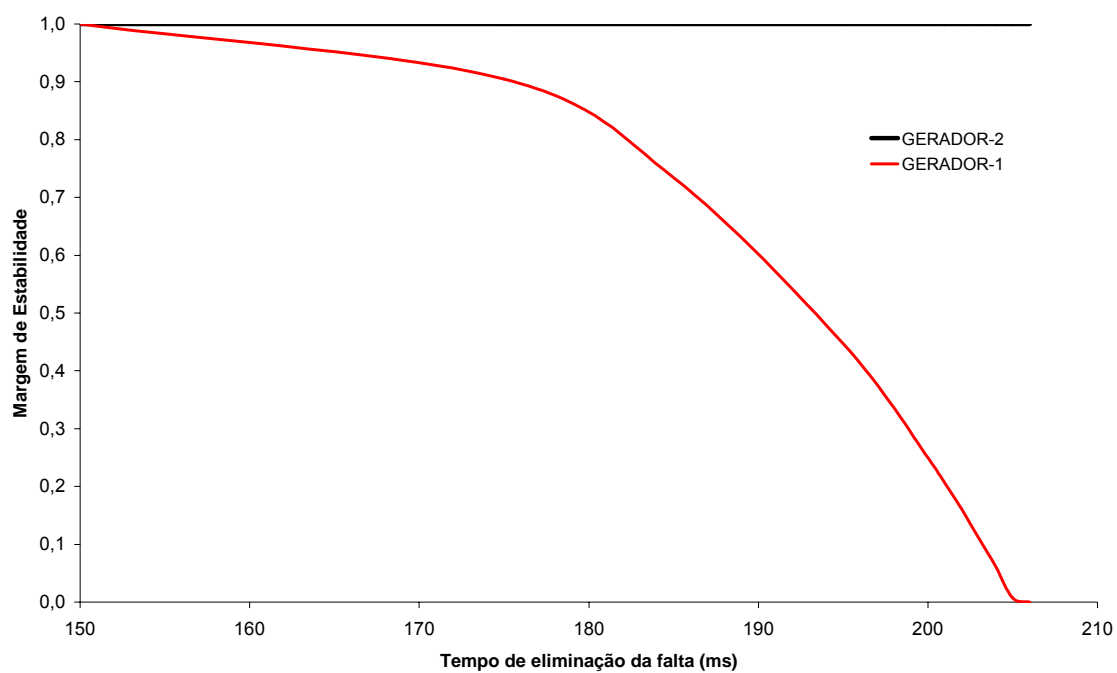


Figura 3.2 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5.

A margem de estabilidade do gerador 1 se reduz significativamente a partir de um tempo de eliminação da falta de 180 ms, enquanto a margem do gerador 2 permanece constante, com valor igual a um.

Quando a duração da falta é de 205 ms, a margem de estabilidade do gerador 1 assume um valor muito pequeno, indicando que qualquer aumento na duração da falta acarretará na perda de sincronismo deste gerador com o sistema, uma vez que a margem assumirá o valor nulo. Portanto, para que o sistema não perca a estabilidade, o maior tempo possível de duração de um curto-circuito na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-5, é de 205 ms.

Se a falta for aplicada na barra 4, eliminada sem a remoção da LT 4-5, o nível de severidade é inferior, dado que restabelecemos a configuração original do sistema. Neste caso, o tempo crítico é de 209 ms, valor ligeiramente maior que o do caso anterior, como é observado na figura 3.3.

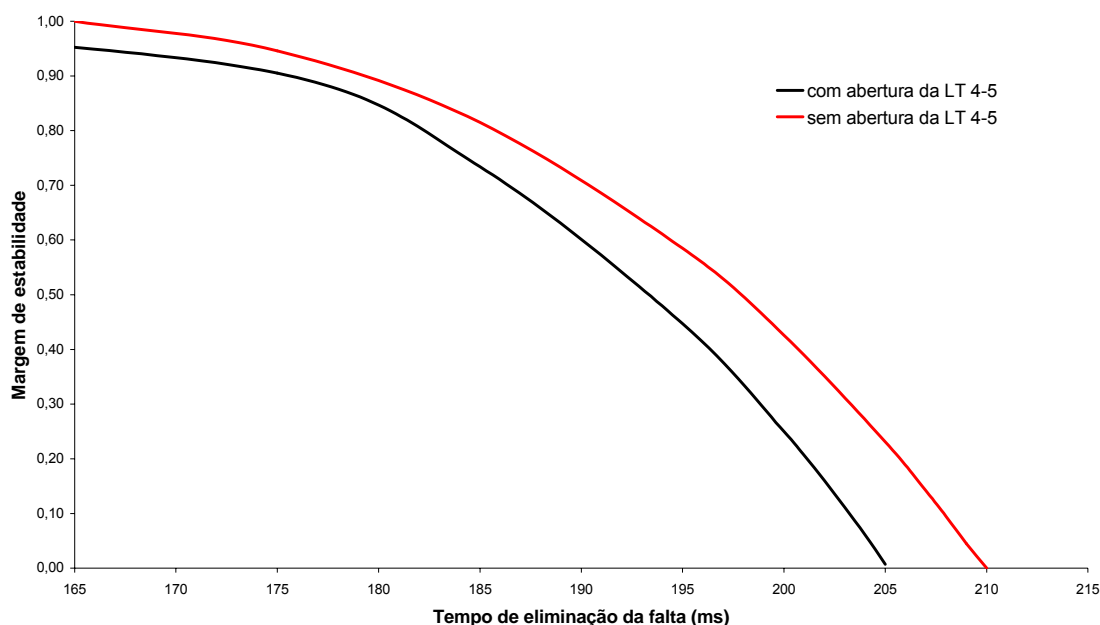


Figura 3.3 – Margens de estabilidade do sistema para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com e sem a remoção da LT 4-5.

A tabela 3.3 e a figura 3.4 mostram a variação das margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito na barra 5, eliminado com a remoção de um circuito da LT 3-5.

Tabela 3.3 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado com a remoção de um circuito da LT 3-5, para diversos tempos de eliminação de falta.

t_{cl} (ms)	ME 1	ME2
200	1,000	1,000
220	1,000	0,921
240	1,000	0,605
250	1,000	0,330
255	1,000	0,158
258	1,000	0,038
259	1,000	0,000

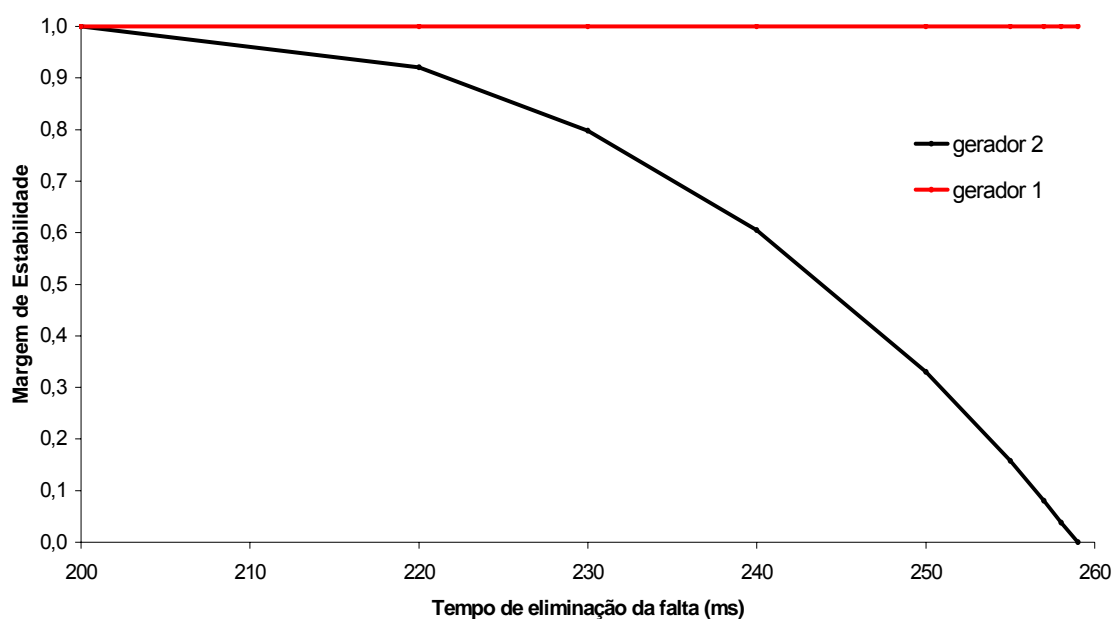


Figura 3.4 – Margens de estabilidade dos geradores 1 e 2 para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado com a remoção de um circuito da LT 3-5.

O curto-circuito na barra 5, ao contrário do que se observa na falta anterior, torna o gerador 2 severamente perturbado, em face da proximidade elétrica entre esse gerador e a barra 5. A margem de estabilidade do gerador 1 permanece constante e igual a um, mostrando que o curto-circuito na barra 5 pouco afeta este gerador. Por outro lado, a margem de estabilidade do gerador 2 é

nula para um tempo de eliminação da falta de 259 ms, estabelecendo-se um tempo crítico de 258 ms.

Utilizando-se o programa em FORTRAN [17], foi feita uma estimativa dos tempos críticos de eliminação das faltas nas barras 4 e 5, a partir do cálculo das margens de estabilidade. Tais valores foram comparados com aqueles obtidos através de simulações com o programa ANATEM [18].

Ressalta-se a vantagem do programa desenvolvido calcular automaticamente os valores de tempos críticos. Dessa forma, evitam-se as constantes alterações do tempo de duração do curto-circuito requeridas pelo ANATEM [18].

Os resultados são apresentados na tabela 3.4, mostrando a consistência da metodologia aplicada, uma vez que a diferença entre os resultados é mínima.

Tabela 3.4 – Comparação dos tempos críticos de eliminação da falta para diversas contingências.

TEMPOS CRÍTICOS (ms)				
EVENTO	LT ABERTA	FORTTRAN	ANATEM	ERRO (%)
Curto trifásico na barra 4	-	209	210	- 0,48
	4-5	205	206	-0,49
Curto trifásico na barra 5	3-5	258	265	-2,64

3.2.2

Sistema CIGRÉ

A figura 3.5 apresenta o sistema CIGRÉ [2] com dez barras, sete geradores e treze linhas de transmissão. Os dados deste sistema estão apresentados no Apêndice 2.

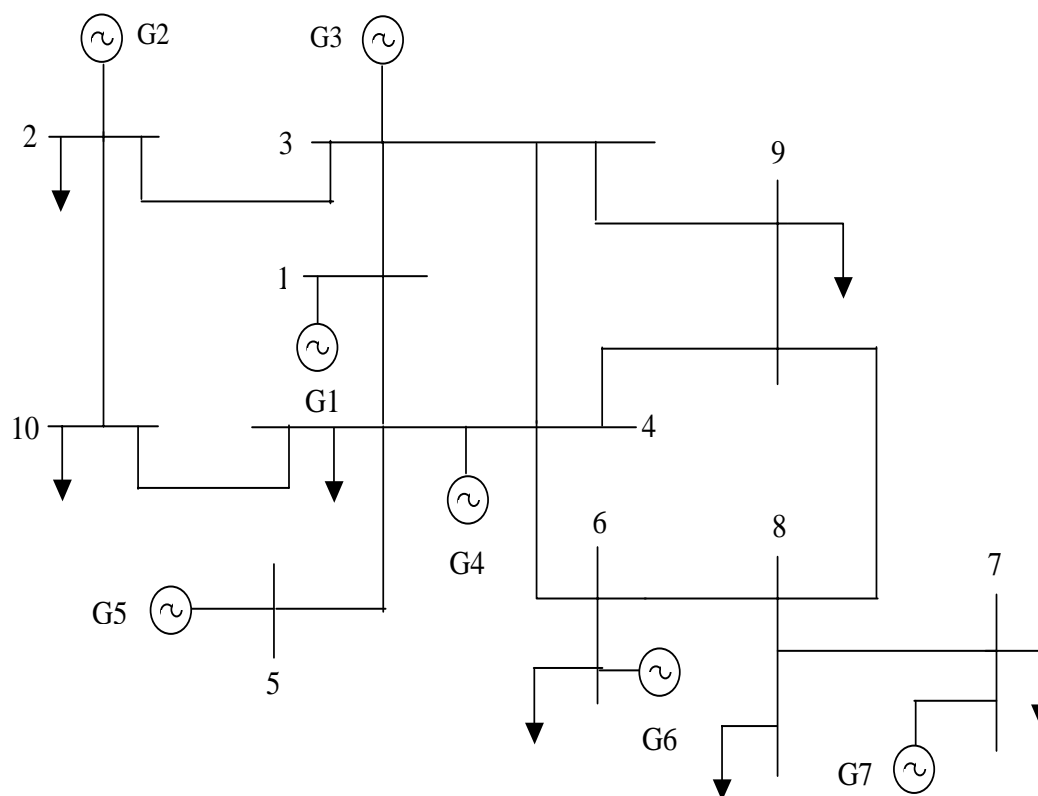


Figura 3.5 – Diagrama unifilar do sistema CIGRÉ

Curtos-circuitos trifásicos sólidos foram aplicados em diversas barras do sistema, tendo sido eliminados com e sem a remoção de linha de transmissão. As simulações no programa desenvolvido em FORTRAN [17] foram comparadas com os resultados obtidos com o ANATEM [18], e com aqueles apresentados na referência [2].

Os tempos críticos foram calculados com base na margem de estabilidade do sistema, para um tempo de simulação de 2 segundos. Uma vez que a margem assume o valor muito próximo de zero, define-se o tempo crítico, utilizando passos de integração de 1 ms e 5 ms.

Caso o ângulo da máquina não atinja um pico, para o intervalo de tempo considerado, a margem não pode ser calculada, uma vez que não temos o valor da potência acelerante no instante em que o desvio de velocidade angular é nulo (velocidade da máquina igual à velocidade síncrona).

Portanto, se para um determinado instante de eliminação da falta t_{cl} , o ângulo da máquina atinge um pico e, se para um instante imediatamente posterior

$t_{cl} + \Delta t$, o ângulo cresce monotonicamente, atingindo 180 graus, então t_{cl} é o tempo crítico.

A tolerância considerada foi de 0,001. Isto significa que quando a margem assume um valor menor ou igual a 0,001 o programa define o tempo crítico.

Foi feita uma análise de sensibilidade quanto à composição do grupo de geradores severamente perturbados, bem como quanto à forma de determinação das margens de estabilidade.

A definição do grupo de geradores críticos considera os valores da aceleração da máquina no instante imediatamente após a ocorrência da falta (t_0^+), ou no instante imediatamente após a falta ser eliminada (t_{cl}^+). Considerando este último critério, obtemos um grupo mais abrangente de geradores severamente perturbados.

Para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, o grupo de máquinas críticas é composto pelos geradores constantes da tabela 3.5. As margens de estabilidade dos geradores são apresentadas na tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 1	-	1	1, 2, 4 e 6

Tabela 3.6 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 4	ME 6
250	1,000	0,988	1,000	0,973
300	0,899	0,844	0,945	0,791
310	0,821	0,783	0,865	0,711
320	0,716	0,712	0,755	0,621
330	0,575	0,624	0,616	0,488
340	0,389	0,507	0,417	0,327
350	0,113	0,354	0,128	0,101
353	0,002	0,285	0,012	0,013
354	0,000	0,281	0,000	0,000

Os geradores que apresentam as menores margens de estabilidade, para t_{cl} igual à 353 ms, são os geradores 1,4 e 6, todos indicados no grupo de geradores severamente perturbados quando se considera a aceleração em t_{cl}^+ . Um incremento de 1 ms em t_{cl} , faz com que os ângulos dos geradores 1,4 e 6 não atinjam um pico, ultrapassando 180 graus, tendo sua margem reduzida à zero.

Considerando o critério de aceleração no instante imediatamente após a falta ser aplicada, para a definição do grupo de geradores severamente perturbados, apenas o gerador 1 é classificado como crítico.

Logo, os dois critérios indicam, pelo menos, um gerador responsável pela determinação do tempo crítico.

A figura 3.6 apresenta a margem de estabilidade dos geradores severamente perturbados.

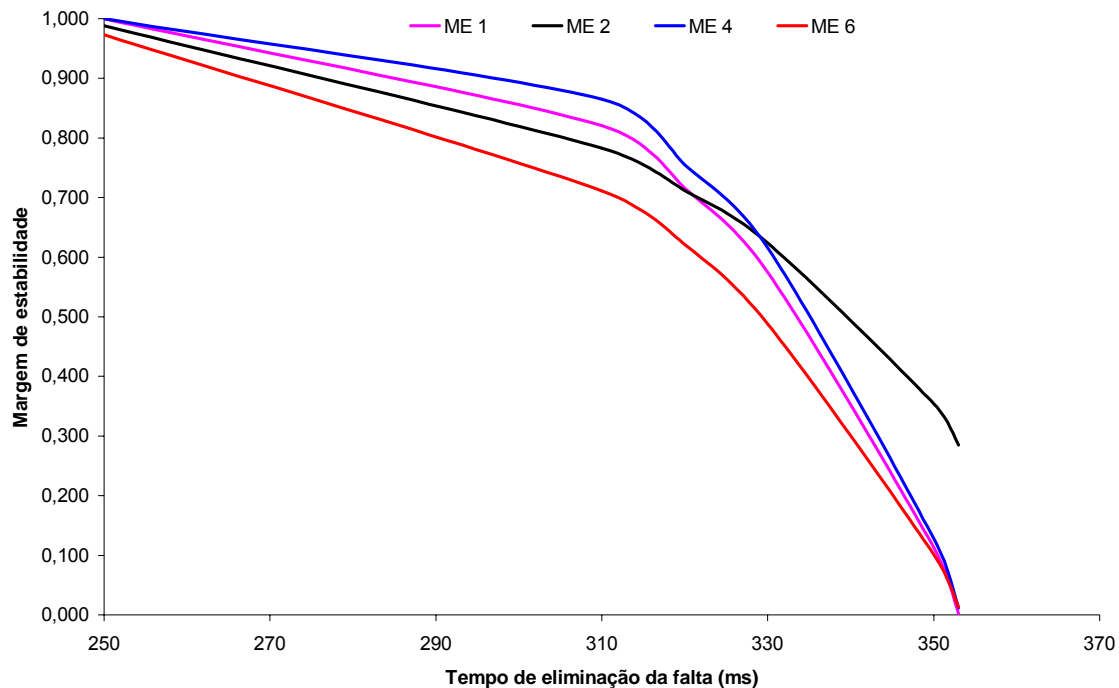


Figura 3.6 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão

Observando a figura 3.6, verifica-se que a margem de estabilidade do sistema é determinada pelo gerador 6, exceto para o tempo crítico. Nesse instante, o gerador 1 apresenta a menor margem. Entretanto, no instante imediatamente posterior (354 ms), além do gerador 6, os geradores 1 e 4 também apresentam margem de estabilidade nula, pelo fato de seus ângulos não atingirem um pico.

A tabela 3.7 apresenta o comportamento dos ângulos dos geradores 1,4 e 6 ao longo do tempo, para t_{cl} de 354 ms, obtidos pela simulação do programa FORTRAN [17].

Tabela 3.7 - Ângulos dos geradores 1,4 e 6 para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 354 ms.

t(s)	δ_1 (graus)	δ_4 (graus)	δ_6 (graus)
0,0	2,70	1,38	2,30
0,5	144,5	-21,75	-25,05
0,75	209,65	-32,00	-35,02
1,00	494,40	-76,81	-77,79
1,50	1.293,68	-195,60	-197,71
2,00	2.374,67	-356,47	-359,63

Observando a tabela acima, vemos que, para um tempo de simulação de 1 segundo, apenas o ângulo do gerador 1 ultrapassa 180 graus. Para os geradores 4 e 6, nada podemos afirmar, pois, apesar de seus ângulos não atingirem um pico, também não ultrapassam os 180 graus. Já para um tempo de simulação de 2 segundos, os geradores 1,4 e 6 perdem a estabilidade, dado que seus respectivos ângulos ultrapassam 180 graus. Utilizando o ANATEM [18], o tempo crítico obtido foi de 354 ms, portanto, 1 ms maior do que aquele obtido através do programa em FORTRAN[17]. A figura 3.7 mostra os ângulos destes geradores obtidos pelas simulações do ANATEM [18], para o tempo de eliminação da falta imediatamente posterior ao tempo crítico, ou seja, 355ms.

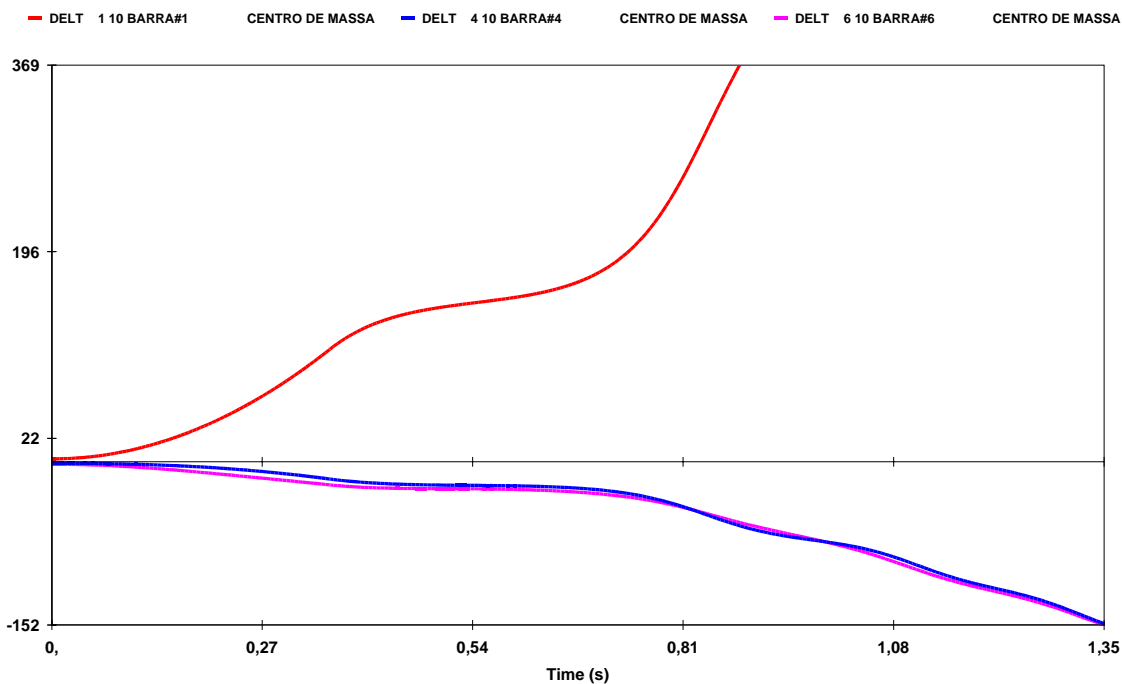


Figura 3.7 - Ângulos dos geradores 1,4 e 6, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 355 ms.

Pelo fato do ângulo da máquina 1 ter ultrapassado 1000 graus, para t igual a 1,35 segundos, a simulação no ANATEM[18] foi interrompida. Daí a figura 3.7 apresentar valores dos ângulos até 1,35 segundos. O gerador 1 é instável na primeira oscilação, uma vez que seu ângulo ultrapassa os 180 graus. Entretanto, até 1,35 segundos, os ângulos dos geradores 4 e 6 não atingem um pico nem ultrapassam 180 graus, impedindo uma conclusão a respeito da estabilidade na primeira oscilação.

O fato dos ângulos dos geradores 1,4 e 6 não terem atingido um pico, está de acordo com os resultados obtidos utilizando o programa em FORTRAN [17].

Neste caso, os geradores 4 e 6 também perdem a estabilidade para um tempo de simulação de 2 segundos, fato que não pôde ser comprovado através do ANATEM [18].

Considerando um curto-circuito na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, obtemos um tempo crítico de 342 ms, ligeiramente inferior ao do caso em que não ocorre a remoção de linha de transmissão, que é de 353 ms.

As tabelas 3.8 e 3.9, e a figura 3.8, apresentam o conjunto de geradores severamente perturbados e suas margens de estabilidade para o curto-circuito em questão.

Tabela 3.8 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 1	1-3	1	1, 2, 4, 5 e 6

Tabela 3.9 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(\text{ms})$	ME 1	ME 2	ME 4	ME 5	ME 6
200	0,999	0,995	0,993	0,990	0,988
250	0,998	0,967	0,992	0,990	0,965
300	0,840	0,789	0,843	0,897	0,753
320	0,574	0,628	0,640	0,676	0,583
330	0,374	0,545	0,454	0,478	0,457
340	0,099	0,426	0,229	0,194	0,280
342	0,029	0,382	0,189	0,137	0,238
343	0,000	0,375	0,158	0,093	0,222

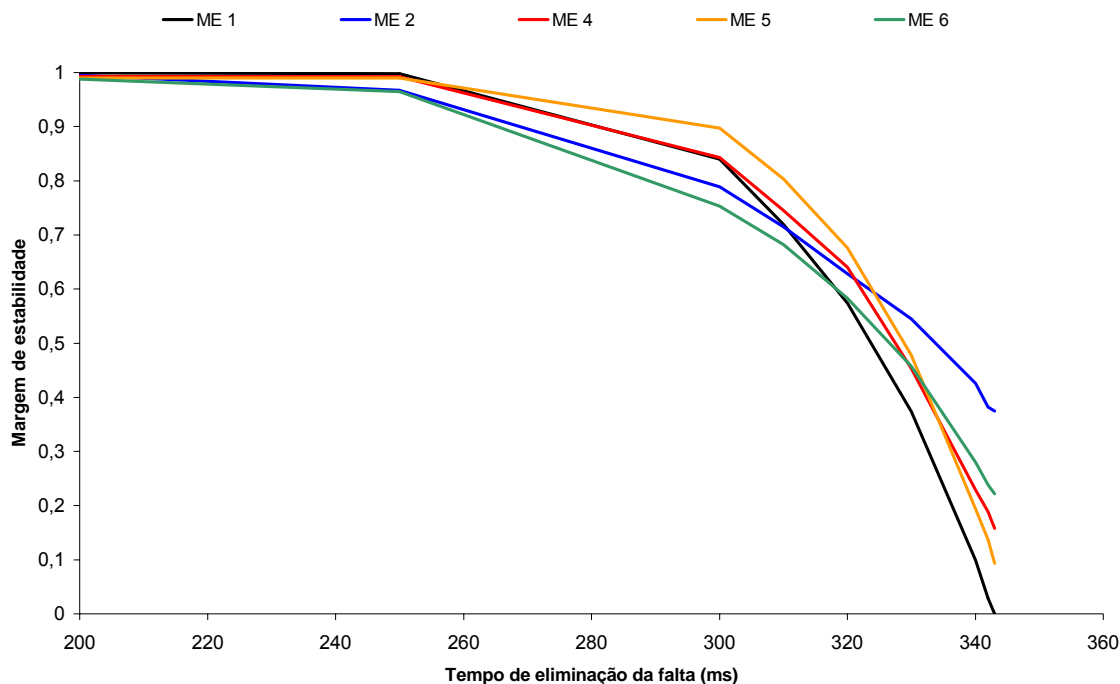


Figura 3.8– Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3.

Quando t_{cl} é igual a 200 ms, todos os geradores apresentam margem de estabilidade em torno de um. Para um t_{cl} entre 250 ms e 320 ms, a margem de estabilidade do sistema é determinada pelo gerador 6. A partir daí, a margem de estabilidade do sistema passa a ser determinada pelo gerador 1, até assumir um valor nulo, que ocorre para um tempo de eliminação da falta de 343 ms.

A figura 3.9 apresenta a margem de estabilidade do sistema, determinada por uma combinação das curvas das margens de estabilidade dos geradores 1 e 6.

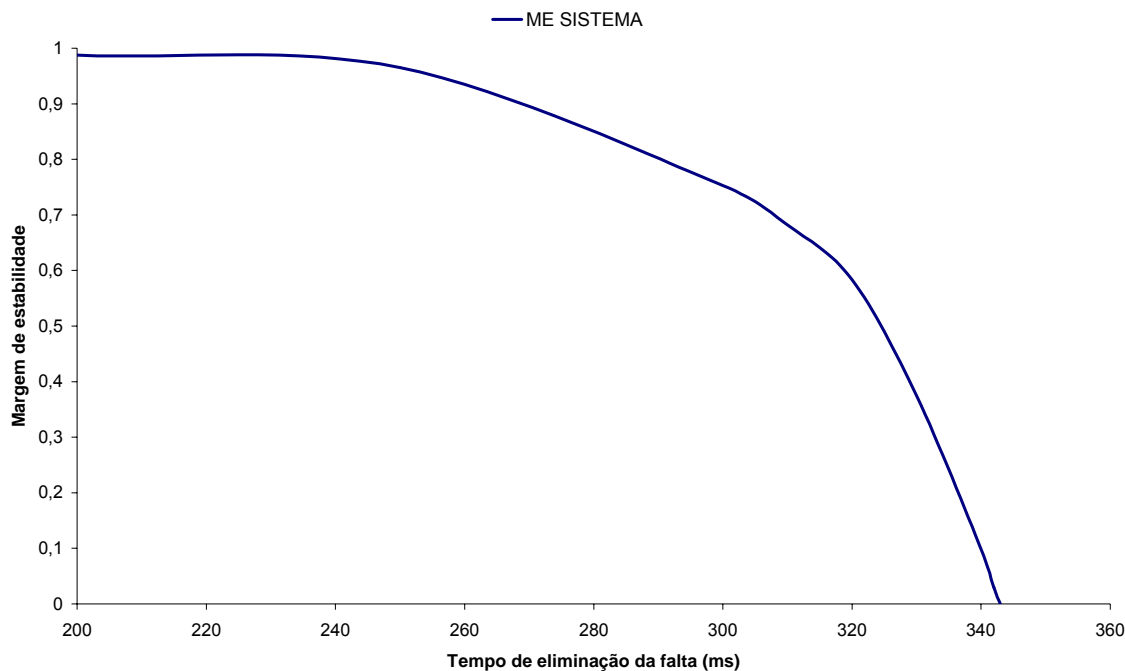


Figura 3.9 – Margem de estabilidade do sistema, para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3.

Neste caso, os dois critérios de definição do grupo de geradores severamente perturbados indicam a máquina responsável pela determinação do tempo crítico, com a vantagem do critério com base na aceleração em t_0^+ requerer um menor esforço computacional, por indicar apenas o gerador 1 como severamente perturbado.

Portanto, para a falta em questão, apenas o gerador 1 não atinge um pico e perde a estabilidade, enquanto os demais geradores severamente perturbados permanecem estáveis. Estes resultados são similares aos resultados obtidos com o ANATEM [18], como pode ser observado na figura 3.10, embora o tempo crítico apresente uma diferença de 1 ms.

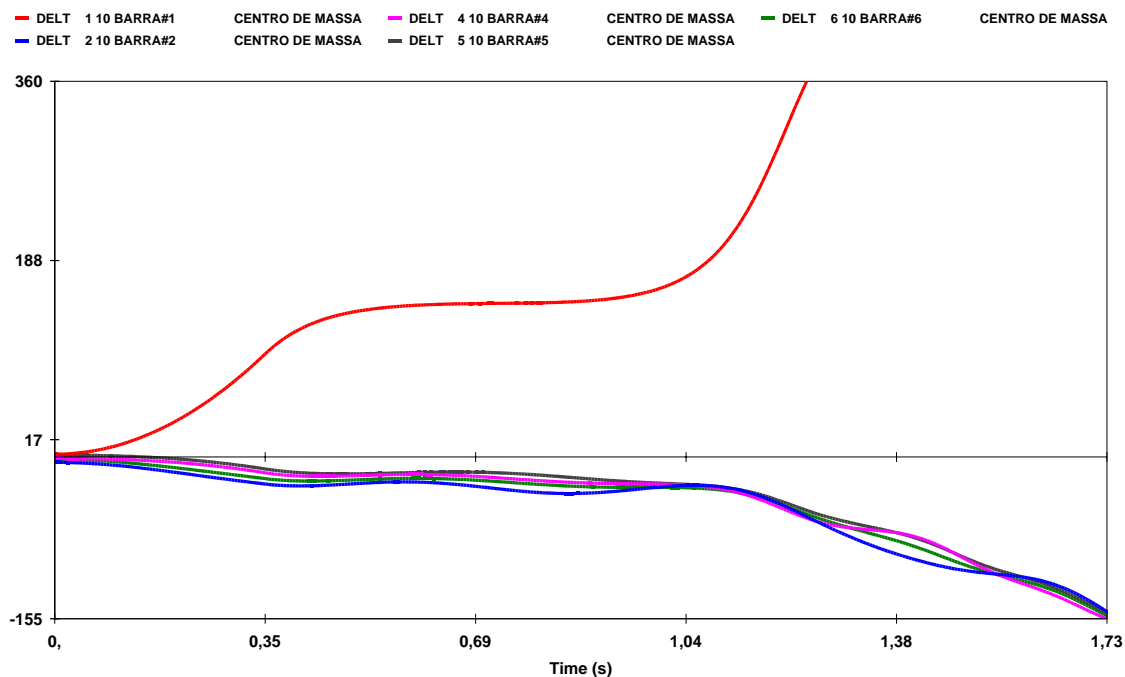


Figura 3.10 – Ângulos dos geradores 1,2,4,5 e 6, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para um tempo de eliminação da falta de 344 ms.

A tabela 3.10 e a figura 3.11 apresentam os tempos críticos para passos de integração de 1 ms, 5 ms e 10 ms na solução das equações dinâmicas deste caso, e as margens de estabilidade do sistema para cada um dos passos de integração considerados.

Tabela 3.10 – Tempos críticos para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos passos de integração.

	Passo de integração		
	1 ms	5 ms	10 ms
Tempo crítico	342	335	330

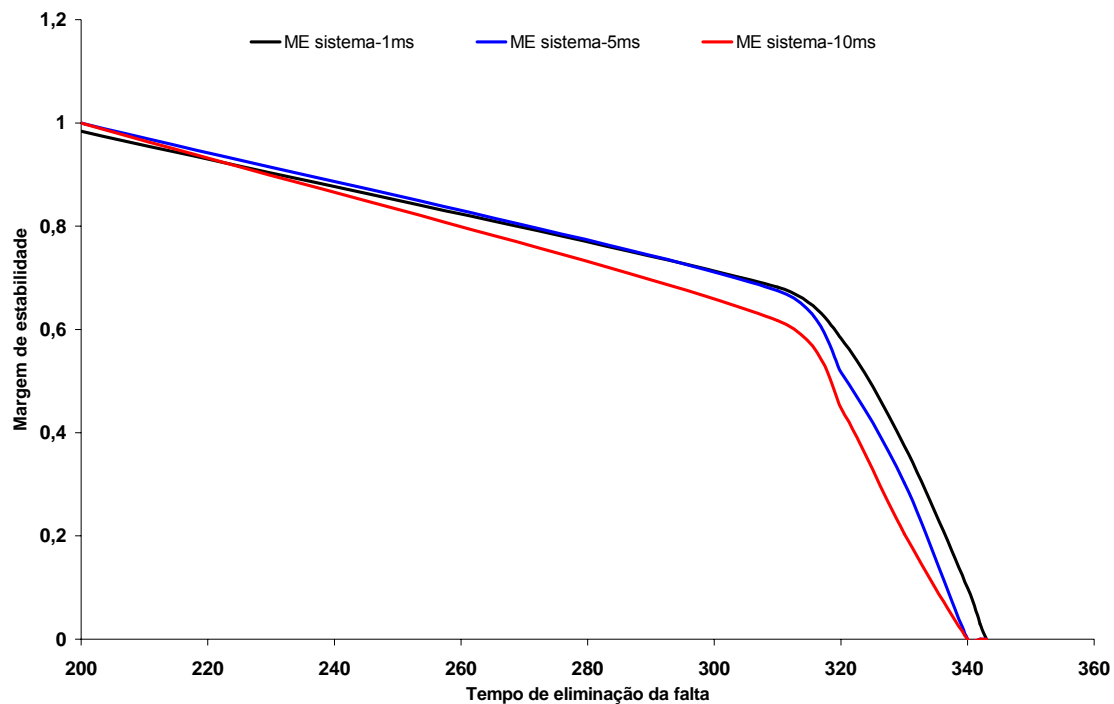


Figura 3.11 – Margens de estabilidade para um curto-circuito trifásico na barra 1, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos passos de integração.

Tabela 3.11 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 2.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS		
Evento	CRITÉRIO	
	Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 2	2	1, 2, 3,4

Tabela 3.12 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 3	ME 4
350	0,879	0,897	0,879	0,969
370	0,765	0,747	0,742	0,804
400	0,373	0,310	0,364	0,321
410	0,106	0,047	0,124	0,033
411	0,090	0,000	0,036	0,014

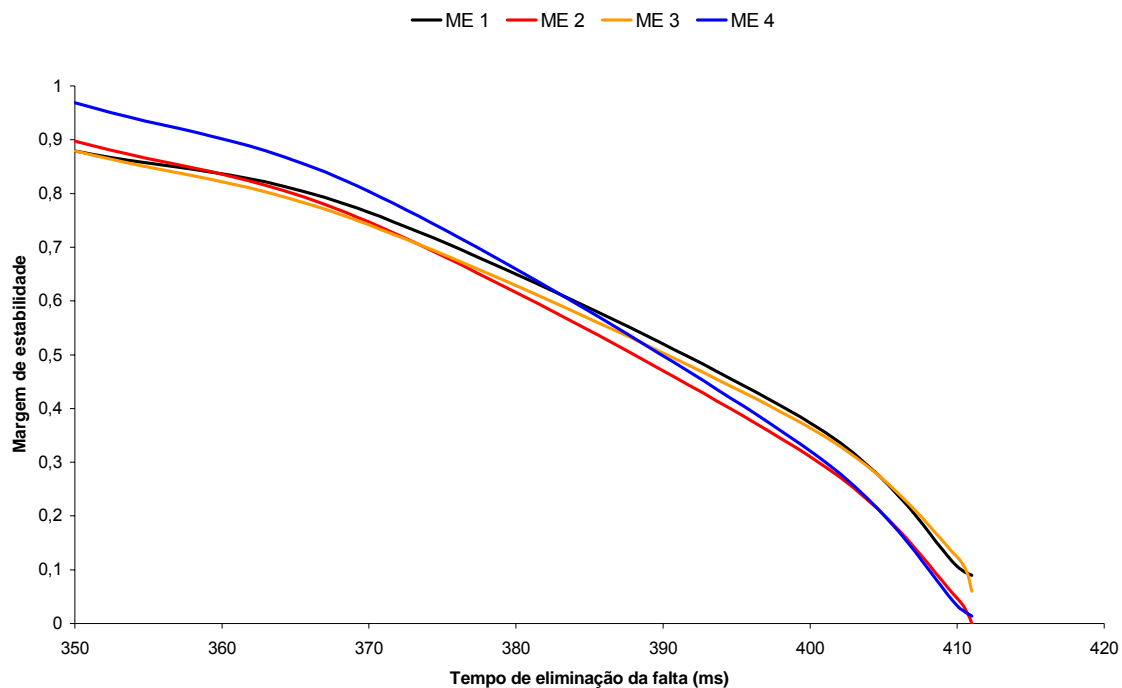


Figura 3.12 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Para o curto-circuito na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, a margem de estabilidade do sistema é regida pelos geradores 1, 2, 3 e 4, dependendo do tempo de eliminação da falta. No entanto, para t_{cl} igual a 411 ms, o gerador 2 perde a estabilidade, definindo um tempo crítico de 410 ms.

Como o gerador 2 é responsável pela perda da estabilidade do sistema, então ambos os critérios são eficazes, ainda que o grupo de geradores severamente perturbados não seja o mesmo.

A figura 3.13 apresenta os resultados obtidos com o ANATEM [18]. Vemos que, de fato, o ângulo do gerador 2 ultrapassa 180 graus, um tempo de eliminação da falta de 411 ms, enquanto os geradores 1, 3 e 4 permanecem estáveis.

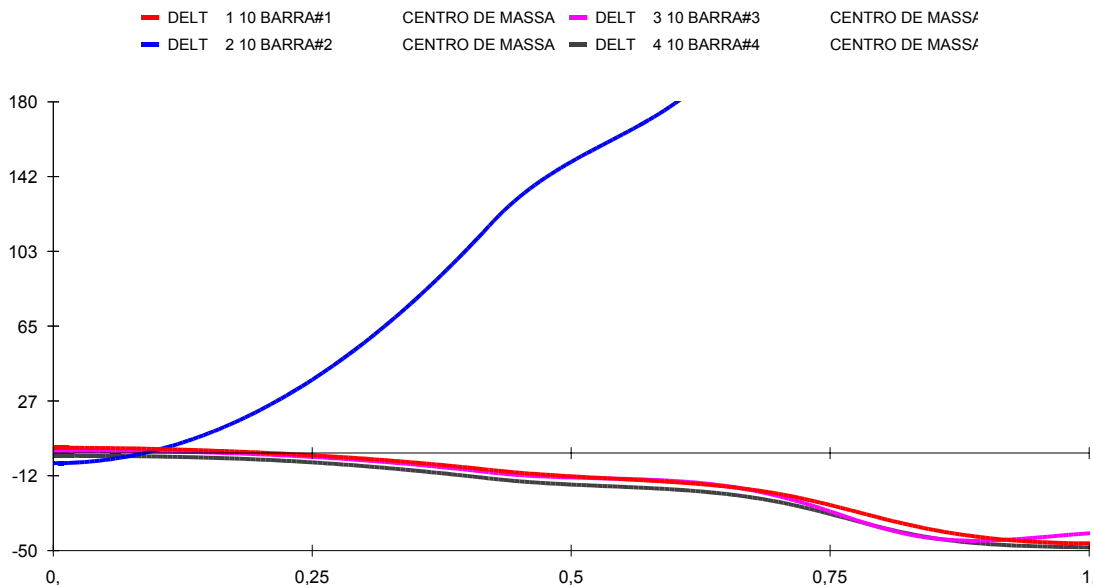


Figura 3.13 – Ângulos dos geradores 1,2,3 e 4, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 2, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 411 ms.

Um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem a remoção de linha de transmissão e com a remoção da LT 1-3, também foi simulado.

A tabela 3.13 apresenta o conjunto de geradores severamente perturbados, para a falta em questão, e as tabelas 3.14 e 3.15, e as figuras 3.14 e 3.15, apresentam as margens de estabilidade destes geradores.

Tabela 3.13 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 3	-	3	2,3
	1-3	3	2,3

Tabela 3.14 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 2	ME 3
250	0,995	1,000
350	0,787	0,753
380	0,578	0,283
385	0,528	0,142
388	0,471	0,004
389	0,469	0,000

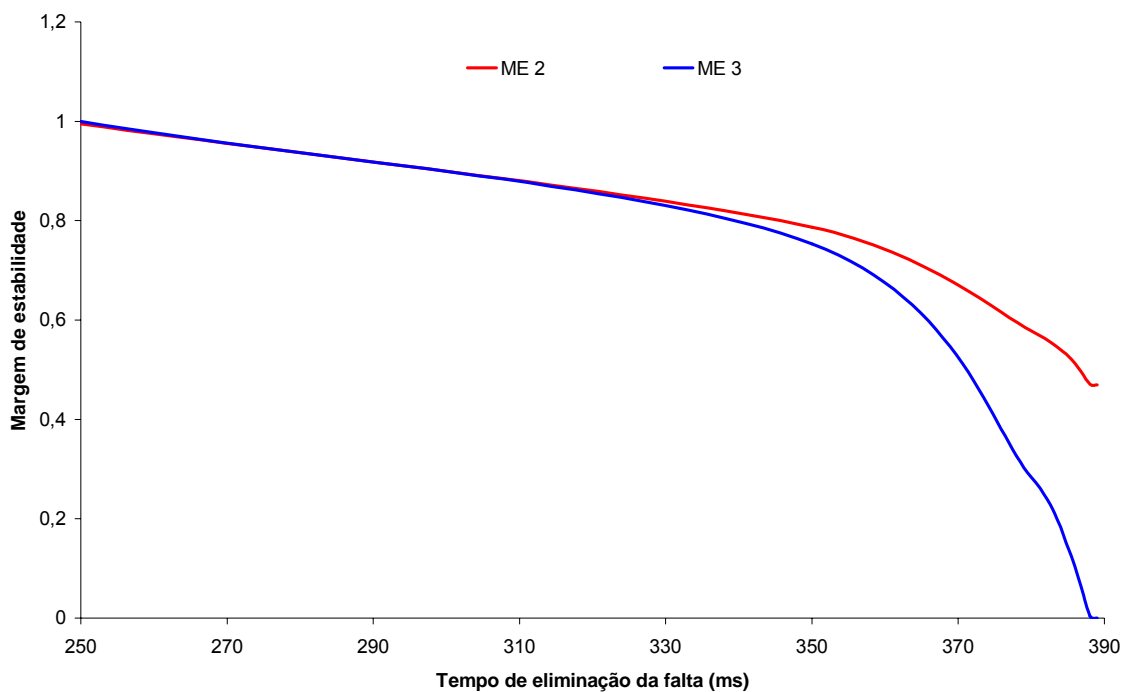


Figura 3.14 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.15 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado com a remoção da LT 1-3, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{cl} (ms)	ME 2	ME 3
250	0,997	0,997
350	0,736	0,615
370	0,576	0,257
377	0,487	0,010
378	0,476	0,000

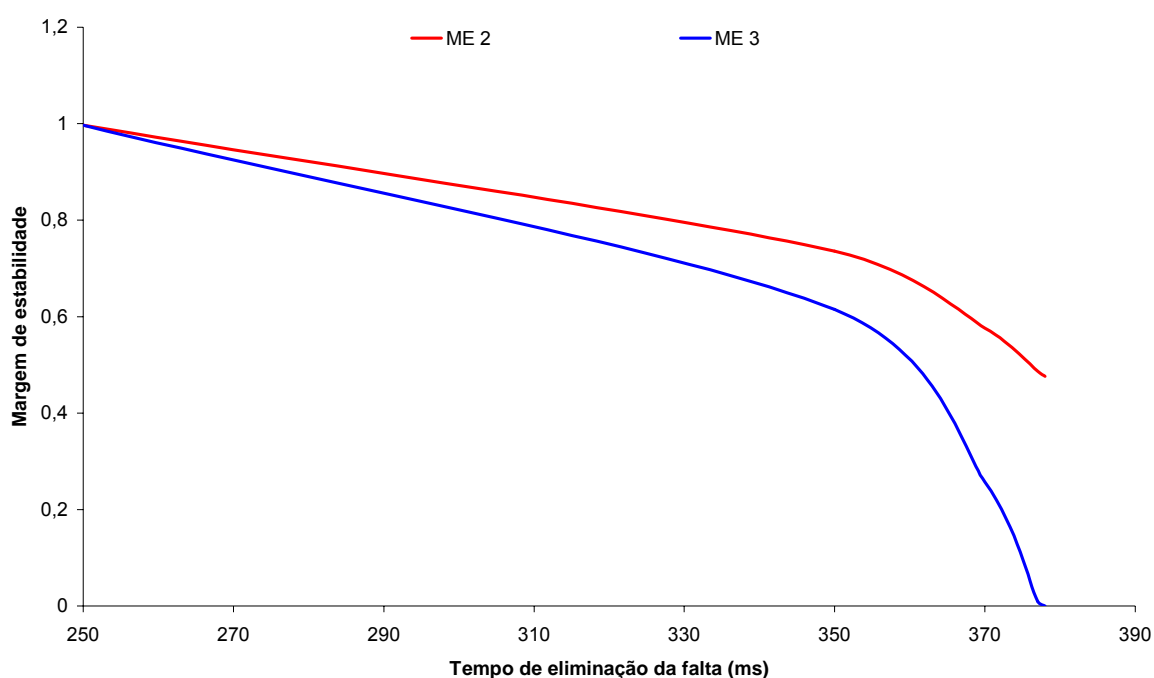


Figura 3.15 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 3, eliminado com a remoção da LT 1-3.

Ainda que o critério com base na aceleração dos geradores em t_{cl}^+ indique a máquina 2 como severamente perturbada, a responsável pela determinação do tempo crítico é a máquina 3. Já o critério com base na aceleração em t_0^+ indica apenas o gerador 3, demonstrando ser eficaz. Isto ocorre para as duas faltas em questão.

Quando a margem de estabilidade do gerador 3 assume um valor próximo de zero, a máquina 2 possui margem de estabilidade de aproximadamente 0,5.

Com relação ao tempo crítico de eliminação da falta, a remoção da LT 1-3 torna a falta mais severa, reduzindo o tempo crítico de 388 ms para 377 ms. Um milissegundo de acréscimo no tempo de duração da falta faz com que o ângulo do gerador 3 não atinja um pico e ultrapasse 180 graus, perdendo a estabilidade.

Este resultado é similar àquele obtido utilizando o ANATEM [18], uma vez que o gerador 2 permanece estável, enquanto que o gerador 3 perde a estabilidade.

O curto-circuito na barra 4 também foi simulado, considerando a eliminação da falta sem a remoção de linha de transmissão, e com a remoção da LT 4-6. A tabela 3.16 apresenta o conjunto de máquinas severamente perturbadas para as faltas em questão.

Tabela 3.16 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 4.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 4	-	4, 5	2,4,6
	4-6	4, 5	2,3,4

O gerador 4 é indicado em ambos os critérios, para as duas faltas em questão, ao contrário do gerador 5. Este último é considerado severamente perturbado apenas pelo critério da aceleração em t_0^+ .

As tabelas 3.17 e 3.18, bem como as figuras 3.16 e 3.17, apresentam os resultados para essas faltas. As margens de estabilidade de todos os geradores do sistema foram analisadas.

Tabela 3.17 – Margens de estabilidade de todos os geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{ci}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 3	ME 4	ME 5	ME 6	ME 7
400	0,966	0,920	0,993	0,943	1,000	0,906	1,000
450	0,928	0,783	0,825	0,713	0,760	0,641	1,000
470	0,780	0,663	0,662	0,530	0,554	0,420	1,000
480	0,672	0,597	0,578	0,392	0,422	0,269	1,000
489	0,439	0,481	0,368	0,127	0,124	0,180	0,478
490	0,434	0,468	0,354	0,096	0,099	0,000	0,000

Tabela 3.18 – Margens de estabilidade de todos os geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para diversos tempos de eliminação da falta

$t_{ci}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 3	ME 4	ME 5	ME 6	ME 7
350	1,000	1,000	1,000	0,980	1,000	0,97	0,932
400	0,995	0,970	0,995	0,971	1,000	0,831	0,912
430	0,990	0,929	0,978	0,928	1,000	0,630	0,661
447	0,990	0,883	0,978	0,871	1,000	0,284	0,284
450	0,990	0,870	0,951	0,869	0,991	0,037	0,017
451	0,990	0,870	0,946	0,856	0,982	0,000	0,000

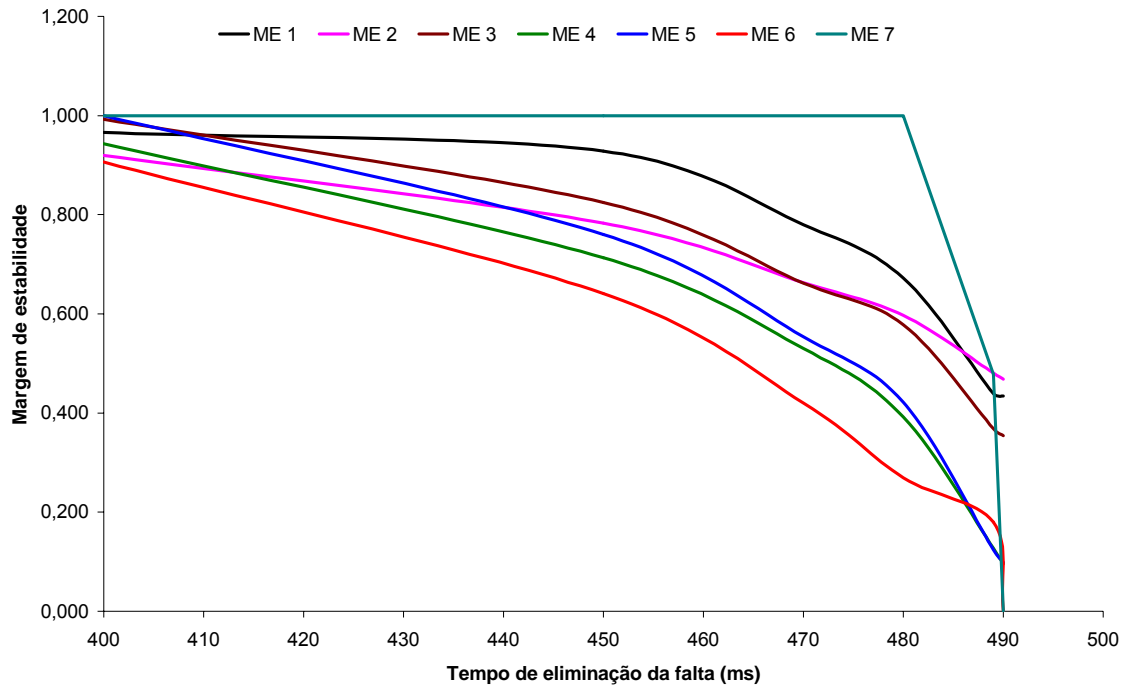


Figura 3.16 – Margens de estabilidade dos geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

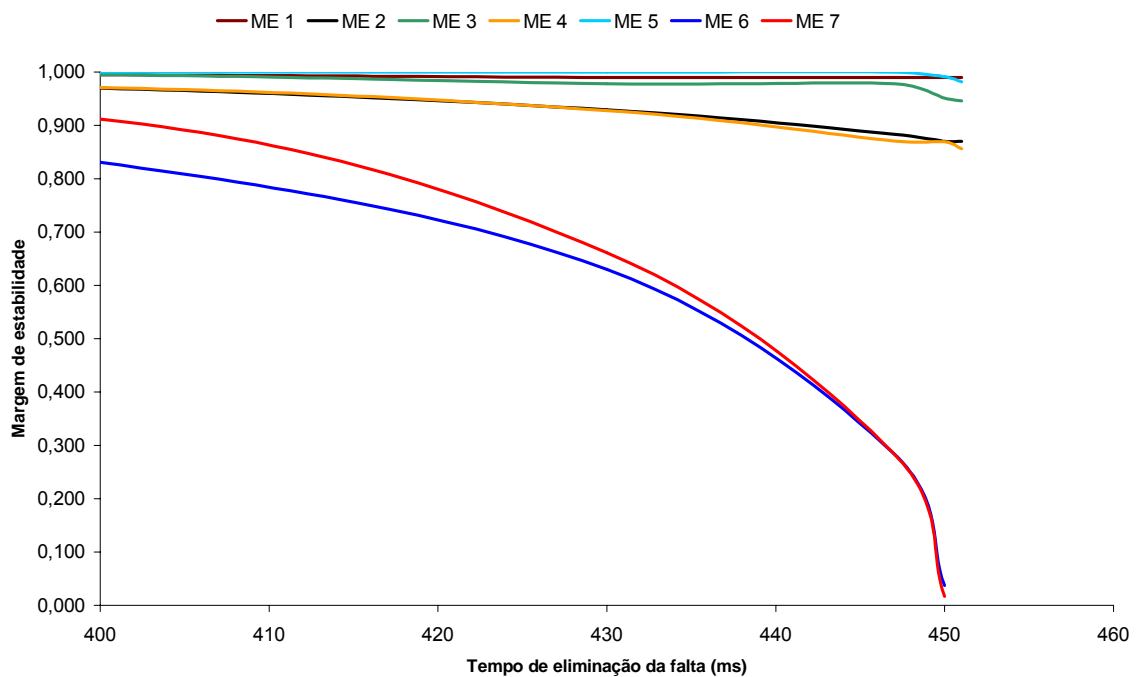


Figura 3.17 – Margens de estabilidade de todos os geradores do sistema para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6.

Para o curto-circuito na barra 4, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, os ângulos dos geradores 6 e 7 não atingem um pico e ultrapassam 180 graus, para um tempo de eliminação da falta de 490 ms.

Enquanto a máquina 6 tem sua margem reduzida gradativamente, na medida em que aumentamos a duração da falta, o gerador 7 apresenta margem de estabilidade igual a um, até 480 ms. Um aumento de 10 ms no tempo de duração da falta é suficiente para fazer com que os geradores 6 e 7 percam a estabilidade. Para esse tempo, os geradores 4 e 5, indicados como severamente perturbados, permanecem estáveis, porém com margens bem pequenas, em torno de 0,1.

Este é um caso em que o tempo crítico é definido por duas máquinas (geradores 6 e 7), sendo que uma delas (gerador 6) pertence ao grupo de geradores severamente perturbados, o que é suficiente para uma estimativa adequada do tempo crítico. Contudo, isto só ocorre para o critério com base na aceleração em t_{cl}^+ , demonstrando ser mais vantajoso que o critério com base na aceleração em t_0^+ . O gerador 7 não é indicado como crítico por nenhum dos critérios.

Quando a LT 4-6 é aberta, os geradores 6 e 7 têm suas margens reduzidas na medida em que se aumenta a duração da falta, e os demais geradores permanecem com margens de estabilidade elevadas, em torno de um. O comportamento das margens de estabilidade neste caso é análogo ao do caso em que temos duas máquinas ligadas a uma barra infinita, onde cada máquina está ligada por uma única linha de transmissão. A remoção da LT 4-6, faz com que os geradores 6 e 7 fiquem ligados radialmente ao sistema através da LT 8-9. Isto corresponde a uma máquina equivalente aos geradores 6 e 7, conectada a uma barra infinita (restante do sistema), cuja margem de estabilidade vale sempre um.

Portanto, quando a LT 4-6 é aberta, nenhum dos critérios indica ao menos um gerador responsável pela perda de estabilidade do sistema.

A tabela 3.19 apresenta o comportamento dos ângulos dos geradores para a falta na barra 4, eliminada com a remoção da LT 4-6, para t_{cl} igual a 451 ms, obtidos pela simulação com o programa FORTRAN [17]. A figura 3.18 mostra a variação dos ângulos ao longo do tempo, para t_{cl} igual a 460 ms, utilizando o ANATEM [18].

Tabela 3.19 – Ângulos dos geradores para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para um tempo de eliminação da falta de 451 ms.

t(s)	δ_1 (graus)	δ_2 (graus)	δ_3 (graus)	δ_4 (graus)	δ_5 (graus)	δ_6 (graus)	δ_7 (graus)
0,0	2,71	-5,15	1,28	-1,39	1,78	-2,28	2,32
0,5	-3,09	-49,06	-16,85	88,39	76,12	-78,97	-73,36
1,00	32,35	62,40	57,67	54,92	29,87	-131,19	-124,08
1,50	57,95	122,44	118,68	42,08	-12,18	-170,29	-163,45
2,00	145,74	7,76	172,47	155,64	128,69	-360,65	-358,61

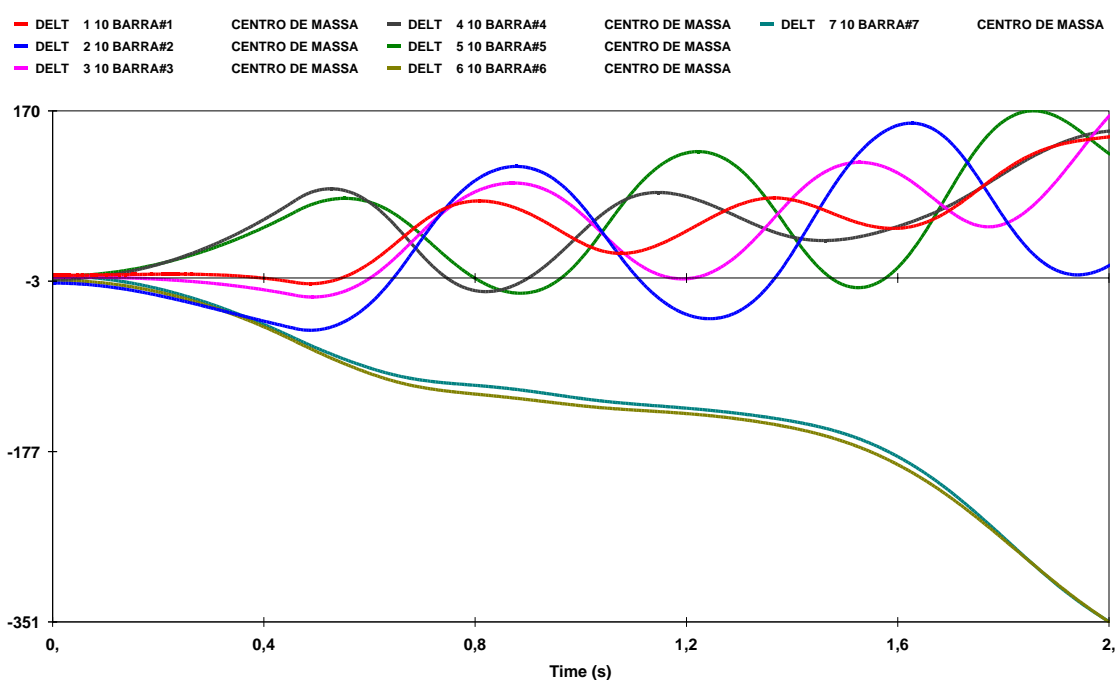


Figura 3.18 – Ângulos dos geradores, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, para um tempo de eliminação da falta de 460 ms.

Pela tabela 3.19, vemos que os ângulos dos geradores 6 e 7 ultrapassam 180 graus para um t_{cl} igual a 451 ms. Os demais geradores são estáveis na primeira oscilação. Apesar da diferença de 9 ms nos tempos críticos, os resultados obtidos utilizando o ANATEM[18] são análogos àqueles obtidos pelo cálculo da margem de estabilidade, como pode ser observado na figura 3.18.

Os geradores críticos para curtos-circuitos nas barras 5 e 6, eliminados sem a remoção de linha de transmissão, são apresentados na tabela 3.20. As

margens de estabilidade, para as faltas em questão, estão apresentadas nas tabelas 3.21 e 3.22, bem como nas figuras 3.19 e 3.20.

Tabela 3.20 – Grupo de geradores severamente perturbados para curtos-circuitos trifásicos nas barras 5 e 6, eliminados sem a remoção de linha de transmissão.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS		
Evento	CRITÉRIO	
	Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 5	5	2,4,5 e 6
Curto trifásico na barra 6	6	4,5,6

Tabela 3.21 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 2	ME 4	ME 5	ME 6
200	0,989	1,000	1,000	1,000
300	0,814	0,963	0,898	0,841
320	0,655	0,788	0,709	0,709
340	0,370	0,404	0,371	0,481
350	0,131	0,108	0,078	0,316
351	0,099	0,076	0,044	0,294
352	0,042	0,000	0,000	0,252

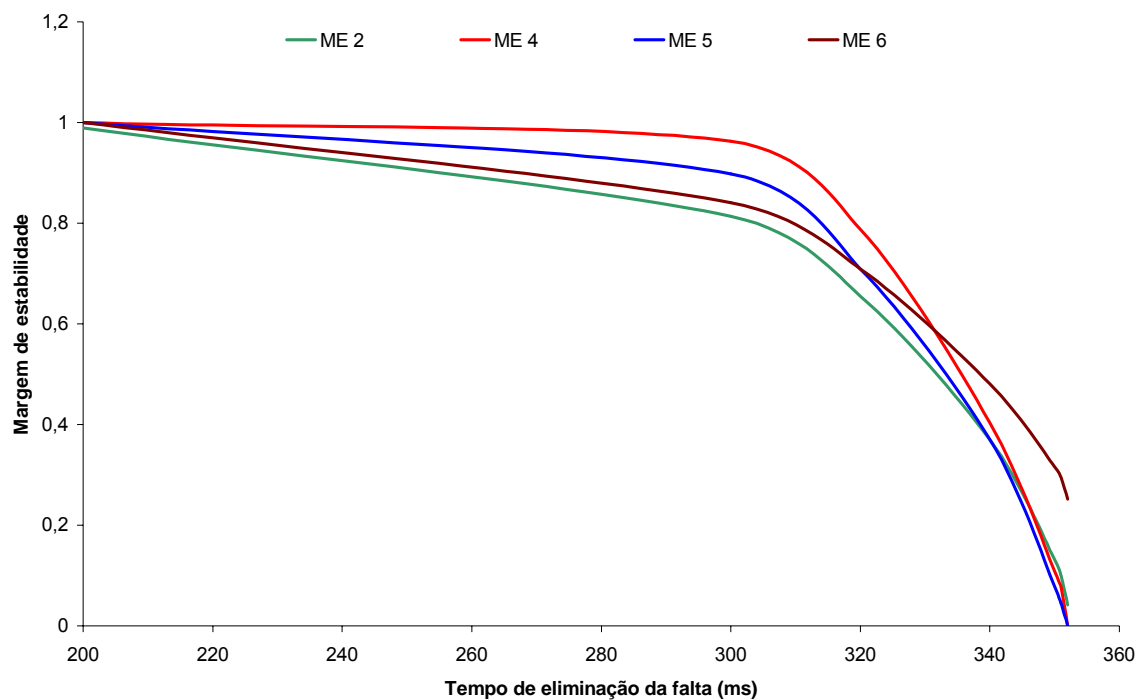


Figura 3.19 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.22 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{ci}(ms)$	ME 4	ME 5	ME 6
350	0,977	1,000	0,998
440	0,677	0,765	0,649
450	0,576	0,660	0,530
470	0,274	0,300	0,147
474	0,187	0,180	0,029
475	0,159	0,136	0,000

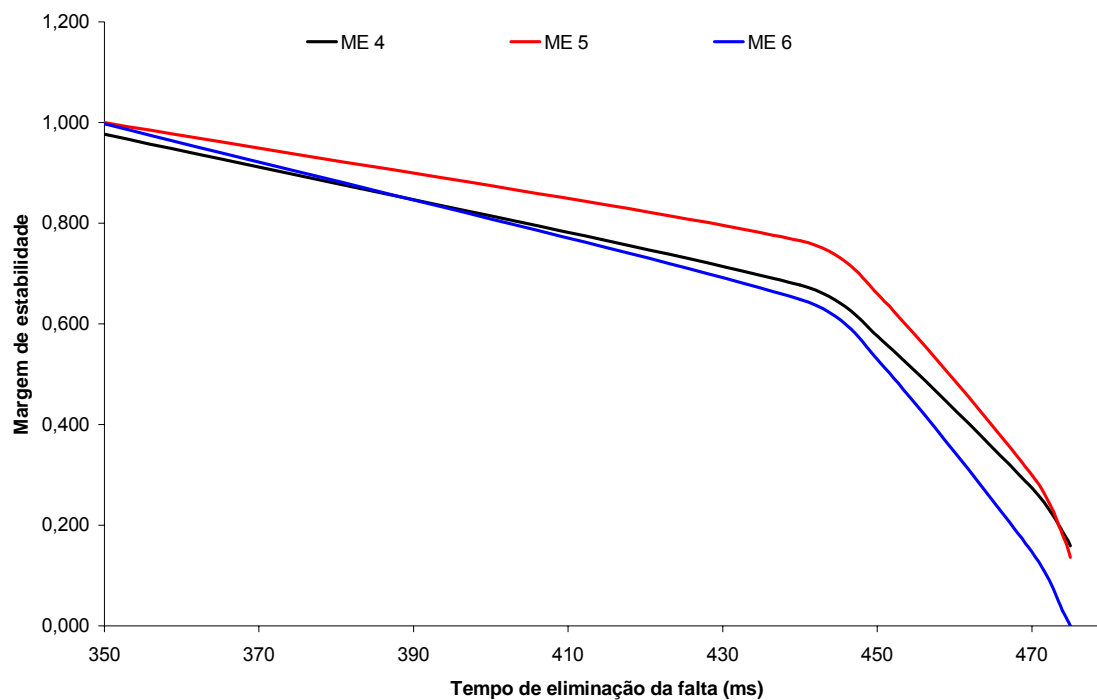


Figura 3.20 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Para o curto-circuito na barra 5, os ângulos dos geradores 4 e 5 não atingem um pico e ultrapassam os 180 graus, tendo suas margens nulas para um tempo de eliminação de falta de 352 ms. Assim sendo, os dois critérios que definem o grupo de máquinas críticas são eficazes, dado que a máquina 5 pertence ao grupo para ambos os critérios.

A figura 3.21 apresenta o comportamento dos ângulos dos geradores severamente perturbados, para um tempo de eliminação da falta de 354 ms, instante imediatamente posterior ao tempo crítico obtido com o ANATEM [18].

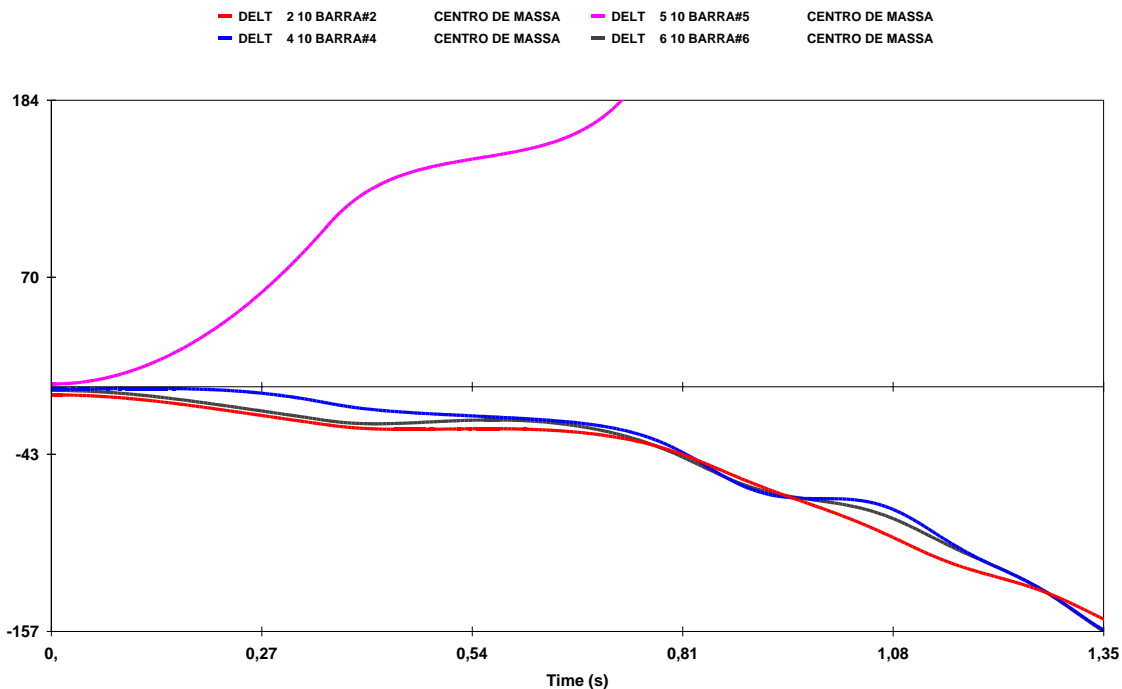


Figura 3.21 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 5, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 354 ms.

Considerando os resultados do ANATEM [18], vemos que em menos de um segundo a máquina 5 já perdeu a estabilidade, visto que seu ângulo ultrapassa 180 graus. No que se refere ao gerador 4, seu ângulo não atinge um pico, tampouco ultrapassa 180 graus. Sendo assim, nada podemos afirmar a respeito da estabilidade do gerador 4. Já os geradores 2 e 6 são estáveis na primeira oscilação.

Utilizando o programa FORTRAN [17], vimos que, para um t_{cl} imediatamente após o tempo crítico, o gerador 4 perde a estabilidade juntamente com o gerador 5. Tal fato não pôde ser comprovado no ANATEM [18] porque a simulação foi interrompida antes de dois segundos, dado que o ângulo do gerador 5 excede 1000 graus.

Para o curto-circuito na barra 6, a margem de estabilidade do sistema é determinada pelo gerador 6. Este gerador assume margem de estabilidade nula, perdendo a estabilidade para um tempo de eliminação da falta de 475 ms, enquanto que os geradores 4 e 5 permanecem estáveis.

O comportamento dos geradores é análogo quando simulamos através do ANATEM [18], isto é, apenas o gerador 6 é instável na primeira oscilação.

Porém, o tempo crítico obtido é de 484 ms, 9 ms maior que aquele obtido utilizando o método da margem de estabilidade nula.

Quanto ao critério de definição do grupo de geradores severamente perturbados, ambos os critérios satisfazem, uma vez que indicam o gerador responsável pela perda de estabilidade do sistema (gerador 6).

Simulou-se também o curto na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão. Como a máquina 7 está ligada radialmente ao sistema, ficando isolada caso a LT 7-8 venha a ser aberta, não se estudou essa falta com a remoção da referida LT. As tabelas 3.23 e 3.24, e a figura 3.22, apresentam o conjunto de máquinas severamente perturbadas e suas respectivas margens de estabilidade. A figura 3.23 apresenta os resultados do ANATEM [18].

Tabela 3.23 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS		
Evento	CRITÉRIO	
	Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 7	7	6,7

Tabela 3.24 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(\text{ms})$	ME 6	ME 7
200	0,988	0,995
300	0,739	0,821
320	0,513	0,525
330	0,335	0,316
340	0,122	0,044
341	0,100	0,008
342	0,074	0,000

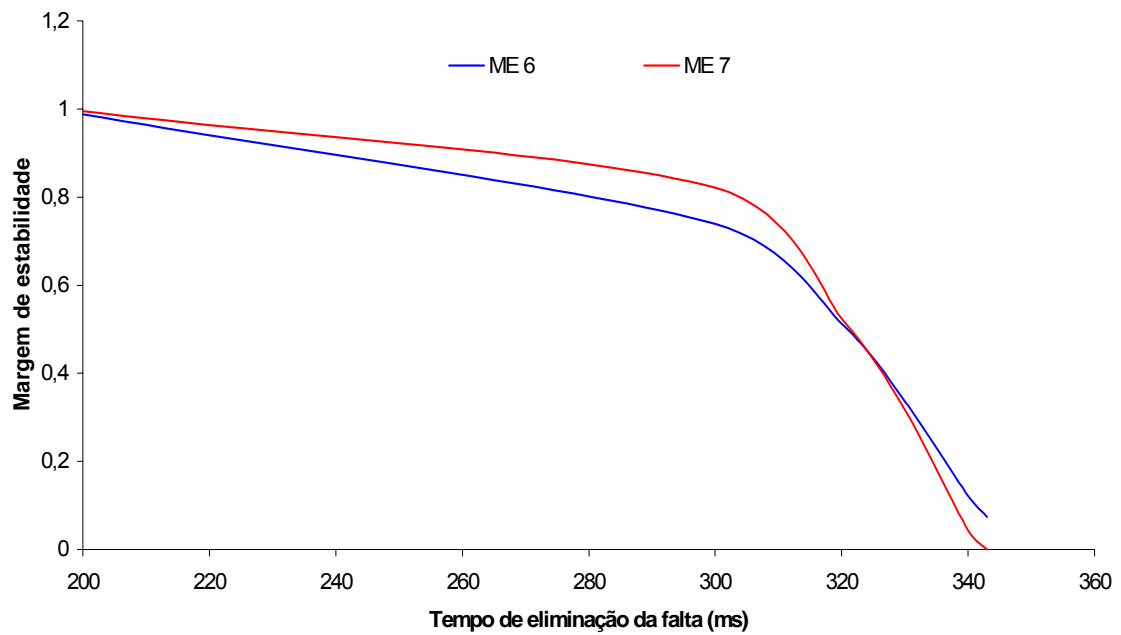


Figura 3.22 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

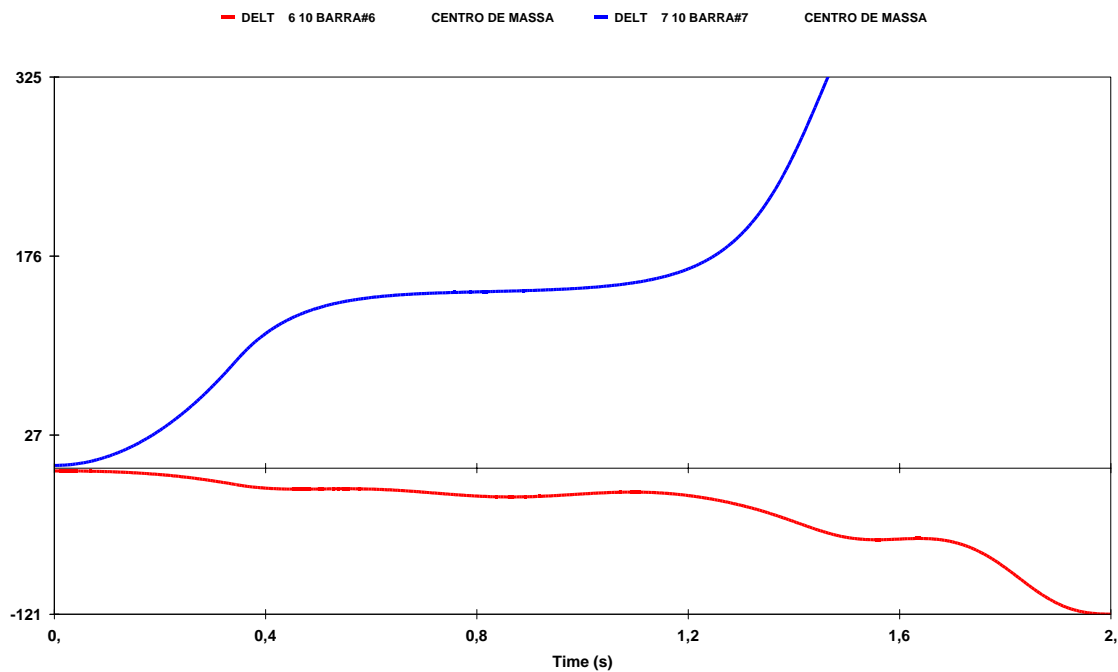


Figura 3.23 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 7, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 342 ms.

Para o curto na barra 7, o gerador 7 assume margem nula, perdendo a estabilidade, enquanto o gerador 6 permanece estável. Mais uma vez, os dois critérios satisfazem a condição do grupo de geradores severamente perturbados indicar o gerador responsável pela perda de estabilidade do sistema, no caso, o gerador 7.

Conforme observado na figura 3.22, para tempos de eliminação da falta de até 320 ms, o gerador 6 determina a margem de estabilidade do sistema. A partir daí, o gerador 7 passa a definir a margem do sistema, determinando um tempo crítico de 341 ms, exatamente igual ao resultado obtido com o ANATEM [18].

Estes resultados são comprovados quando observamos a figura 3.23, visto que a máquina 7 perde a estabilidade enquanto a máquina 6 mantém-se estável.

Para um curto-circuito na barra 8, as análises foram feitas considerando a eliminação da falta sem a remoção de linha de transmissão e com a remoção da LT 8-6. A tabela 3.25 apresenta o grupo de geradores severamente perturbados. As tabelas 3.26 e 3.27, e as figuras 3.24 e 3.25, apresentam as margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para as faltas em questão.

Tabela 3.25 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 8	-	7	6,7
	8-6	7	3,7

Tabela 3.26 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 6	ME 7
350	0,985	0,996
430	0,785	0,735
450	0,637	0,545
460	0,507	0,402
470	0,357	0,218
479	0,202	0,009
480	0,172	0,000

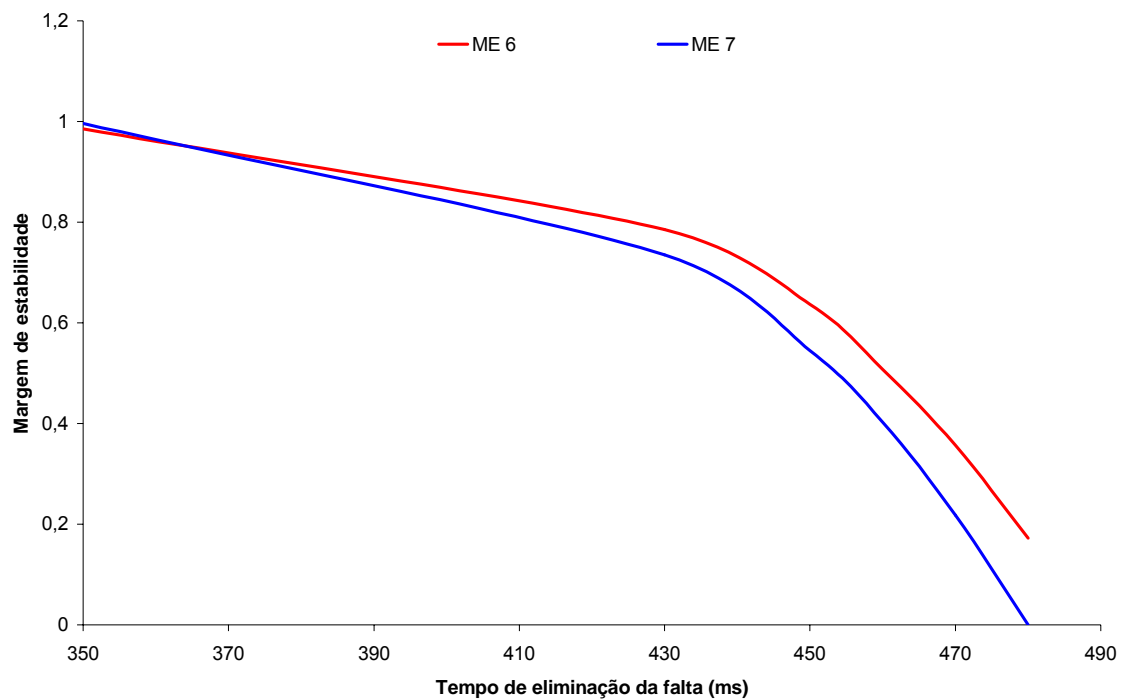


Figura 3.24 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.27 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado com a remoção da LT 8-6, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 3	ME 7
300	0,952	0,992
400	0,581	0,667
410	0,491	0,557
430	0,265	0,244
440	0,110	0,019
441	0,103	0,000

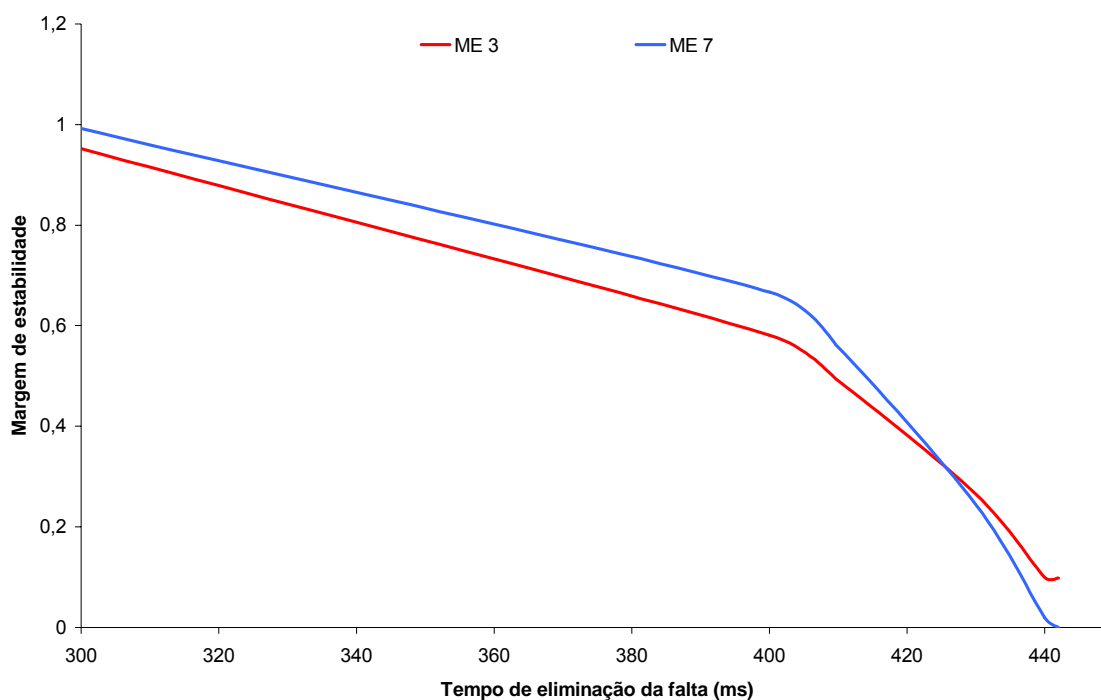


Figura 3.25 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 8, eliminado com a remoção da LT 8-6.

Para o critério que se baseia na aceleração em t_{cl}^+ , o grupo de geradores severamente perturbados se altera em função da remoção da LT 8-6, como pode ser observado na tabela 3.25. Para o critério com base na aceleração em t_0^+ , o conjunto é o mesmo, composto pelo gerador 7, para as faltas em questão.

Para o curto na barra 8, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, o gerador 7 perde a estabilidade para um tempo de eliminação da falta de 480 ms, enquanto o gerador 6 permanece estável .

Os resultados obtidos no ANATEM [18] são compatíveis, visto que apenas o gerador 7 perde a estabilidade para o tempo de eliminação da falta de 479 ms.

Quando a LT 8-6 é aberta na remoção do curto-circuito, a margem de estabilidade do gerador 7 assume valor nulo para um tempo de eliminação da falta de 441 ms. Este resultado é ratificado quando analisamos os resultados obtidos com o ANATEM [18], dado que o gerador 7 perde a estabilidade para t_{cl} igual a 442 ms. A remoção desta linha de transmissão fragiliza o sistema, deixando as máquinas 6 e 7 ligadas radialmente nas barras 4 e 9, respectivamente, reduzindo o tempo crítico de eliminação da falta.

Como o gerador 7 é o responsável pela perda de estabilidade do sistema, para as faltas em questão, e os dois critérios de definição do conjunto de geradores críticos a indicam, então ambos são eficazes.

A tabela 3.28 compara os tempos críticos obtidos pelo cálculo da margem de estabilidade nula, através do programa FORTRAN [17], com os resultados obtidos com o ANATEM [18], e aqueles apresentados nas referências [2,6,7]. Os resultados são muito próximos, na maioria dos casos.

Os tempos críticos das diversas contingências são organizados hierarquicamente, por nível de severidade da falta, da mais severa para a menos severa, considerando passos de integração de 1 ms e 5 ms.

Tabela 3.28 – Comparação entre os tempos críticos de eliminação de falta para diversas contingências.

TEMPOS CRITICOS (ms)						
ORDEM	BARRA EM CURTO	LT ABERTA	ANATEM (ms) $\Delta t = 1$ ms	Referências [2,6,7] (ms)	PROGRAMA FORTRAN	
					PASSO DE INTEGRAÇÃO	
					1ms	5ms
1	7	-	341	330-340	341	335
2	1	1 - 3	344	350-360	342	335
3	5	-	353	350-360	351	345
4	1	-	354	350-360	353	350
5	3	3 - 1	375	-	377	370
6	3	-	394	390-400	388	385
7	2	-	411	410-420	410	405
8	8	6 - 8	445	440-450	440	445
9	4	4 - 6	460	-	450	460
10	8	-	480	-	479	475
11	6	-	484	520-530	474	470
12	4	-	495	500-510	489	485

Conforme visto no capítulo 2, a margem de estabilidade é calculada pelo quadrado da razão entre a potência acelerante do gerador no instante em que o ângulo atinge o pico na primeira oscilação, e a maior potência acelerante verificada entre o instante de eliminação da falta e o instante do pico de ângulo. Se, ao invés de se calcular a margem de estabilidade pelo quadrado da razão entre essas potências acelerantes, for considerado o cálculo da margem de estabilidade pelo módulo da razão entre as mesmas, os resultados obtidos são exatamente iguais. Isto significa que, para a determinação do tempo crítico, ambas as formas de cálculo são eficazes.

3.2.3

Sistema New England

A figura 3.26 apresenta o sistema New England, com trinta e nove barras, dez geradores e quarenta e seis linhas de transmissão / transformadores. Os dados deste sistema estão apresentados no Apêndice 3.

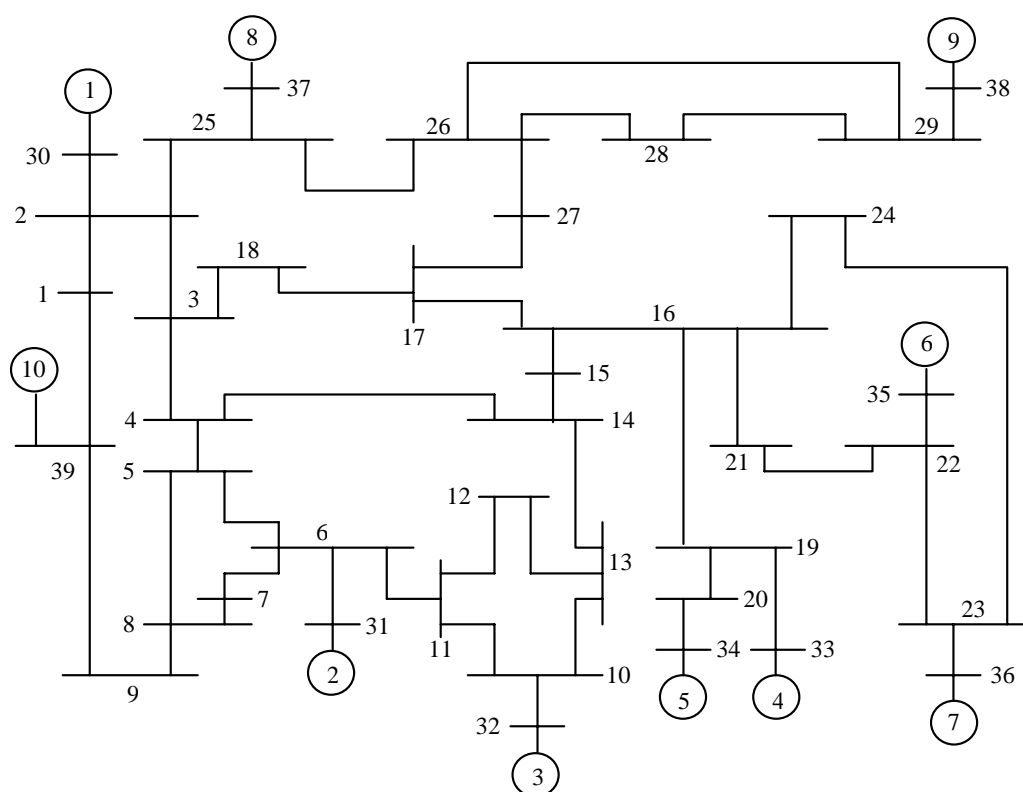


Figura 3.26 – Diagrama unifilar do sistema New England.

Foram simulados curtos-circuitos trifásicos sólidos em diversas barras do sistema, eliminados com e sem a remoção de linha de transmissão, utilizando um passo de integração de 5 ms.

Inicialmente aplicou-se um curto-circuito na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão. O conjunto de máquinas severamente perturbadas para a falta em questão, bem como a variação da margem de estabilidade em função do tempo de duração da falta, são apresentados nas tabelas 3.29 e 3.30 e na figura 3.27.

Tabela 3.29 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS		
Evento	CRITÉRIO	
	Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 6	2 e 3	1,2,3 e 5

Tabela 3.30 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{ci} (ms)	ME 1	ME 2	ME 3	ME 5
150	1,000	0,943	0,971	1,000
200	1,000	0,754	0,799	1,000
210	1,000	0,646	0,697	1,000
220	0,660	0,495	0,542	0,990
225	0,224	0,410	0,441	0,718
230	0,000	0,309	0,324	0,000

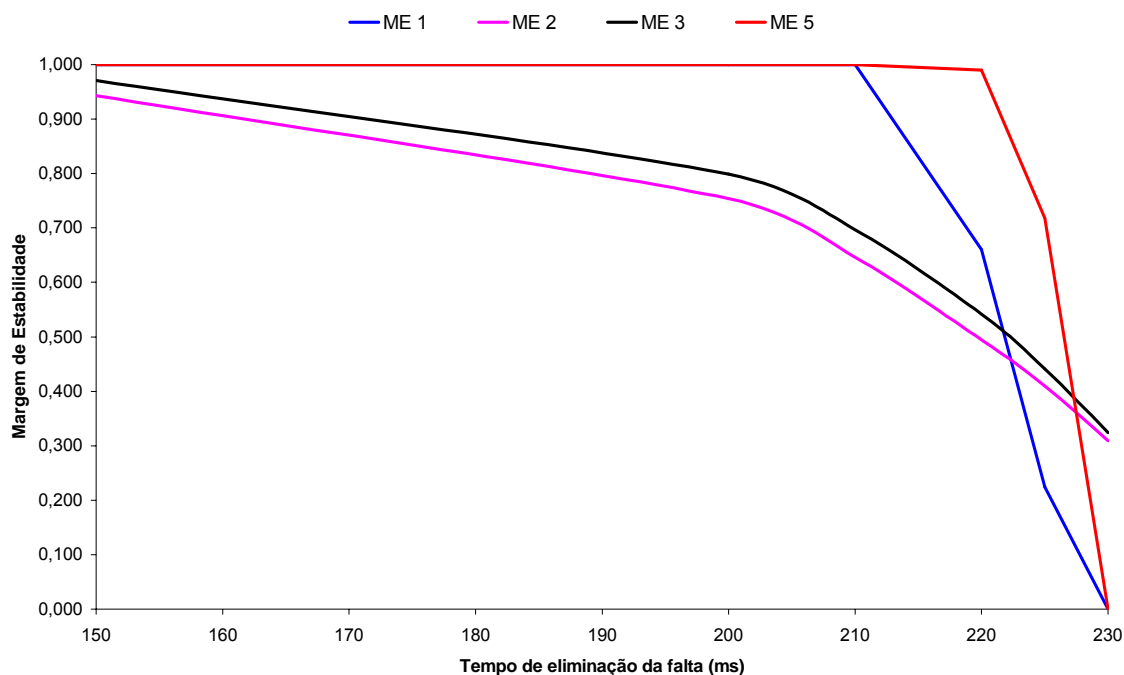


Figura 3.27 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Para o curto-circuito na barra 6, à exceção dos geradores 2 e 3, todos perdem a estabilidade, dentre eles os geradores 1 e 5. Estes, são indicados no conjunto de geradores severamente perturbados para o critério com base na aceleração em t_{cl}^+ .

O grupo de máquinas críticas com base na aceleração em t_0^+ , é constituído pelos geradores 2 e 3, que são estáveis na primeira oscilação. Portanto, para a falta em questão, o critério com base na aceleração em t_{cl}^+ é eficaz, ao passo que o critério com base na aceleração em t_0^+ falha na indicação. O problema nesse caso é que, se nenhuma das máquinas indicadas perde a estabilidade, o método não detecta a perda de estabilidade do sistema, embora outras máquinas sejam instáveis.

Para tempos de eliminação da falta de 220 ms, os geradores 2 e 3 apresentam as menores margens de estabilidade, conforme indicado na figura 3.27. A partir daí, os geradores 1 e 5 têm suas margens reduzidas abruptamente, assumindo o valor nulo para um t_{cl} de 230 ms, determinando um tempo crítico de 225 ms.

A figura 3.28 mostra os ângulos dos geradores severamente perturbados para a falta em questão, considerando um tempo de eliminação da falta de 235 ms, obtidos com o ANATEM [18].

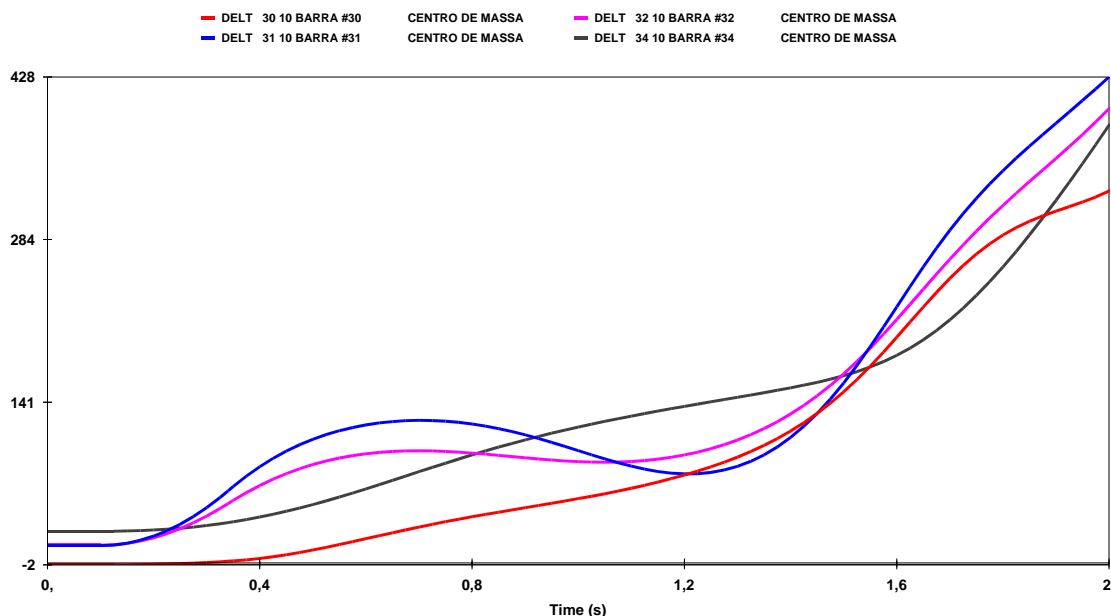


Figura 3.28 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 6, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 235 ms.

Como pode ser observado na figura 3.28, no que se refere à estabilidade, os resultados obtidos com o ANATEM [18] e com o programa FORTRAN [17] são idênticos. Ou seja, em relação à primeira oscilação, os geradores 1 e 5 são instáveis, enquanto que os geradores 2 e 3 são estáveis. Entretanto, a partir da segunda oscilação, os geradores 2 e 3 perdem a estabilidade, sendo acompanhados pelos geradores 1 e 5.

Os tempos críticos são ligeiramente diferentes uma vez que utilizando o programa FORTRAN [17] obteve-se 225 ms e utilizando o ANATEM [18] 230 ms.

A simulação de um curto-circuito na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11 tem seus resultados apresentados adiante. A tabela 3.31 apresenta o grupo de geradores severamente perturbados para a falta em questão, e a tabela 3.32 e a figura 3.29 apresentam as margens de estabilidade. As figuras 3.30 e 3.31 apresentam a variação dos ângulos dos geradores severamente perturbados para tempos de eliminação da falta de 240 ms e 245 ms, respectivamente, obtidos com o ANATEM [18].

Tabela 3.31 – Grupo de geradores severamente perturbados para o curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 10	10-11	2,3	1,2,3,5

Tabela 3.32 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 3	ME 5
100	1,000	0,901	0,981	1,000
150	1,000	0,881	0,965	1,000
200	0,997	0,71	0,858	1,000
220	0,495	0,55	0,676	1,000
225	0,205	0,479	0,611	1,000
230	0,000	0,425	0,533	0,697
235	0,000	0,350	0,444	0,000

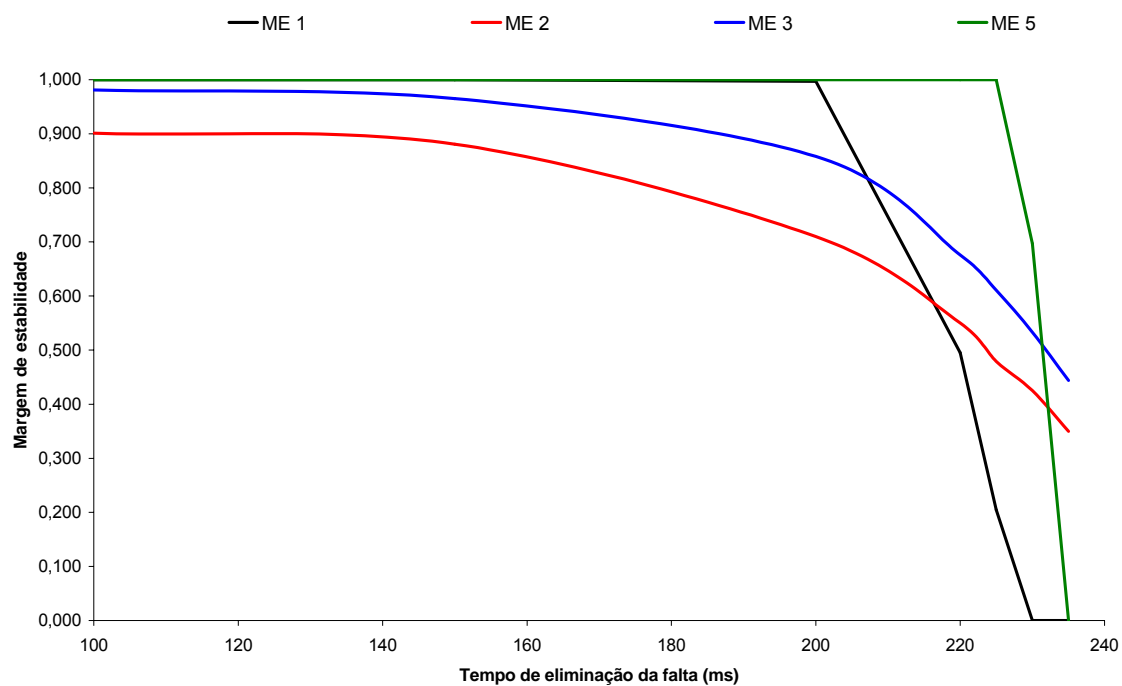


Figura 3.29 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11.

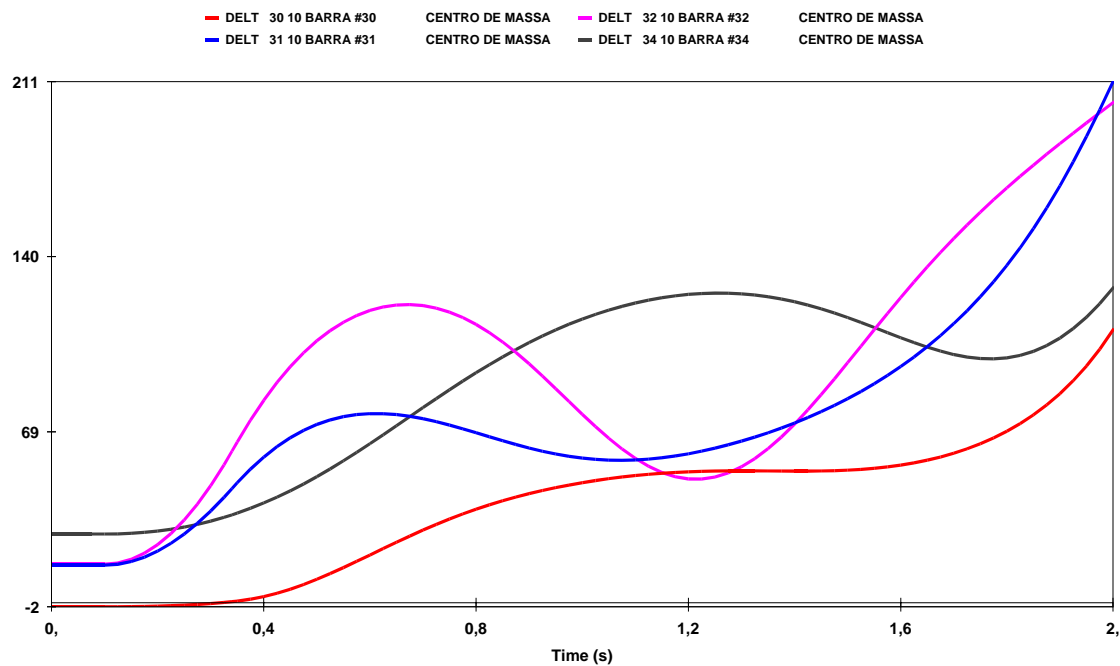


Figura 3.30 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para um tempo de eliminação da falta de 240 ms.

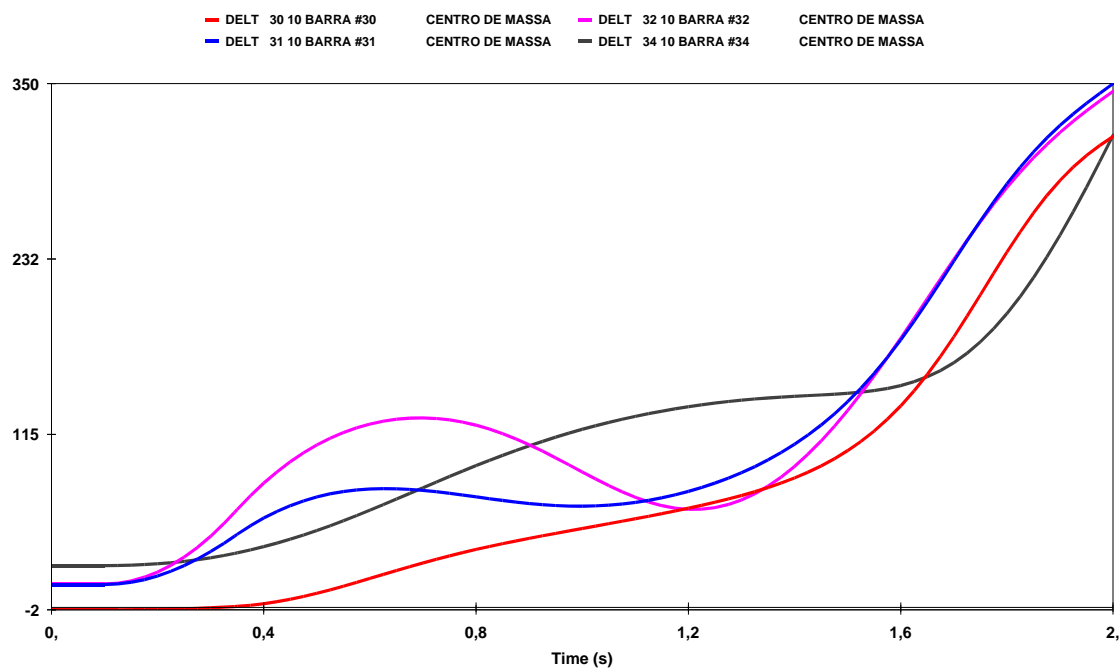


Figura 3.31 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 10, eliminado com a remoção da LT 10-11, para um tempo de eliminação da falta de 245 ms.

Vemos que pelo cálculo da margem de estabilidade os geradores 2 e 3 são estáveis na primeira oscilação, enquanto que o gerador 1, considerado severamente perturbado pelo critério que se baseia na aceleração em t_{cl}^+ , apresenta margem de estabilidade nula. Isto ocorre para um tempo de eliminação da falta de 230 ms. Se aumentarmos o tempo de eliminação da falta para 235 ms, a margem de estabilidade do gerador 5 também assume valor nulo, junto com o gerador 1. Portanto, o critério que se baseia na aceleração em t_0^+ falha, uma vez que indica apenas os geradores 2 e 3 como críticos.

Os resultados do ANATEM [18] mostram que, para um tempo de eliminação de falta de 240 ms, o ângulo do gerador 1 não atinge um pico e nem ultrapassa os 180 graus, enquanto que os geradores 2 e 3 são estáveis na primeira oscilação. Para um tempo de eliminação da falta de 245 ms, os geradores 1 e 5 perdem a estabilidade, mas os geradores 2 e 3 permanecem estáveis na primeira oscilação. Logo, o tempo crítico, de acordo com as simulações no ANATEM [18], é de 240 ms.

A tabela 3.33 apresenta o conjunto de máquinas severamente perturbadas, para os curtos-circuitos nas barras 19 e 20, eliminados sem a remoção de linha de transmissão. As tabelas 3.34 e 3.35, e as figuras 3.32 e 3.33, apresentam as margens de estabilidade para as faltas em questão.

Tabela 3.33 – Grupo de geradores severamente perturbados para os curtos-circuitos trifásicos nas barras 19 e 20, eliminados sem a remoção de linha de transmissão.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 19	-	4,5	1,4
Curto trifásico na barra 20	-	4,5	1,4,5

Tabela 3.34 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, e dos geradores que perdem a estabilidade, para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{ci}(ms)$	ME 1	ME 2	ME 3	ME 4	ME 5	ME 8	ME 9
100	0,998	1,000	1,000	0,791	1,000	1,000	1,000
150	0,936	1,000	1,000	0,745	1,000	1,000	1,000
170	0,750	1,000	1,000	0,678	1,000	1,000	1,000
180	0,471	1,000	0,867	0,629	0,896	0,950	1,000
185	0,282	1,000	0,550	0,614	0,750	0,641	0,783
190	0,099	0,000	0,000	0,574	0,589	0,000	0,000

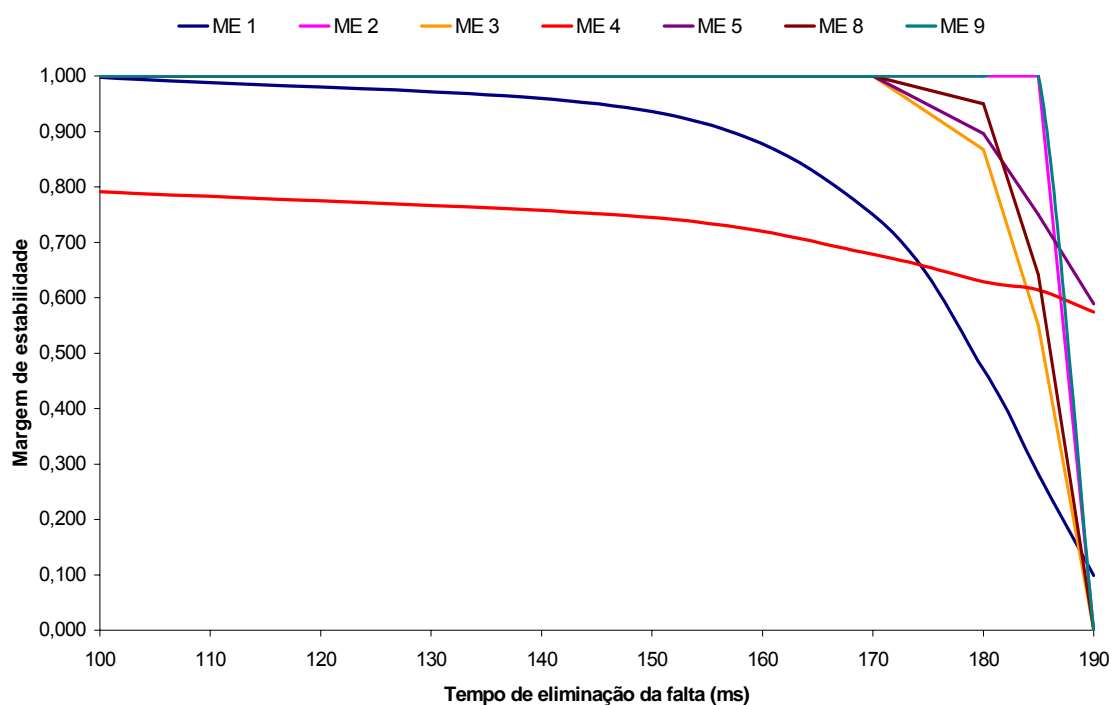


Figura 3.32 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados, e dos geradores que perdem a estabilidade, para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.35 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{ci} (ms)	ME 1	ME 4	ME 5
150	0,880	0,563	1,000
170	0,582	0,507	1,000
190	0,426	0,479	0,892
195	0,370	0,411	0,275
200	0,365	0,371	0,000

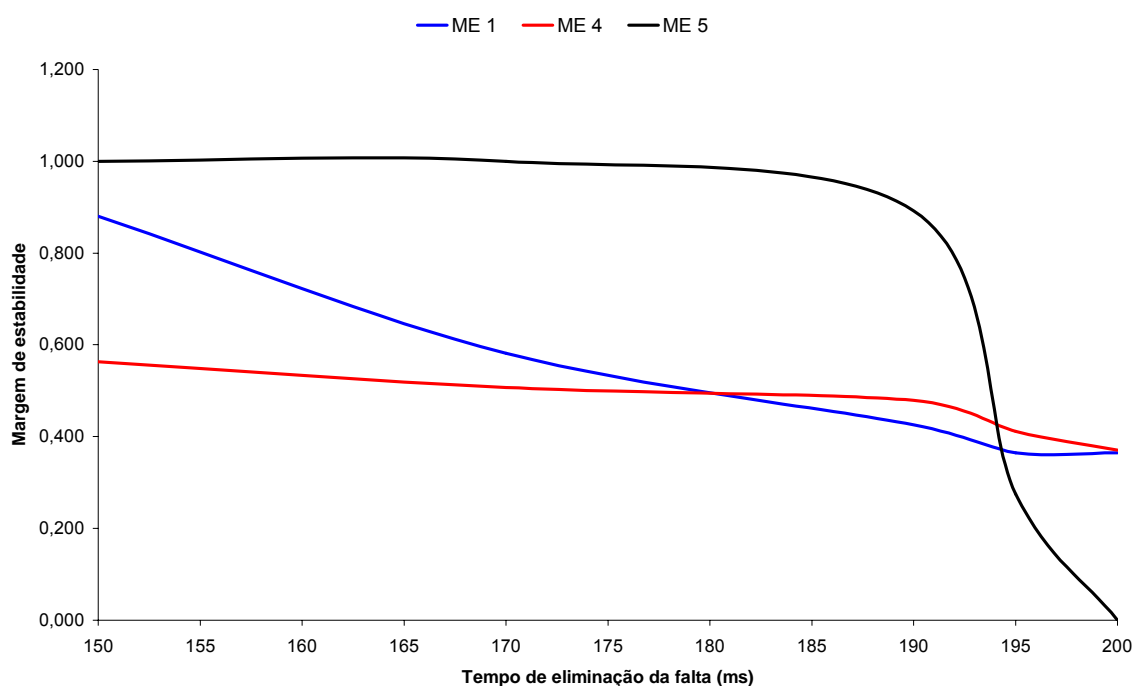


Figura 3.33 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Para o curto-circuito na barra 19, os geradores classificados como severamente perturbados, por ambos os critérios, não são responsáveis pela perda de estabilidade do sistema. Logo, neste caso, ambos os critérios falham por não indicar pelo menos um gerador crítico, responsável pela perda de estabilidade do sistema. No entanto, apesar do gerador 1 não apresentar margem nula no instante imediatamente após o tempo crítico, embora seja inferior a 0,1, este gerador perde a estabilidade, como podemos observar na figura 3.34.

Os geradores 1 e 4, considerados severamente perturbados pelo critério da aceleração em t_{cl}^+ , apresentam as menores margens para tempos de eliminação da falta de até 180 ms. A partir daí, os geradores 2,3,8 e 9 têm suas margens reduzidas abruptamente, assumindo simultaneamente o valor nulo para um tempo de eliminação da falta de 190 ms.

Para o curto na barra 20, apenas o gerador 5 perde a estabilidade. Este gerador é classificado como crítico por ambos os critérios, como pode ser observado na tabela 3.33. Portanto, neste caso, os critérios utilizados são eficazes.

Os geradores 1 e 4, também considerados severamente perturbados, apresentam as menores margens para tempos de eliminação da falta de 150 ms até 190 ms, conforme tabela 3.35. A partir daí, a margem de estabilidade do sistema é determinada pelo gerador 5, que atinge o valor nulo para t_{cl} igual a 200 ms.

As figuras 3.34 e 3.35 apresentam os resultados obtidos com o ANATEM [18], para as faltas em questão.

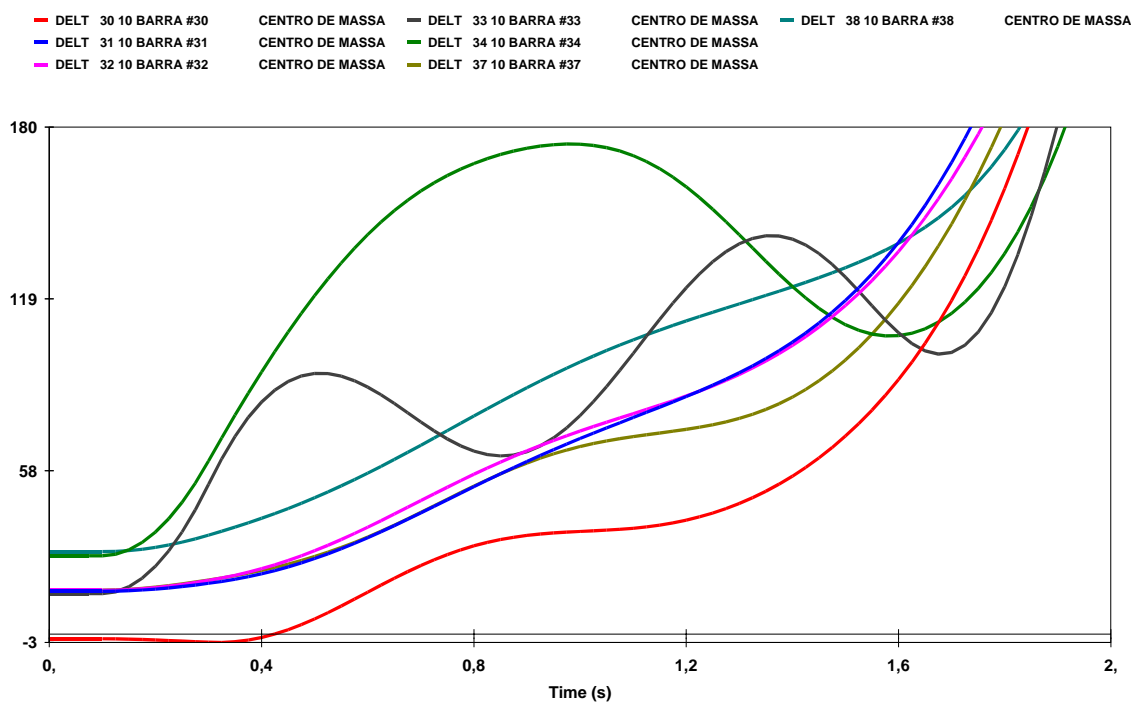


Figura 3.34 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, e dos geradores que perdem a estabilidade, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 19, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 200 ms.

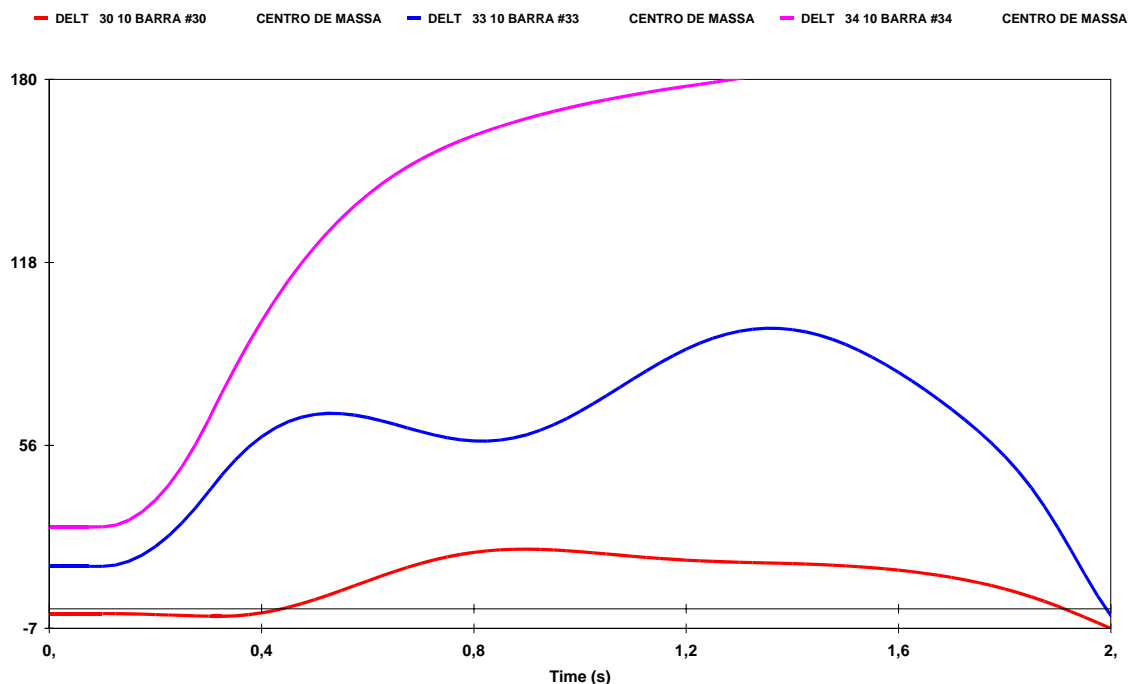


Figura 3.35 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 20, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 205 ms.

Para a falta na barra 19, os resultados do ANATEM[18] mostram que os geradores 4 e 5 são estáveis na primeira oscilação, enquanto que os geradores 1,2,3,8 e 9 perdem a estabilidade para um tempo de eliminação de falta de 200 ms. No que se refere à estabilidade, esses resultados estão de acordo com aqueles obtidos através da margem de estabilidade, exceto para o gerador 1. Porém, este gerador apresenta uma margem de estabilidade inferior a 0,1, portanto, prestes a perder o sincronismo com o sistema.

Para a falta na barra 20, os resultados são compatíveis, já que o gerador 5 perde a estabilidade, enquanto que o gerador 1 e o gerador 4 mantêm-se estáveis, como pode ser observado na figura 3.35.

Curtos-circuitos na barra 23, eliminados sem a remoção de linha de transmissão e com a remoção da LT 22-23, também foram simulados.

A tabela 3.36 apresenta o grupo de geradores críticos para as faltas em questão. Os grupos formados são idênticos, independentemente da LT 22-23 ser aberta ou não. As tabelas 3.37 e 3.38, e as figuras 3.36 e 3.37, apresentam as margens de estabilidade dos referidos geradores.

Tabela 3.36 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 23	-	6,7	1,6,7
	22-23	6,7	1,6,7

Tabela 3.37 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{cl} (ms)	ME 1	ME 6	ME 7
150	1,000	1,000	0,844
180	1,000	1,000	0,776
200	0,67	1,000	0,684
210	0,265	1,000	0,616
215	0,000	1,000	0,567

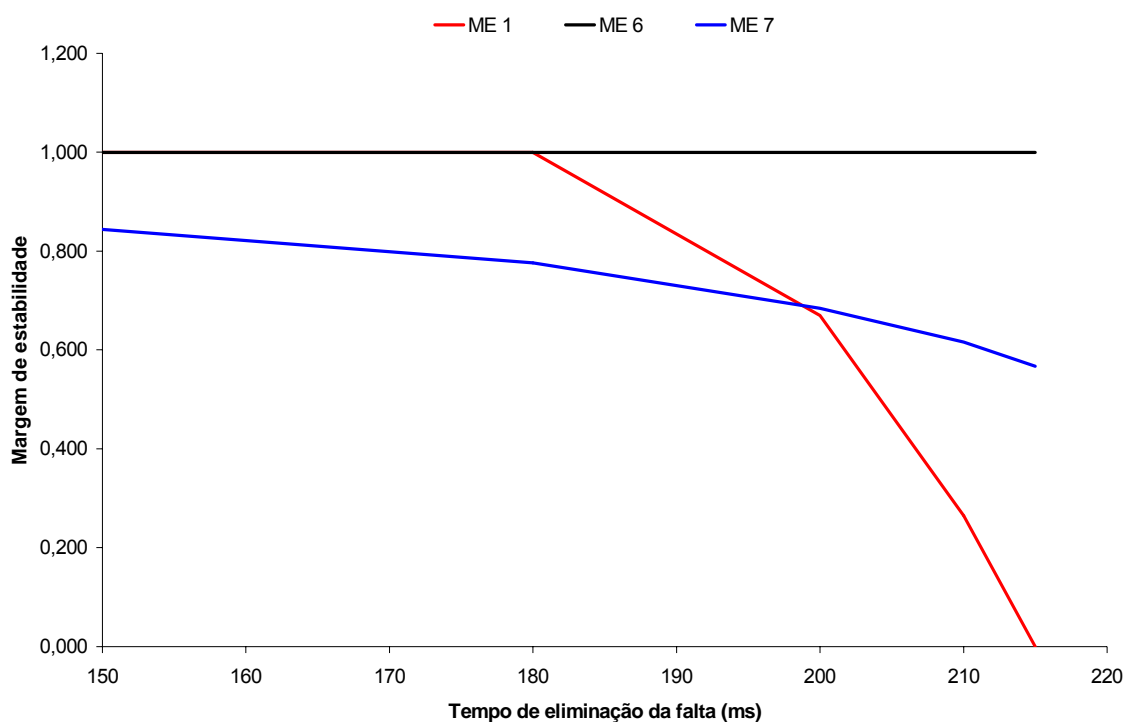


Figura 3.36 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.38 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 22-23, para diversos tempos de eliminação da falta.

t_{ci} (ms)	ME 1	ME 6	ME 7
150	1,000	0,816	0,927
180	1,000	0,695	0,838
190	0,677	0,635	0,756
200	0,305	0,546	0,640
205	0,144	0,476	0,567
210	0,000	0,426	0,487

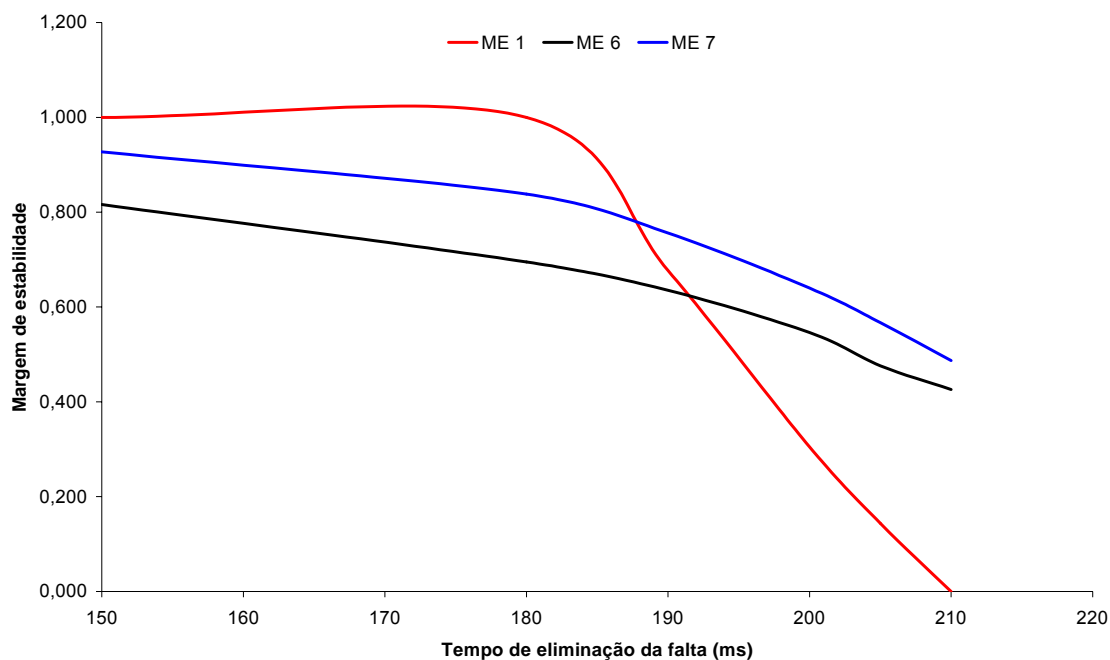


Figura 3.37 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 22-23.

Observando os resultados obtidos pela metodologia considerada [1], vemos que o gerador 1 é instável na primeira oscilação, enquanto os geradores 6 e 7 permanecem estáveis para as faltas em questão. Isto ocorre para tempos de eliminação da falta de 210ms (com a remoção da LT 23-22) e 215 ms (sem a remoção de LT).

Como pode ser observado na tabela 3.36, o gerador 1 é indicado apenas pelo critério com base na aceleração em t_{cl}^+ . Novamente este critério demonstra ser mais vantajoso em relação ao critério com base na aceleração em t_0^+ .

O gerador 6 é “muito estável” ($ME = 1$) para o caso em que a falta é eliminada sem a remoção da linha de transmissão. Porém, é bastante afetado pela remoção da LT 22-23, tendo sua margem de estabilidade reduzida para 0,426 no momento em que o gerador 1 assume margem nula. Observando a figura 3.26, vemos que isto se deve ao fato do gerador 6 ficar ligado radialmente quando a LT 23-22 é aberta. Portanto, os geradores 6 e 7, próximos do ponto de aplicação da falta, são estáveis na primeira oscilação, o que não ocorre com o gerador 1. As figuras 3.38 e 3.39 apresentam os resultados do ANATEM [18].

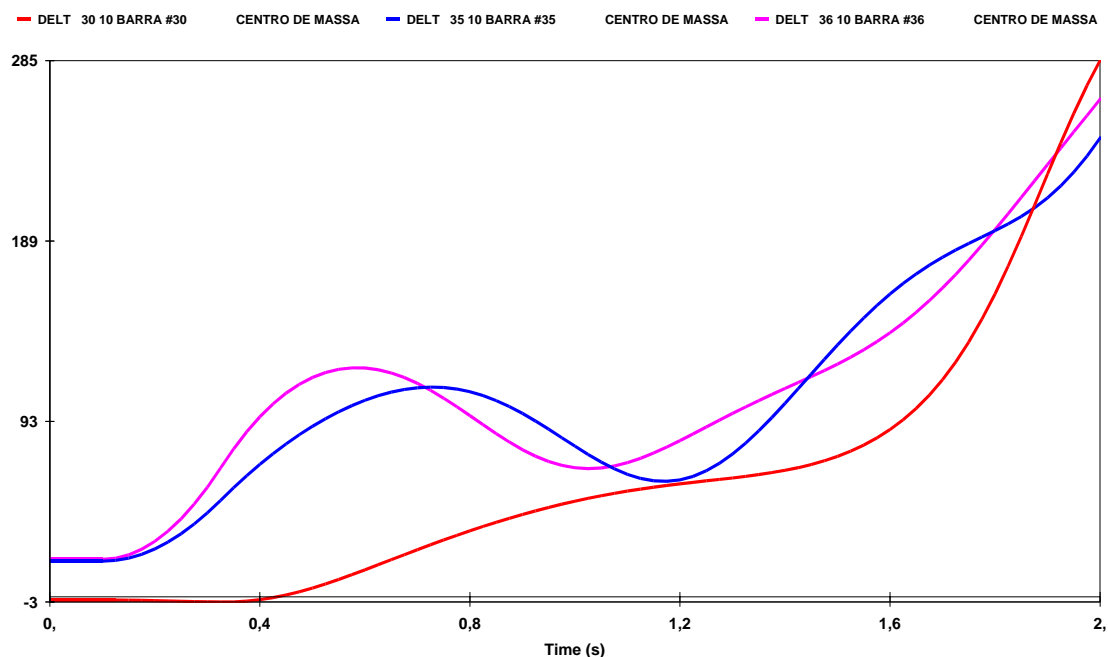


Figura 3.38 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 225 ms.

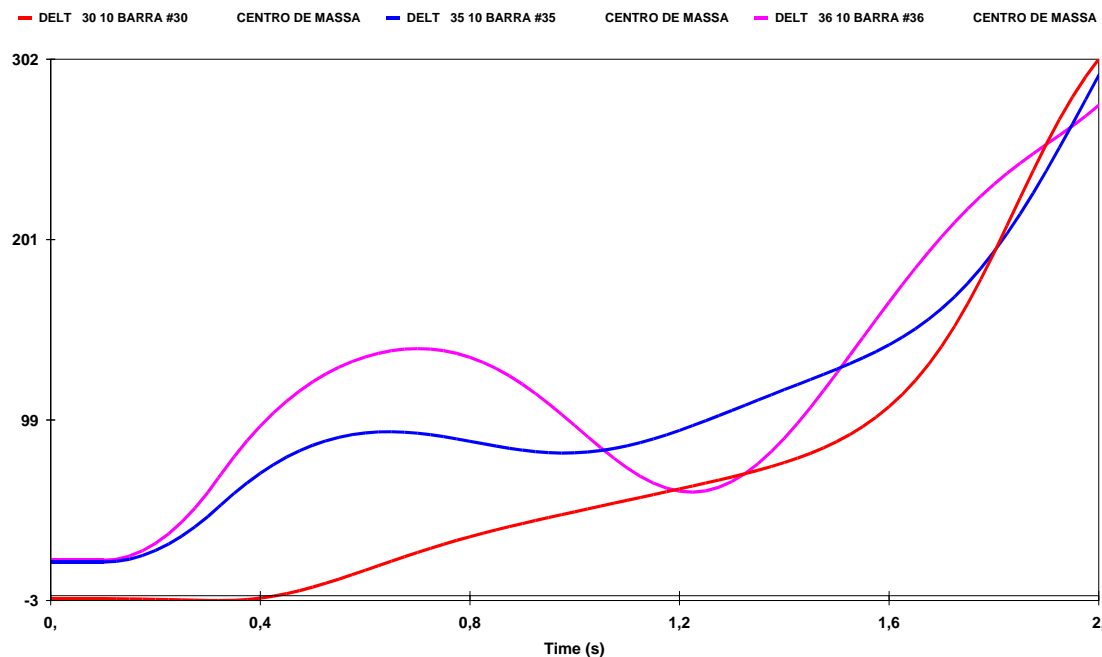


Figura 3.39 – Ângulos dos geradores severamente perturbados, obtidos com o ANATEM [18], para um curto-circuito trifásico na barra 23, eliminado com a remoção da LT 23-22, para um tempo de eliminação da falta de 220 ms.

Os tempos críticos obtidos utilizando o ANATEM [18] são 220 ms, quando a falta é eliminada sem a remoção de linha de transmissão, e 215 ms com a remoção da LT 23-22.

Apesar da diferença de 10 ms nos tempos críticos obtidos, os comportamentos dos geradores severamente perturbados são equivalentes, já que o gerador 1 é instável na primeira oscilação, e os geradores 6 e 7 são estáveis, conforme figuras 3.38 e 3.39.

Por fim, aplicou-se um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, e com a remoção da LT 29-28. A tabela 3.39 mostra o conjunto de geradores severamente perturbados. As tabelas 3.40 e 3.41, e as figuras 3.40 e 3.41, apresentam as margens de estabilidade dos geradores críticos.

Tabela 3.39 – Grupo de geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29.

GRUPO DE GERADORES SEVERAMENTE PERTURBADOS			
Evento	LT aberta	CRITÉRIO	
		Aceleração em t_0^+	Aceleração em t_{cl}^+
Curto trifásico na barra 29	-	9	1,9
	29-28	9	9

Tabela 3.40 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para diversos tempos de eliminação da falta.

$t_{cl}(ms)$	ME 1	ME 9
90	1,000	0,985
100	1,000	0,958
110	1,000	0,841
125	1,000	0,364
130	1,000	0,048
135	1,000	0,000

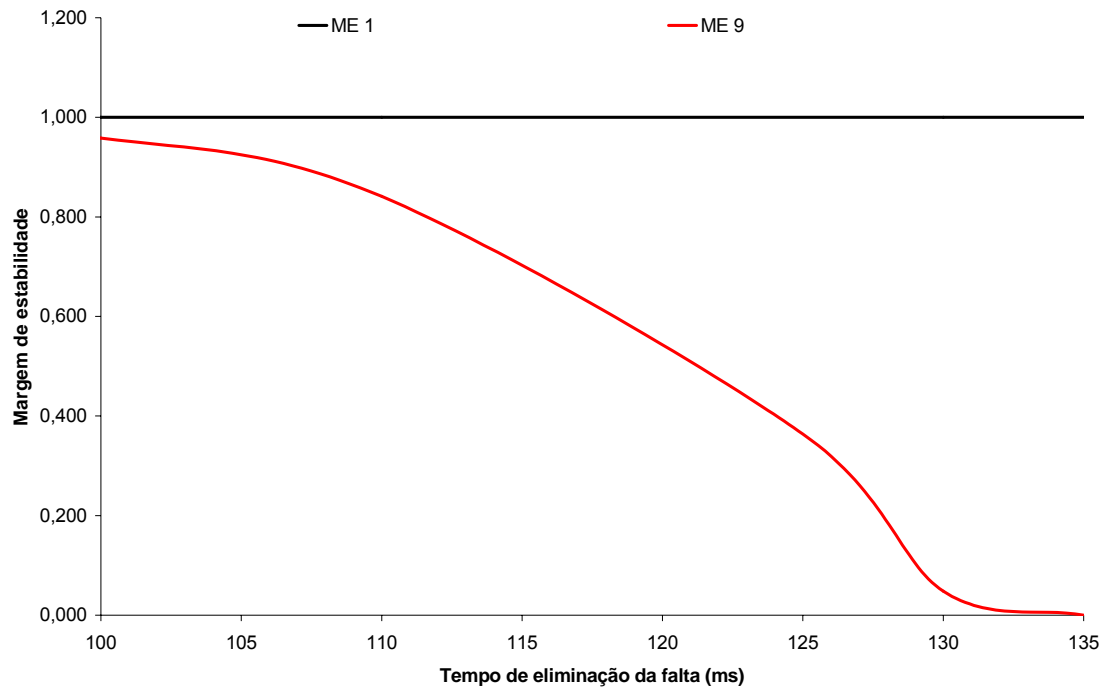


Figura 3.40 – Margens de estabilidade dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão.

Tabela 3.41 – Margens de estabilidade do gerador severamente perturbado para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28.

t_{ci} (ms)	ME 9
20	0,241
30	0,153
35	0,044
40	0,000

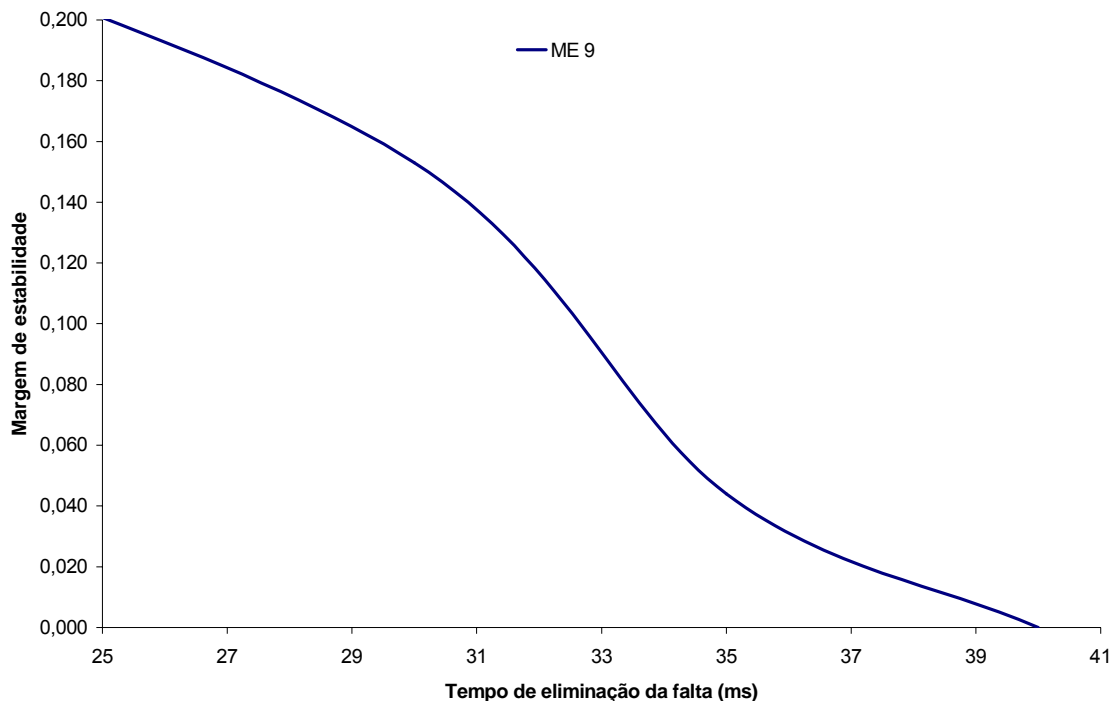


Figura 3.41 – Margem de estabilidade do gerador severamente perturbado para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28.

Para o curto-circuito na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, os geradores 1 e 9 são classificados como críticos pelo critério com base na aceleração em t_{cl}^+ . No entanto, o gerador 1 apresenta margem de estabilidade constante e igual a um, logo, “muito estável”. Já para o critério com base na aceleração em t_0^+ , apenas o gerador 9 é severamente perturbado.

Como o gerador 9, indicado pelos dois critérios, perde a estabilidade, então ambos são eficazes. Isto ocorre para um tempo de eliminação da falta de 135 ms.

Quando a falta na barra 29 é eliminada com a remoção da LT 29-28, apenas o gerador 9 é classificado como crítico, não havendo diferenças no grupo de geradores severamente perturbados em função do critério utilizado. Logo, ambos os critérios indicam a máquina responsável pela perda de estabilidade do sistema, que ocorre para um tempo de eliminação de falta de 40 ms.

Destaca-se a influência da remoção da LT, para a falta em questão, no tempo crítico, que passa de 130 ms (sem a remoção de LT) para 35 ms (com a remoção da LT 29-28).

Utilizando o ANATEM [18], obtemos tempos críticos de 130 ms (sem a remoção de LT), e 45 ms (com a remoção da LT 29-28). As figuras 3.42 e 3.43 apresentam os ângulos dos geradores severamente perturbados, para tempos de eliminação de falta imediatamente superiores ao tempo crítico, obtidos com o ANATEM [18].

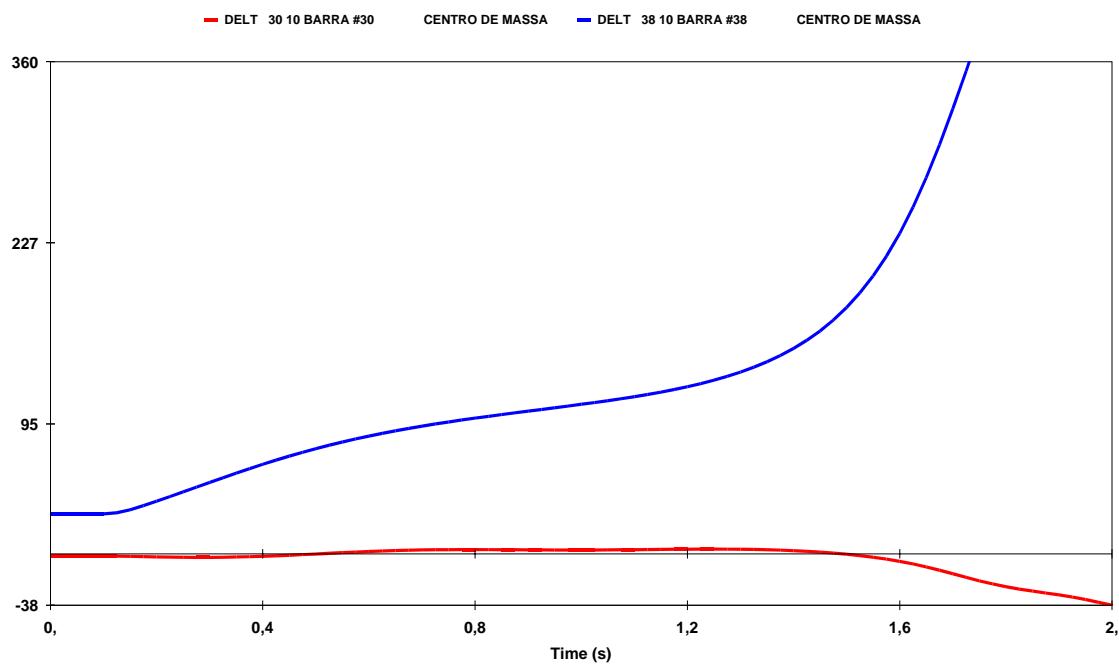


Figura 3.42 – Ângulos dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado sem a remoção de linha de transmissão, para um tempo de eliminação da falta de 135 ms, obtidos com o ANATEM [18].

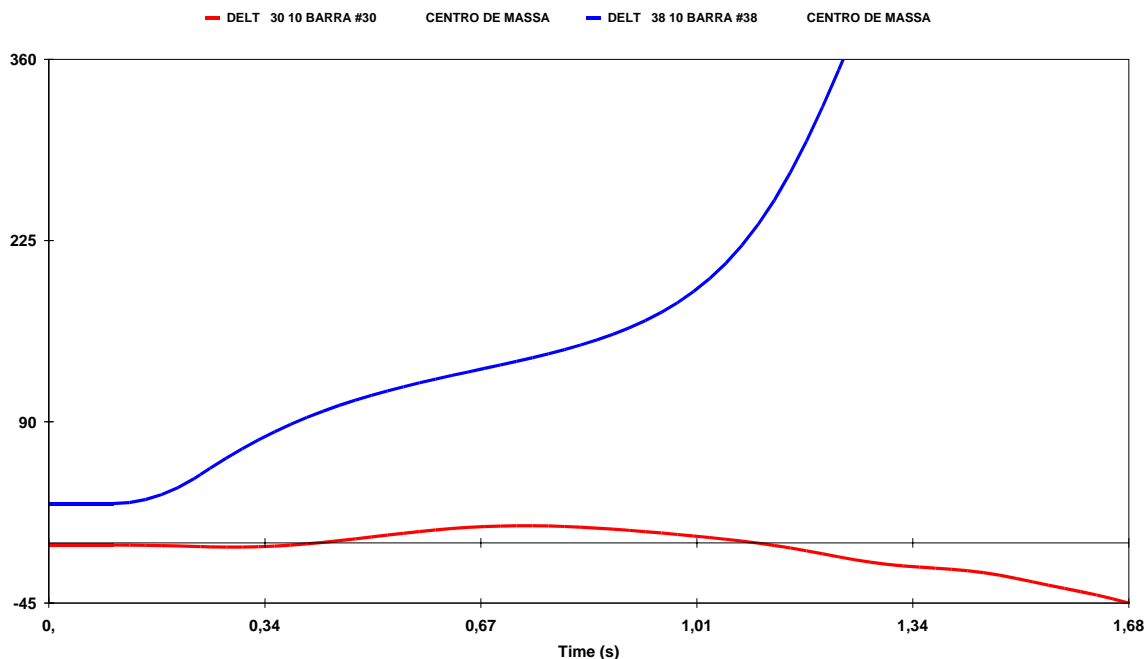


Figura 3.43 – Ângulo dos geradores severamente perturbados para um curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado com a remoção da LT 29-28, para um tempo de eliminação da falta de 50 ms, obtidos com o ANATEM [18].

De acordo com as figuras 3.42 e 3.43, vemos que o gerador 9 perde a estabilidade, enquanto o gerador 1 permanece estável. Estes resultados são análogos àqueles obtidos através do cálculo da margem de estabilidade.

Para o sistema New England, foram simuladas diversas faltas através do programa desenvolvido em FORTRAN [17], com base na metodologia considerada [1], para a determinação dos tempos críticos de eliminação da falta. Comparou-se os resultados obtidos com os resultados do ANATEM [18].

A tabela 3.42 apresenta os tempos críticos para diversas contingências, organizados hierarquicamente por nível de severidade da falta, da mais severa para a menos severa. Os tempos críticos foram calculados pelo programa em FORTRAN [17], considerando passos de integração de 1ms e 5 ms.

Tabela 3.42 – Comparação entre os tempos críticos de eliminação de falta para diversas contingências.

TEMPOS CRITICOS (ms)					
ORDEM	BARRA EM CURTO	LT ABERTA	ANATEM (ms) $\Delta t = 5$ ms	PROGRAMA FORTRAN	
				PASSO DE INTEGRAÇÃO	
				1 ms	5 ms
1	29	29-28	45	41	35
2	29	-	130	130	130
3	19	-	195	193	185
4	20	-	200	203	195
5	23	23-22	215	212	205
6	23	-	220	217	210
7	6	-	230	229	225
8	10	10-11	240	234	225

3.3

Conclusões

A metodologia considerada [1] demonstrou ser eficaz para a determinação dos tempos críticos, permitindo uma boa estimativa dos mesmos. Uma comparação com os resultados do ANATEM [18] demonstrou tal fato. Ressalta-se que, em geral, os resultados obtidos pelo cálculo da margem de estabilidade se mostraram mais conservativos (tempos críticos calculados menores que os verdadeiros).

Para o sistema CIGRÉ [2], os dois critérios de definição do conjunto de geradores severamente perturbados indicaram a máquina responsável pela perda de estabilidade do sistema para todos os casos, embora o grupo acima citado seja mais numeroso quando se considera a aceleração imediatamente após a eliminação da falta (t_{cl}^+). Houve uma exceção, a falta na barra 4. Para o curto-circuito na barra 4, eliminado com a remoção da LT 4-6, nenhum dos critérios utilizados indicou a máquina responsável pela perda de estabilidade do sistema, no caso os geradores 6 e 7. Para este mesmo curto-circuito, sem a remoção de

linha de transmissão, apenas o critério que considera a aceleração em t_{cl}^+ foi eficaz, isto é, indicou o gerador que perde a estabilidade.

Para o sistema New England, o critério com base na aceleração em t_{cl}^+ se mostrou mais vantajoso que o critério com base na aceleração imediatamente após o instante em que a falta é aplicada (t_0^+). Para o critério com base em t_{cl}^+ , o gerador cuja margem de estabilidade assume valor nulo e, portanto, determina o tempo crítico, é indicado no conjunto de geradores severamente perturbados para todos os casos apresentados, exceto para um curto-circuito na barra 19, sem a remoção de linha de transmissão. Para o critério com base em t_0^+ , em diversas situações o grupo de geradores críticos não indicou a máquina responsável pela perda da estabilidade do sistema.

De um modo geral, as máquinas que apresentaram margem de estabilidade nula perdem a estabilidade, como foi verificado no ANATEM [18].

A utilização de um passo de integração de 5 ms nos fornece resultados mais conservativos do que a utilização de um passo de integração de 1 ms.

Para o cálculo da margem de estabilidade, a utilização do módulo da razão entre a potência acelerante do gerador no instante em que o ângulo atinge o pico na primeira oscilação, e a maior potência acelerante verificada entre o instante de eliminação da falta e o instante do pico de ângulo, apresentou resultados similares aos obtidos considerando o quadrado da mesma razão de potências.