



Tabela 6.1 – Dados dos circuitos CA do sistema-teste de 10 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)
5	6	1	0,00	0,40	0,0
6	7	1	0,15	2,88	234,6
6	7	2	0,15	2,88	234,6
6	7	3	0,15	2,88	234,6
6	7	4	0,15	2,88	234,6
6	7	5	0,15	2,88	234,6
9	10	1	0,10	0,30	0,0

Tabela 6.2 – Dados dos transformadores do sistema-teste de 10 barras

Barra DE	Barra PARA	Nº do circuito	Resistência (%)	Reatância (%)
1	5	1	0,00	0,20
2	6	1	0,00	0,45
3	7	1	0,00	1,25
8	7	1	0,00	0,30
9	7	1	0,00	0,26
10	11	1	0,00	0,10

## 6.2

### Controle de Tensão por LTC Automático

Conforme mencionado, o objetivo é manter a tensão da barra controlada pelo transformador no valor desejado através da variação do tape do transformador designado para efetuar este controle, sem que haja intervenção do operador. O transformador entre as barras 10 e 11 controlará a tensão na barra 11. A modelagem de carga para estas simulações é  $35\%Z^{cte}$ ,  $35\%I^{cte}$  e  $30\%P^{cte}$ . A escolha da modelagem da carga visa convergência das simulações dinâmicas com a maior parcela possível de carga “potência constante”.

## 6.3

### Análise em Regime Permanente

A análise em regime permanente serve para verificar a região de operação na qual se encontram os pontos testados e ainda fornecer o ponto de operação inicial para a análise dinâmica.

### 6.3.1 Região Normal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.3. Na Tabela 6.4 estão detalhadas as posições iniciais dos tapes que, com exceção do transformador entre as barras 10 e 11, não sofrem alterações durante a simulação. Na Tabela 6.5 está mostrada a variação da tensão na barra 10 e do tape do transformador citado anteriormente quando da variação da tensão de referência da barra 11. Na Figura 6.2 apresenta-se graficamente os valores da Tabela 6.5.

As cargas ativa e reativa, mostradas nas colunas 6 e 7 da Tabela 6.3, são referidas às tensões apresentadas na coluna 2.

Tabela 6.3 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,980	0,0	3781,0	899,8	0,0	0,0
2	0,964	-7,2	1736,0	324,9	0,0	0,0
3	0,955	-20,0	1154,0	166,1	0,0	0,0
5	1,092	-3,6	0,0	0,0	0,0	0,0
6	1,077	-11,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	1,048	-27,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,928	-32,0	0,0	0,0	3032,0	940,7
9	0,967	-32,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,886	-38,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,003	-40,0	0,0	0,0	3395,0	974,1

Tabela 6.4 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,902
8	7	0,900
9	7	0,926
10	11	0,875

Tabela 6.5 – Resultado da variação da tensão controlada (barra 11) e tape do transformador entre as barras 10 e 11

Ponto de Operação	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,795	1,100	0,716

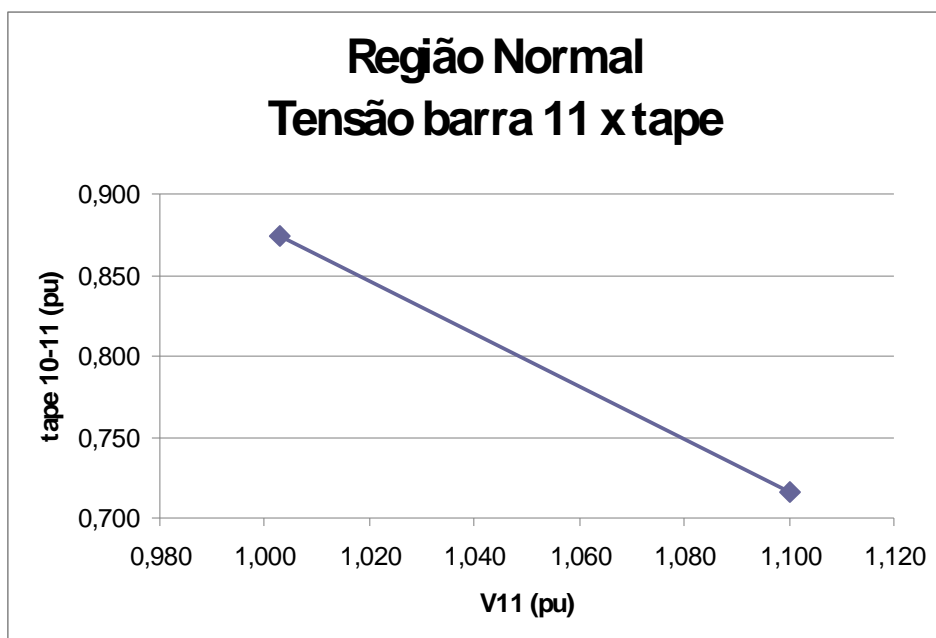


Figura 6.2 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

Como pode ser observado, as variações da tensão da barra 11 e do tape do transformador ocorrem em sentido inverso, que é o esperado. Diz-se que o ponto de operação está na região normal de operação. Assim, para que a tensão da barra 11 seja reduzida, o tape do transformador deve aumentar.

### 6.3.2 Região Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.6 com as posições iniciais dos tapes conforme Tabela 6.7. Na Tabela 6.8 está mostrada a variação da tensão na barra 10 e do tape quando da variação da tensão de referência da barra 11. Na Figura 6.3 mostra-se graficamente os valores da Tabela 6.8.

Assim como na seção 6.3.1, as cargas ativa e reativa, mostradas nas colunas 6 e 7 da Tabela 6.6, são referidas às tensões apresentadas na coluna 2.

Tabela 6.6 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,822	0,0	1749,0	2801,0	0,0	0,0
2	0,714	-1,2	1736,0	1019,0	0,0	0,0
3	0,692	-27,0	450,2	744,1	0,0	0,0
5	0,869	-2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,756	-8,6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,564	-35,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,478	-46,0	0,0	0,0	1829,0	563,4
9	0,564	-45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,472	-56,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,453	-61,0	0,0	0,0	1822,0	522,4

Tabela 6.7 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,999
8	7	0,900
9	7	1,080
10	11	1,013

Tabela 6.8 – Resultado da variação do módulo da tensão controlada (barra 11), da tensão na barra 10 e do tape do transformador entre as barras 10 e 11

Ponto de Operação	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$	tape
1	0,472	0,453	1,013
2	0,499	0,460	1,054

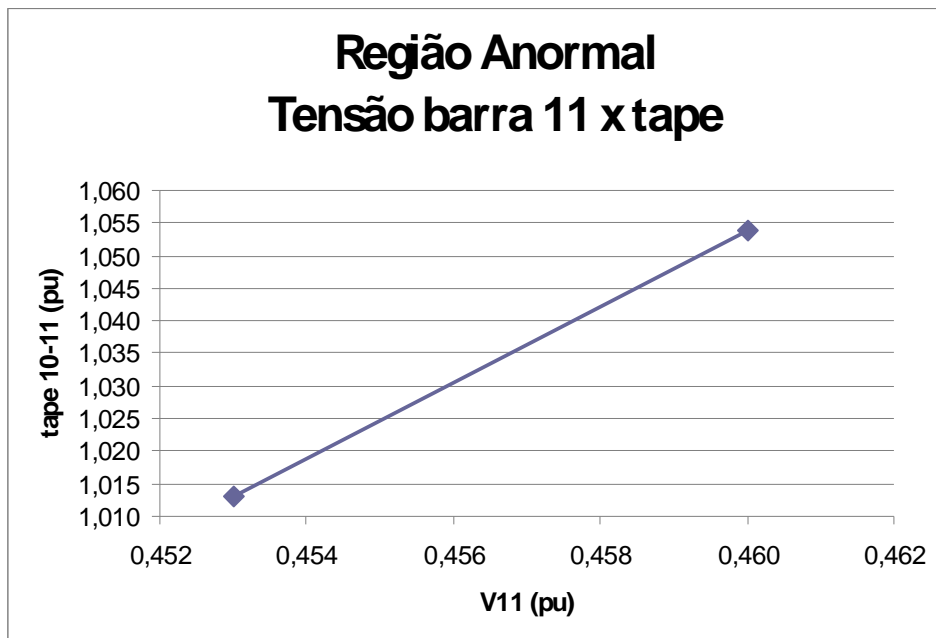


Figura 6.3 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

## 6.4

### Análise no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo serve para observação contínua do comportamento do sistema, partindo de um ponto da simulação estática, cuja região de operação é conhecida. Espera-se que os resultados encontrados sejam equivalentes nas duas análises.

#### 6.4.1

### Região Normal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.3 e a perturbação é a mesma da Tabela 6.5, ou seja, alteração na tensão de referência da barra 11, aplicada em 2 s. Os tapes do LTC tem variação contínua, sem limites inferior e superior e sem retardo entre operações. Os resultados estão mostrados na Figura 6.4 e na Tabela 6.9

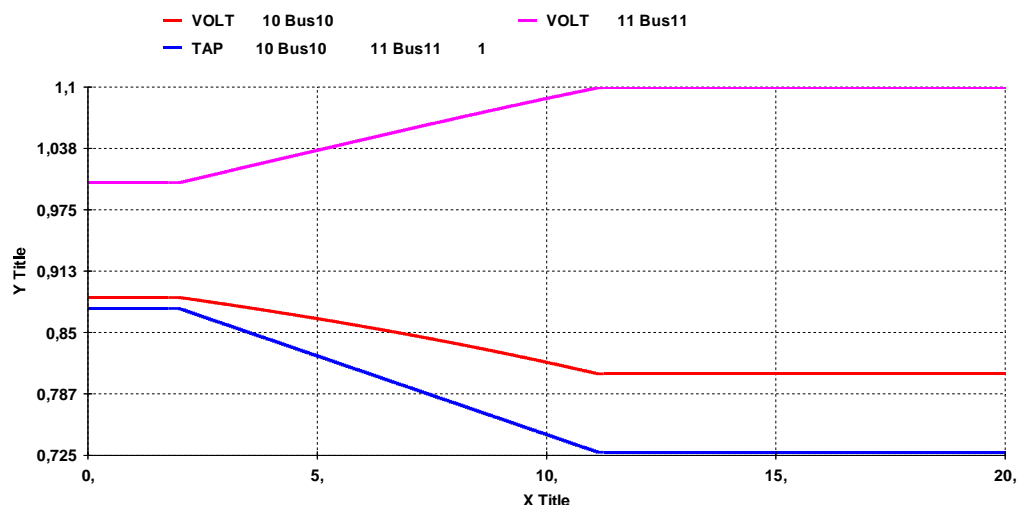


Figura 6.4 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tap contínuo e ilimitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

Tabela 6.9 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo

Ponto de Operação	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,808	1,099	0,728

Nesta simulação, pode ser observado que os sentidos da variação da tensão da barra 10 e do tap são os mesmos e opostos ao sentido da variação da tensão na barra 11, efeito esperado para um sistema na região normal de operação. Quantitativamente os resultados são bem próximos aos da simulação estática, quando comparando a Tabela 6.9 com a Tabela 6.5.

Ao inserir limites mínimo (0,75 pu) e máximo (1,20 pu) na atuação do LTC e repetir a simulação anterior, o LTC age para elevar a tensão na barra 11, porém ao chegar ao seu limite inferior, sua atuação cessa. Desta forma, não é alcançado o valor desejado na tensão controlada na barra 11, conforme pode ser observado na Figura 6.5 e na Tabela 6.10.

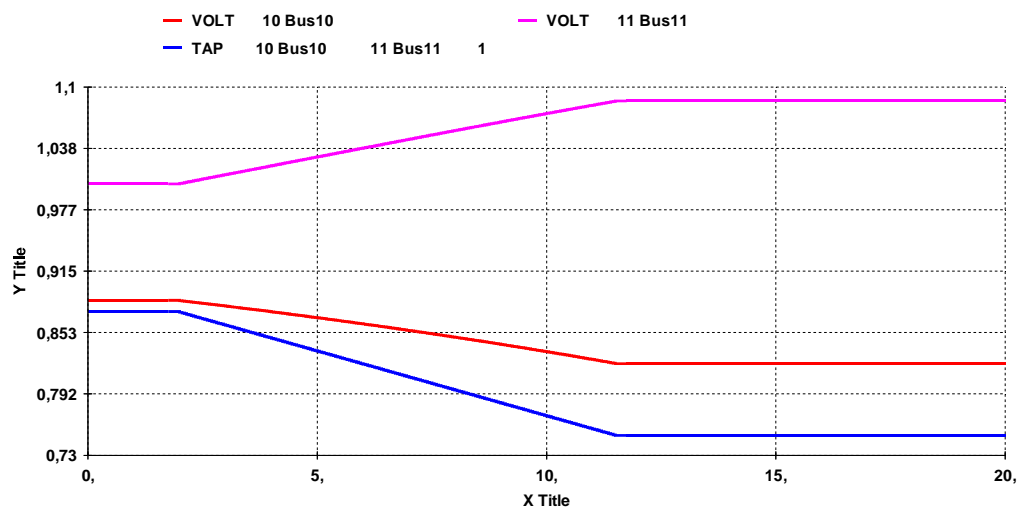


Figura 6.5 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tap contínuo e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

Tabela 6.10 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC

Ponto de Operação	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$	tape
1	0,886	1,003	0,874
2	0,822	1,086	0,750

Repetindo a simulação anterior e discretizando o tap em degraus de 0,018 pu com retardo de 0,5 s entre as atuações, têm-se o mesmo resultado final da simulação anterior, porém a atuação do tap é mais rápida, conforme pode ser observado na Figura 6.6.



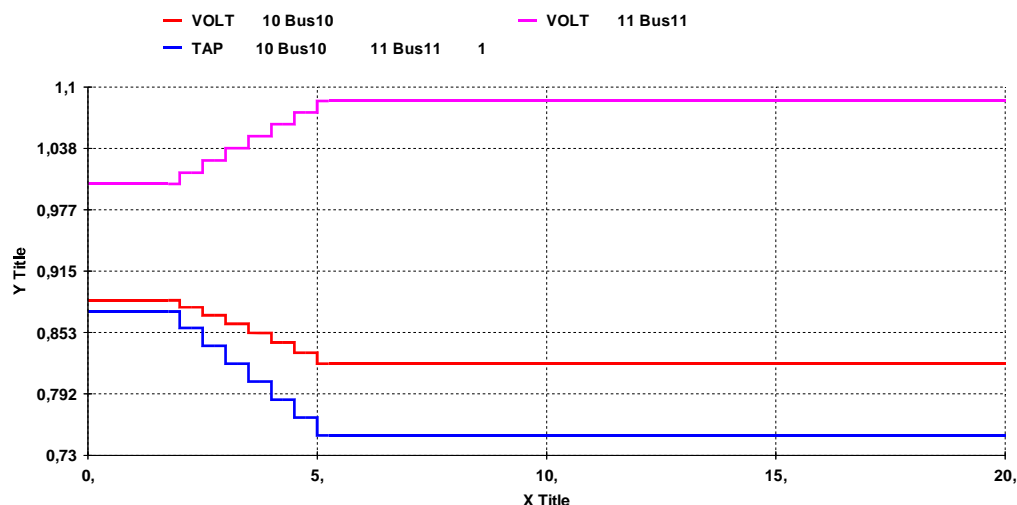


Figura 6.6 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

#### 6.4.2 Região Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.6, aplicando a mesma alteração na tensão de referência da barra 11 da Tabela 6.8 em 2 s. Os tapes do LTC tem variação contínua, sem limites inferior e superior e sem retardo entre operações. A variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 10 está mostrada na Figura 6.7.

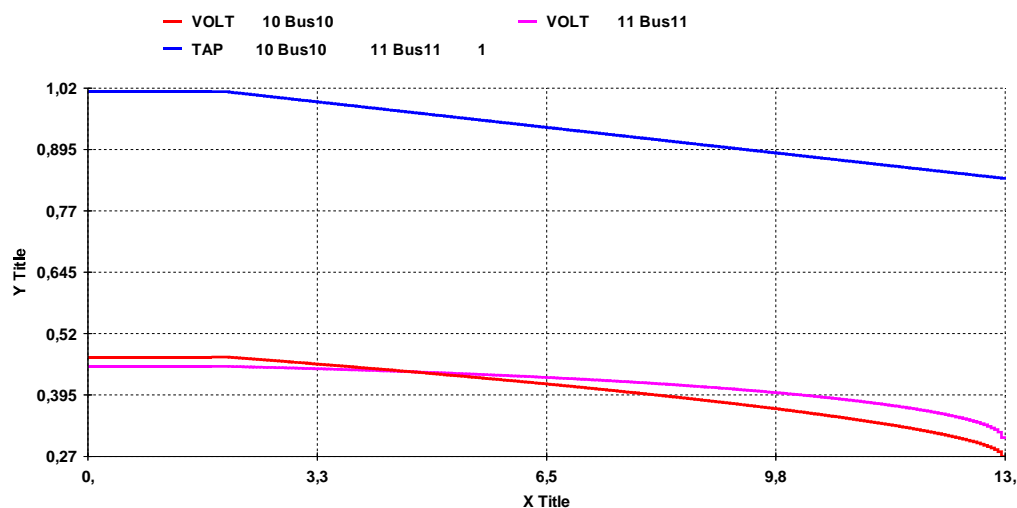


Figura 6.7 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e ilimitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo

Observa-se que a lógica empregada pelo algoritmo foi a usual: buscando incrementar a tensão na barra 11, conforme especificação, o valor do tape foi

trocado para valores menores. O resultado, entretanto, foi oposto ao esperado: ao invés de subir, a tensão na barra 11 decresceu.

Nesta direção, o algoritmo não chegou à solução obtida na simulação estática e não encontrou nenhuma outra solução. Assim, em 13 s a simulação foi interrompida em virtude do número máximo de iterações excedido no processo de solução pós-impacto da rede CA.

Ao tentar aumentar a tensão da barra 11 para atingir o novo valor de referência, o circuito de controle do LTC atuou corretamente, isto é, conforme sua lógica de construção, reduzindo seu tape. Como o sistema encontra-se na região anormal de operação, conforme observado na simulação estática, esta manobra produz um efeito reverso, reduzindo a tensão controlada para valores ainda mais baixos, até a divergência do algoritmo, já que uma outra solução não foi encontrada.

Na prática, a manobra para elevação da tensão da barra 11, que já se encontrava muito baixa, produziria efeitos desastrosos para o sistema, culminando com um colapso de tensão.

Ao inserir limites mínimo (0,85 pu) e máximo (1,20 pu) na atuação do LTC e repetir a simulação anterior, o LTC age para elevar a tensão na barra 11, porém ao chegar ao seu limite inferior, sua atuação cessa. Este efeito é benéfico para o sistema, pois a atuação do LTC, como na simulação anterior, levaria o sistema ao colapso de tensão. Com a interrupção da sua atuação, o sistema manteve-se estável, mesmo com uma tensão inferior à inicial. Os resultados desta simulação estão mostrados na Figura 6.8 e Tabela 6.11.

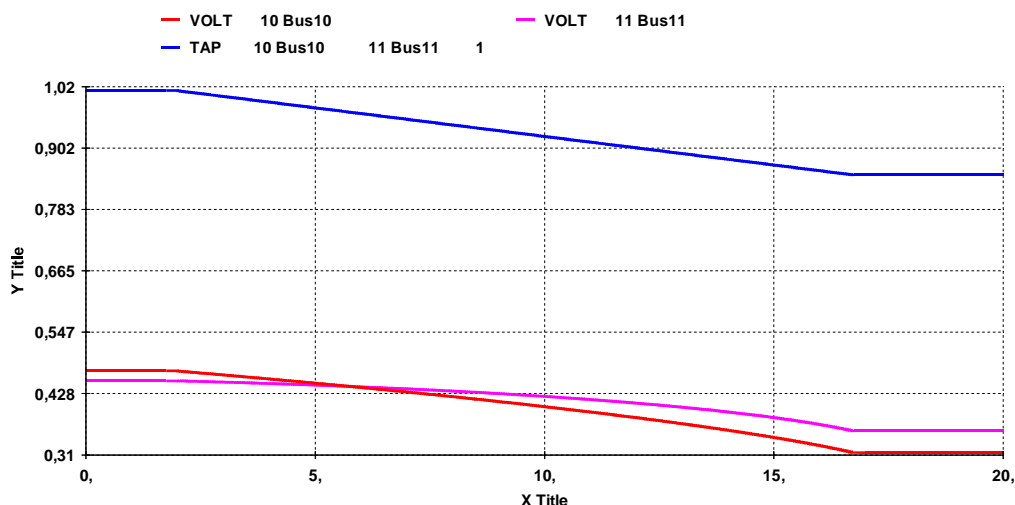


Figura 6.8 - Resultado da variação da tensão da barra 11, do tape contínuo e limitado e da tensão da barra 10, no domínio do tempo

Tabela 6.11 – Pontos iniciais (0 s) e finais (20 s) da simulação no domínio do tempo, com limitação de atuação do LTC

Ponto de Operação	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$	tape
1	0,472	0,453	1,013
2	0,314	0,356	0,850

Assim como na seção 6.4.1, foi discretizado o tape em degraus de 0,018 pu com retardo de 0,5 s entre as atuações. O resultado é o mesmo da simulação anterior, porém a atuação do tape é mais rápida, conforme pode ser observado na Figura 6.9.

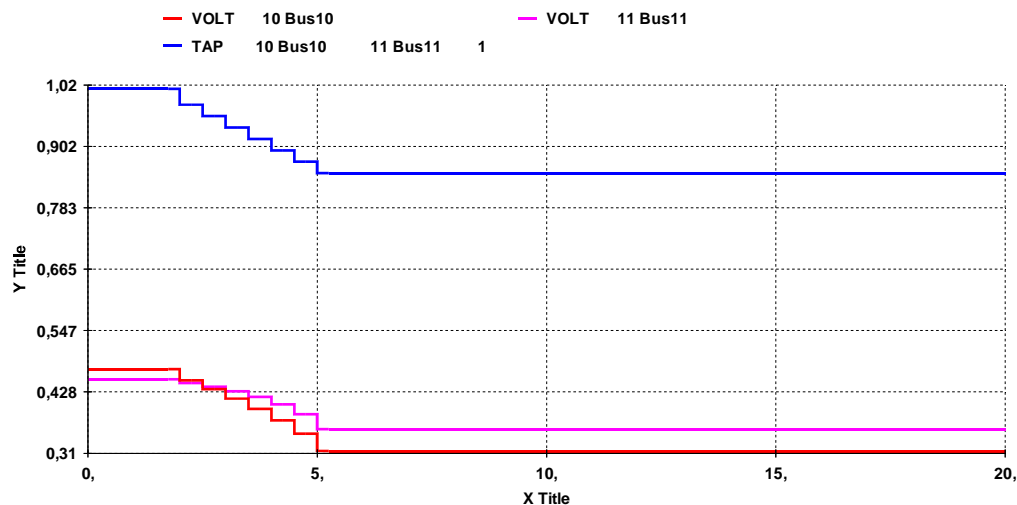


Figura 6.9 - Resultado da variação da tensão das barras 10, do tape discreto e limitado e da tensão da barra 11, no domínio do tempo

## 6.5

### Controle de Tensão por LTC Manual

Nesta seção, o objetivo é verificar a alteração da tensão das barras 10 e 11 ao alterar manualmente o tape do transformador entre as estas barras. Será utilizada a mesma modelagem de carga, referida à tensão da coluna 2, assim como foi feito na seção 6.2.

#### 6.5.1

##### Análise em Regime Permanente

##### 6.5.1.1

##### Regiões Normal e Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.12, dito na região anormal em consequência dos resultados da análise estática. As posições iniciais dos tapes estão mostradas na Tabela 6.13.

Como o controle da tensão é realizado pelo LTC de forma manual, nesta simulação é variado o tape do transformador entre as barras 10 e 11 e verificados os módulos das tensões destas barras. O resultado está apresentado na Tabela 6.14.

Tabela 6.12 – Ponto de operação inicial

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Geração (MW)	Geração (Mvar)	Carga (MW)	Carga (Mvar)
1	0,822	0,0	1749,0	2801,0	0,0	0,0
2	0,714	-1,2	1736,0	1019,0	0,0	0,0
3	0,692	-27,0	450,2	744,1	0,0	0,0
5	0,869	-2,5	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,756	-8,6	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,564	-35,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,478	-46,0	0,0	0,0	1829,0	563,4
9	0,564	-45,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,472	-56,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	0,453	-61,0	0,0	0,0	1822,0	522,4

Tabela 6.13 – Posição dos tapes no ponto de operação inicial

Barra DE	Barra PARA	Tape
1	5	0,886
2	6	0,886
3	7	0,999
8	7	0,900
9	7	1,080
10	11	1,013

Tabela 6.14 – Resultado da variação do tape do transformador entre as barras 10 e 11 e dos módulos das tensões nas barras 10 e 11

Ponto de Operação	tape	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$
1	1,013	0,472	0,453
2	1,020	0,477	0,455
3	1,025	0,481	0,456
4	1,030	0,484	0,459
5	1,050	0,496	0,460
6	1,060	0,503	0,461
7	1,100	0,525	0,464
<b>8</b>	<b>1,150</b>	<b>0,551</b>	<b>0,466</b>
9	1,200	0,573	0,465
10	1,250	0,594	0,462
11	1,300	0,612	0,457
12	1,350	0,628	0,452

Partindo do ponto de operação 1, o tape do transformador é aumentado, provocando aumento do módulo da tensão na barra 11. Este é um efeito inverso e diz-se que a barra 11 está na região anormal de operação. Este efeito perdura até o ponto de operação 8, destacado na Tabela 6.14 em negrito. A partir daí, ao seguir aumentando o tape do mesmo transformador, o módulo da tensão da barra 10 continua aumentando, porém o da barra 11 passa a reduzir, ambos efeitos esperados, insinuando que o ponto de operação passou para a região normal de operação. Na Figura 6.10 apresenta-se os valores da Tabela 6.14 de forma gráfica, o que permite visualizar mais facilmente a mudança da região de operação.

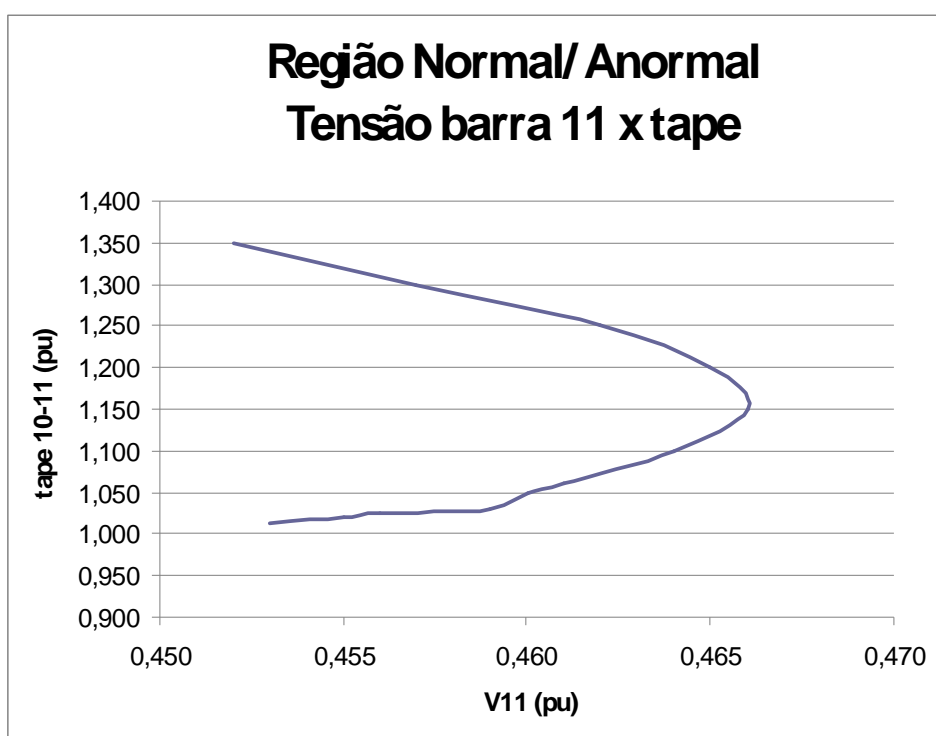


Figura 6.10 – Resultado da variação da tensão da barra 11 X tape do transformador entre as barras 10 e 11

Assim sendo, conclui-se que do ponto de operação 1 ao 7 (Tabela 6.14), o sistema encontra-se na região anormal de operação. Nos pontos de operação 9 a 12, o sistema encontra-se na região normal de operação. No ponto 8, o sistema encontra-se na região de transição entre as duas regiões, o que corresponderia à “ponta do nariz” da curva Vtape.

## 6.5.2 Análise no Domínio do Tempo

### 6.5.2.1 Regiões Normal e Anormal de Operação

Para esta simulação foi utilizado o ponto de operação da Tabela 6.12 e as perturbações são as mesmas alterações de tape da Tabela 6.14, aplicadas de  $t=2$  s até  $t=22$  s, de 2 em 2 segundos. Os resultados desta simulação estão apresentados na Figura 6.11 para as variações impostas ao tape e apresentadas na Figura 6.12.

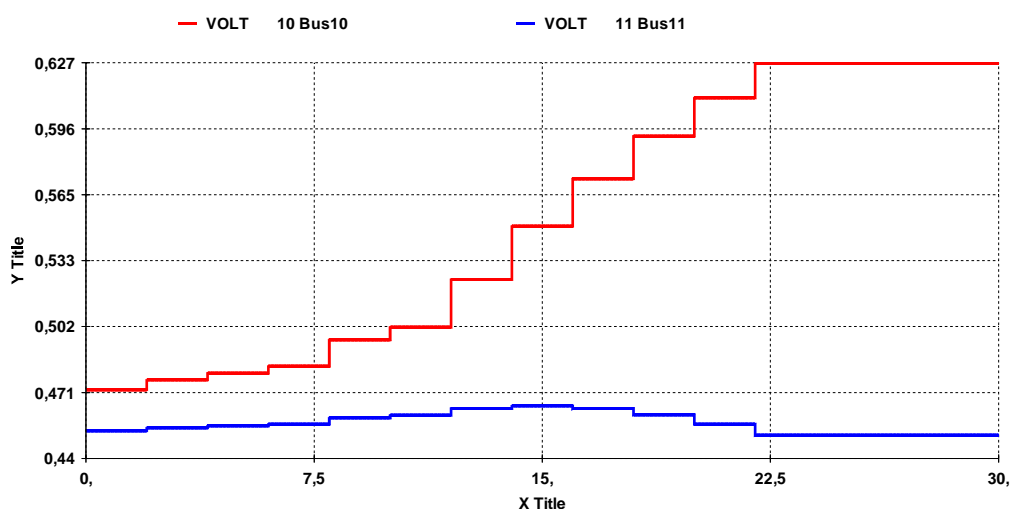


Figura 6.11 - Resultado da variação do módulo da tensão das barras 10 e 11, para incrementos sucessivos no tape, no domínio do tempo

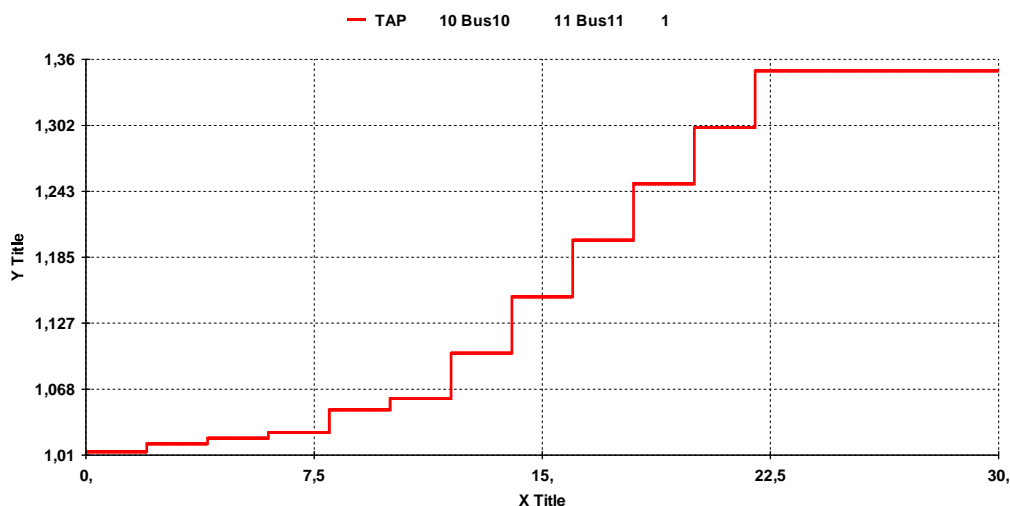


Figura 6.12 - Alteração imposta ao tape do transformador entre as barras 10 e 11, no domínio do tempo

O resultado da simulação no domínio do tempo é similar ao apresentado na seção 6.5.1. Até  $t=14$  s, ao aumentar o tape do transformador entre as barras 10 e 11, ambos módulos de tensão aumentam, o que significa que a barra 11 está apresentando efeito oposto ao esperado. Após  $t=16$  s, o mesmo aumento de tape provoca redução na tensão da barra 11, que é um efeito esperado. A Tabela 6.15 apresenta os resultados da simulação dinâmica e permite a comparação com a simulação em regime permanente (Tabela 6.14). Os resultados são bem próximos.

Tabela 6.15 – Módulo das tensões das barras 10 e 11 e tape do transformador entre estas duas barras, retirados da simulação no domínio do tempo

Ponto de Operação	t (s)	tape	Módulo de $V_{10}$	Módulo de $V_{11}$
1	0+	1,013	0,472	0,453
2	2+	1,020	0,477	0,454
3	4+	1,025	0,480	0,455
4	6+	1,030	0,484	0,456
5	8+	1,050	0,496	0,459
6	10+	1,060	0,502	0,460
7	12+	1,100	0,525	0,463
8	14+	1,150	0,550	0,465
9	16+	1,200	0,572	0,464
10	18+	1,250	0,592	0,461
11	20+	1,300	0,610	0,456
12	22+	1,350	0,627	0,451

## 6.6 Análise dos resultados

Através de simulações estáticas e dinâmicas, foi possível demonstrar a existência do fenômeno de efeito reverso do controle de tensão através de LTC.

Nas simulações apresentadas, o sistema-teste foi levado ao colapso de tensão em virtude da atuação automática da troca de tapes de um LTC. Como a lógica de controle deste equipamento não diferencia a região de operação em que se encontra sistema, sua atuação é exatamente a mesma para ambos os lados da curva  $V_{\text{tape}}$ . Ao reduzir o tape na região anormal, a tensão na barra 11 também foi reduzida, quando o desejado seria aumentá-la. Ao inserir limites mínimos e máximos, o fenômeno também é observado e o sistema só não é levado ao colapso de tensão porque o limite do LTC é atingido. Eles serviram



para limitar a atuação do LTC e impedir que o sistema apresentasse tensões ainda mais baixas.

Nas simulações utilizando a troca manual de tapes do LTC, o sistema parte de um ponto de operação na região anormal. Ao aumentar o tape, a tensão na barra secundária do transformador (na região anormal) aumenta. Esta resposta aproxima o ponto de operação para a “ponta do nariz” até que há uma inversão do efeito e o aumento no tape do LTC passa a provocar uma redução na tensão secundária. Este efeito foi demonstrado em simulações estáticas e dinâmicas.

As normas de operação vigentes hoje para a operação do sistema elétrico não prevêm a operação na região anormal. Desta forma, todas as medidas operativas determinadas nos documentos pertinentes são tomadas na região normal de operação, o que pode levar a situações como a da seção 6.2, onde uma medida corretiva leva a um afundamento da tensão do sistema.