

CAPITULO 2

A ANÁLISE DO COLAPSO DE TENSÃO PELA REGIÃO DE OPERAÇÃO [1]

2.1 - Introdução

A operação normal de sistemas de potência interligados requer que a magnitude de tensão se mantenha dentro de uma variação do valor nominal. Em certas ocasiões, queda excessiva de tensão pode ocorrer e o objetivo é então, trazer o sistema ao ponto normal de operação. Isto normalmente é efetuado através de controles associados com fontes de potência reativa como, arranjo nas tensões dos geradores e compensadores, chaveamento de capacitores e reatores "shunt". Pode ocorrer, entretanto, que os controles disponíveis não sejam suficientes para corrigir as tensões anormais. Pior ainda, é quando os controles deterioram ainda mais o nível de tensão.

Devido à complexidade do estudo proposto, a análise é iniciada com um sistema de potência muito simples. Uma carga

ativa/reativa é alimentada por um gerador com capacidade infinita através de uma linha de transmissão.

A magnitude de tensão na barra de geração é considerada constante e igual a 1,0 pu. O ângulo de tensão da barra de geração é tomado como zero, uma vez que é a referência para a barra de carga. A impedância da linha de transmissão é de 0,21814 pu, com um ângulo de 75,505 graus. A impedância "shunt" é de 34,75 pu, com um ângulo de -90 graus. Esse sistema de duas barras é mostrado na Figura 2.1.

As equações de fluxo de potência deste sistema de duas barras são somente duas: o balanço de potência ativa e reativa na barra de carga. Para cada carga ativa reativa, o interesse é encontrar a magnitude de tensão e ângulo na barra de carga. Esses dois resultados, junto com as variáveis especificadas, caracterizam inteiramente o ponto de operação do sistema.

2.2 - Regiões de Operação

A análise é feita para um certo intervalo de pontos físicos de interesse. Por exemplo, magnitudes de tensão podem variar de 0 até 3 pu e o desvio angular entre as barras de carga e geração podem variar de 0 a 90 graus.

Duas regiões de operação são definidas:

- "Região A", a região normal de operação, onde as ações corretivas de tensão têm efeito positivo. Por exemplo, aumentando a tensão na barra de geração, instalando um capacitor na barra de carga, ou aumentando o tap de um transformador intermediário, qualquer dessas medidas causa um aumento na tensão na barra de carga.

- "Região B", a região anormal de operação, onde as ações corretivas de tensão na barra de carga têm efeito oposto ao esperado, ou seja, elas pioram a situação de tensão na barra de carga.

Percebe-se então, a existência de uma fronteira entre essas duas regiões, onde os efeitos das ações de controle são desconhecidos.

O propósito, portanto, é confirmar a existência dessas duas regiões, bem como da fronteira. Deve-se então, determinar em qual região um ponto de operação se situa, bem como quão distante este ponto se encontra da fronteira.

2.3 - O Gráfico V x θ

O gráfico das figuras mencionadas a seguir no texto, foi feito para suprir a necessidade de representar quatro variáveis na barra de carga: o fluxo de potência ativa e reativa, que é igual a carga, a magnitude da tensão e o ângulo. O método gráfico fornece diversas informações importantes como será mostrado mais tarde.

2.3.1 - Curva para Potência Ativa Constante

Para a curva em questão, parte-se da fórmula:

$$P_{ij} = \frac{-V_i E_j}{Z_T} \cos(\theta_i - \theta_j + \alpha_T) + V_i^2 \left(\frac{\cos(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\cos(\alpha_S)}{Z_S} \right) \quad (2.1)$$

cujá demonstração encontra-se no Apêndice I.

Deve-se observar que no sistema em questão para a barra j, especifica-se a tensão gerada e o ângulo da tensão. Da barra i conhece-se o valor da carga, de forma que as incógnitas na equação acima são ângulo e tensão na barra i.

A Equação 2.1 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$c = V_i \cdot b + V_i^2 \cdot a$$

onde:

$$c = P_{ij}$$

$$b = -\frac{E_j}{Z_T} \cos(\theta_i - \theta_j + \alpha_T) \quad a = \left(\frac{\cos(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\cos(\alpha_S)}{Z_S} \right)$$

Naturalmente que é necessário, antes de escrever a equação acima, determinar o valor de θ_i . O artifício que se faz, é supor que esse ângulo varia de 0 a 90 graus e, calcula-se o valor de tensão V_i para cada caso, resolvendo a equação do 2º grau acima, de forma a obter as curvas da Figura 2.2.

Note-se que a curva se fecha e tende a se tornar um ponto na medida em que o ângulo da tensão se aproxima do ângulo da impedância da linha, ou seja, do limite de estabilidade estática, que é correspondente ao máximo fluxo de potência ativa que pode chegar na barra de carga.

2.3.2 - Curva para Potência Reativa Constante

Para essa curva parte-se da fórmula:

$$Q_{ij} = \frac{-V_i E_j}{Z_T} \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_T) + V_i^2 \left(\frac{\sin(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\sin(\alpha_S)}{Z_S} \right) \quad (2.2)$$

cuja demonstração encontra-se no Apêndice II.

As mesmas observações feitas para o caso anterior são válidas agora, de forma que:

$$c = V_i b + V_i^2 a$$

onde:

$$c = Q_{ij}$$

$$b = \frac{E_j}{Z_T} \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_T) \quad a = \left(\frac{\sin(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\sin(\alpha_S)}{Z_S} \right)$$

Como no caso anterior, é necessário especificar o valor de θ_i , o que novamente é feito variando-o de 0 a 90 graus, e calcula-se o valor de tensão V_i resolvendo a equação do 2º grau acima, de forma a obter as curvas da Figura 2.3.

Deve-se notar nesta figura, que na medida em que a carga torna-se mais capacitiva, mais a curva se desloca para a direita.

2.3.3 - Curva para Arc tg (Q/P) Constante

Será usada a fórmula:

$$V_i = \frac{E_j \left[\operatorname{tg} \theta_i \cos (\theta_i - \theta_j + \alpha_T) - \operatorname{sen} (\theta_i - \theta_j + \alpha_T) \right]}{\operatorname{tg} \theta_i \cos (\alpha_T) - \operatorname{sen} (\alpha_T) + \operatorname{tg} \theta_i \frac{Z_T}{Z_S} \cos (\alpha_S) - \frac{Z_T}{Z_S} \operatorname{sen} (\alpha_S)}$$

(2.3)

cuja demonstração encontra-se no Apêndice III.

Neste caso, além das observações já feitas para os casos anteriores sobre tensões e ângulos nas barras, deve-se notar também que o valor da $\operatorname{tg} \theta_i$ é conhecido, uma vez que se conhece o fator de potência da carga.

Para cada ângulo de tensão θ_i calcula-se V_i , de forma a obter-se as curvas da Figura 2.4. Deve-se notar que, na medida em que o ângulo torna-se mais capacitivo, a curva se desloca para a direita.

2.3.4 - Curva para P, Q e Arc tg (Q/P) Constantes

De forma a englobar todas as características vistas anteriormente, deve-se procurar plotar as curvas num mesmo gráfico, para se entender o efeito da variação de qualquer um

dos parâmetros, como mostrado a seguir.

Na Figura 2.5, as curvas P_1 , P_2 e P_3 representam carga ativa constante com variação de carga reativa, em outras palavras, com variação do fator de potência da carga, onde $P_1 < P_2 < P_3$. Similarmente, as curvas Q_1 , Q_2 e Q_3 representam carga reativa constante com variação de potência ativa, em outras palavras, com variação do fator de potência da carga, onde $Q_1 < Q_2 < Q_3$. A primeira observação direta do gráfico é a existência de duas soluções (V_i, θ_i) para cada carga (P_i, Q_i) . É sabido entretanto, que nem sempre é esse o caso; o circuito pode ter somente uma solução ou nenhuma.

As curvas R_1 , R_2 e R_3 representam variação de carga ativa mantendo o fator de potência constante, onde $\cos \theta_1 < \cos \theta_2 < \cos \theta_3$.

As curvas também representam variação de carga reativa para fator de potência constante.

Os valores dos ângulos θ_i , foram escolhidos iguais a \arctg de Q dividido por P_i . Por esta razão, as três curvas P_i , Q_i e θ_i são concorrentes em duas soluções (V_i, θ_i) .

A Figura 2.6 mostra as curvas P_i em três dimensões para carga ativa constante e as curvas R_i para variação de carga ativa com fator de potência constante.

Se as cargas ativa e reativa forem aumentadas mantendo o fator de potência constante, as duas soluções de tensão vão se aproximando, até que coincidem, ou seja, somente uma solução existe para essa carga (P_i, Q_i). Para esta carga, as curvas P_i e Q_i se tocam em um único ponto. Qualquer aumento para P faria a curva se mover para a direita, e qualquer outro aumento em Q , faria a curva se mover para a esquerda e nenhuma solução de tensão existiria para a nova carga. A Figura 2.7 ilustra a situação descrita. A carga correspondente à solução única de tensão é o fluxo máximo que a rede pode transmitir.

2.4 - Efeitos de Controle de Tensão

A definição de duas regiões de operação, bem como da fronteira, depende das ações de controle de tensão no sentido de retornar a tensão ao nível normal de operação. Três tipos mais comuns de controle são aplicados para diferentes condições de operação. É assumido que o nível de tensão é baixo e o objetivo é elevá-lo. A análise é mais qualitativa do que quantitativa, de forma que não há o cuidado especial de se trabalhar com os valores das variáveis dentro da faixa normal de operação de sistemas de potência. Os tipos de controle são:

- Instalação de capacitores na barra de carga.

A Figura 2.8 mostra o resultado dessa ação de controle.

- Troca de tapes nos transformadores.

A Figura 2.9 mostra o resultado dessa ação de controle.

- Elevação do nível de tensão na barra de geração.

A Figura 2.10 mostra o resultado dessa ação de controle.

São mostradas as soluções A e B para a mesma carga, e uma solução C para a carga máxima. O símbolo "o" indica que nenhum controle foi ainda aplicado e o símbolo "i" indica que o controle foi aplicado.

Os resultados qualitativos são os mesmos para os três tipos de controle. A solução A_i apresenta um nível de tensão mais alto do que a solução A_o , indicando que o controle surtiu o efeito desejado. A solução de tensão " B_i " apresenta uma tensão mais baixa do que a tensão " B_o ", indicando que o controle não foi capaz de elevar o nível de tensão. É então assumido que os pontos "A" pertencem à região A de operação e os pontos "B" pertencem à região B de operação. O montante de compensação reativa, o número de mudanças de tapes e, o aumento de tensão na barra de geração, embora importantes, não são relevantes para esse caso puramente qualitativo, dado que não alteram os resultados.

As Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 também mostram os efeitos do controle nos pontos da fronteira " C_o ". Duas possíveis

soluções são mostradas. " CA_i " pertencente a Região A e " CB_i " pertencente a Região B. Nesta situação não é possível saber se os controles melhorariam ou piorariam a tensão na carga. O ponto "C" não deve ser então um ponto possível de operação.

A Figura 2.11 mostra o caso de uma carga maior do que a máxima permitida pela rede. Nenhuma solução existe para essa situação. Entretanto, com ações de controle, por exemplo com a instalação de um capacitor, uma solução pode aparecer, dependendo do montante do controle. De fato, se o montante do controle for pequeno, a capacidade de transmissão pode não ter sido aumentada o suficiente para suprir a carga e, nenhuma solução será encontrada. Para um determinado montante, uma solução é possível, exatamente na fronteira e, para um montante ainda maior, duas soluções seriam encontradas: uma na Região A e outra na Região B. Isto mostra que a linha tem um carregamento máximo que se altera com as variáveis de controle e fator de potência na carga.

O corte de carga é também uma possibilidade de controle, quando os outros tipos de controle não estão disponíveis ou estão esgotados. A Figura 2.12 mostra a mesma análise feita pelas outras ações de controle, porém neste caso, o controle utilizado é o corte de carga.

Note que, a exemplo das outras ações de controle, o corte de carga tem o efeito desejado na Região A e tem o efeito inverso na Região B.

2.5 - Determinação Matemática da Fronteira

Como previamente mencionado e visto na Figura 2.7, a única solução de tensão para uma dada carga está por definição, na fronteira das duas regiões de operação. Como a solução é única, as curvas de P constante e Q constante tocam-se em um ponto somente. Logo, os vetores gradiente ∇P e ∇Q estão alinhados e a seguinte relação pode ser escrita:

$$\nabla P - \beta \nabla Q = 0; \text{ onde } \beta \text{ é um escalar.}$$

Essa última relação é reconhecida como a condição de otimalidade dos seguintes problemas:

- Maximize $P(V, \theta, E)$ sujeito a $Q(V, \theta, E) =$
 $=$ constante.
- Maximize $Q(V, \theta, E)$ (maximize Q indutivo) sujeito a
 $P(V, \theta, E) =$ constante.
- Minimize $Q(V, \theta, E)$ (maximize Q capacitivo) sujeito
a $P(V, \theta, E) =$ constante.

- Maximize $P(V, \theta, E)$ e $Q(V, \theta, E)$ sujeito a $\theta = \arctg(Q/P) = \text{constante}$.

A condição de otimalidade pode ser desenvolvida como:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} - \beta \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial P}{\partial V} - \beta \frac{\partial Q}{\partial V} = 0$$

Isto é equivalente ao determinante da matriz Jacobiana ser igual a zero, de forma que:

$$\frac{\partial P}{\partial \theta} \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial P}{\partial V} \frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0$$

O Apêndice IV mostra a solução analítica da condição de otimalidade. Na fronteira, a magnitude de tensão é dada por:

$$V_i^c = E_j \frac{1}{2 \cos(\theta_i - \theta_j) + 2(Z_S/Z_T) \cos(\theta_i - \theta_j + \alpha_T - \alpha_S)} \quad (2.4)$$

Onde V_i^c é a tensão da barra de carga na fronteira.

Na fronteira, o ângulo da tensão é dado por:

$$\theta_i^c = -\frac{1}{2} \arctg \frac{\sin(-\theta_i + \alpha_T) + (Z_T/Z_S) \sin(-\theta_i + 2\alpha_T - \alpha_S)}{\cos(-\theta_i + \alpha_T) + (Z_T/Z_S) \cos(-\theta_i + 2\alpha_T - \alpha_S)} \quad (2.5)$$

Essa última equação encontra-se desenvolvida no Apêndice V.

O valor de θ_i^C calculado pela Equação 2.5 é então usado na Equação 2.4 para dar o valor de V_i^C . A Figura 2.13 mostra o lugar geométrico dos pontos que obedecem V_i^C , versus θ_i , ou seja, mostra o valor de θ_i^C e V_i^C para cada fator de potência.

As seguintes observações resumem os resultados da análise para um certo fator de potência da carga constante:

- Uma solução de tensão está na fronteira se o ângulo de tensão satisfaz a Equação 2.5.
- Uma solução de tensão está na região A se o ângulo da tensão for menor que θ_i^C .
- Uma solução de tensão está na região B se o ângulo for maior que θ_i^C .

Outras combinações de magnitude de tensão e ângulo em relação aos valores críticos, não são matematicamente possíveis, assumindo que a análise seja feita para ângulo θ constante, uma vez que as curvas para ângulo θ constante e a curva para a Equação 2.5, cruzam-se em apenas um ponto.

As Equações 2.4 e 2.5, podem ser simplificadas para circuitos específicos:

Linha de transmissão modelo série: Z_S infinito.

$$V_i^c = E_j \frac{1}{2 \cos(\theta_i^c - \theta_j)}$$

(2.6)

$$\theta_i^c = \left[- \frac{\alpha_T + \theta_i}{2} \right]$$

(2.7)

Transformador LTC, $\alpha_T = \alpha_S$

$$V_i^c = E_j \times \frac{1}{2 \cos(\theta_i^c - \theta_j) (1 + (Z_T/Z_S))}$$

(2.8)

$$\theta_i^c = \frac{(-\alpha_T + \theta_i)}{2}$$

(2.9)

Linha de transmissão com reatância *shunt* capacitiva:

$$\alpha_S = -90^\circ \text{ e } Z_S = X_c$$

$$V_i^C = E_j \times \frac{1}{\cos(\theta_i^C - \theta_j) - 2(Z_T/Z_S) \sin(\theta_i^C - \theta_j - \alpha_T)} \quad (2.10)$$

$$\theta_i^C = -\frac{1}{2} \text{arc tg} \frac{\sin(-\theta_i + \alpha_T) + (Z_T/Z_S) \cos(-\theta_i + 2\alpha_T)}{\cos(-\theta_i + \alpha_T) - (Z_T/Z_S) \sin(-\theta_i + 2\alpha_T)} \quad (2.11)$$

Para o modelo Π de transmissão, tem-se então, os seguintes fluxos máximos transmitidos diretamente calculados com os valores V_i^C e θ_i^C .

$$P_{ij}^C = \frac{-E_j V_i^C \cos(\theta_i^C - \theta_j + \alpha_T) + (V_i^C)^2 \left[\frac{\cos(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\cos(\alpha_S)}{Z_S} \right]}{Z_T}$$

$$Q_{ij}^C = \frac{E_j V_i^C \sin(\theta_i^C - \theta_j + \alpha_T) + (V_i^C)^2 \left[\frac{\sin(\alpha_T)}{Z_T} + \frac{\sin(\alpha_S)}{Z_S} \right]}{Z_T}$$

2.6 - Queda Excessiva de Tensão e Colapso de Tensão

Para cada carga ativa e reativa, duas soluções existem. Uma delas está na região A. Se a tensão estiver baixa, controles de tensão podem ser aplicados para retificar a

situação. Se as fontes de potência reativa estiverem esgotadas, o nível de tensão tende a descer ainda mais, se houver um acréscimo na carga. No caso da tensão cair muito, os relés de sub-tensão devem operar, de forma a proteger os equipamentos. A situação descrita é conhecida como "queda excessiva de tensão".

A outra solução está na região B, onde o nível de tensão não pode ser elevado pelo caminho convencional. Todas as tentativas de restaurar a situação do sistema, tendem a deteriorar ainda mais o nível de tensão. As fontes de potência reativa tentariam sem sucesso, elevar o nível de tensão no sistema, até que os relés de sub-tensão operassem. A situação descrita é chamada de "colapso de tensão".

Se somente uma solução existe, isto corresponde ao máximo fluxo que a rede pode transmitir. Não existe solução de tensão para cargas maiores do que o montante que a rede pode transmitir, o que acarretaria em colapso do sistema devido à ausência do ponto de equilíbrio.

Havendo compensação capacitiva, elevação na tensão de geração ou mudança de tapes, há aumento no fluxo máximo transmitido. Isto implica em dizer que, dependendo do montante de ação de controle, pode-se chegar até o limite de estabilidade clássico, ou seja, o limite de estabilidade clássico é um ponto particular de colapso de tensão e ocorre em:

$\theta^{\max} = 90^{\circ} \Rightarrow$ Para uma linha com resistência nula.

$\theta^{\max} = \alpha_T \Rightarrow$ Para uma linha com ângulo de impedância
igual a α_T .

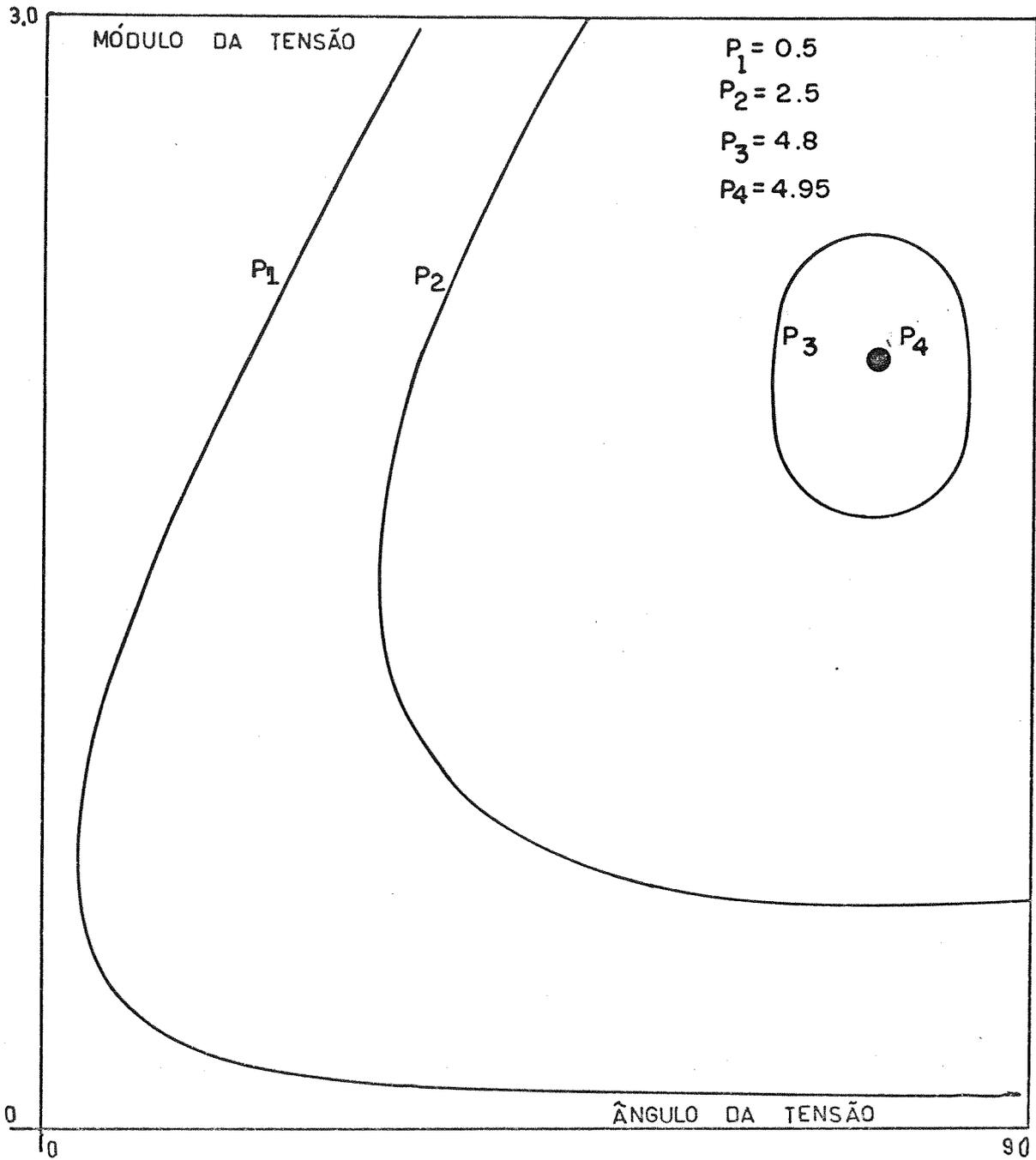


FIG 2.2 => Curvas $V \times \theta$ para potência ativa constante.

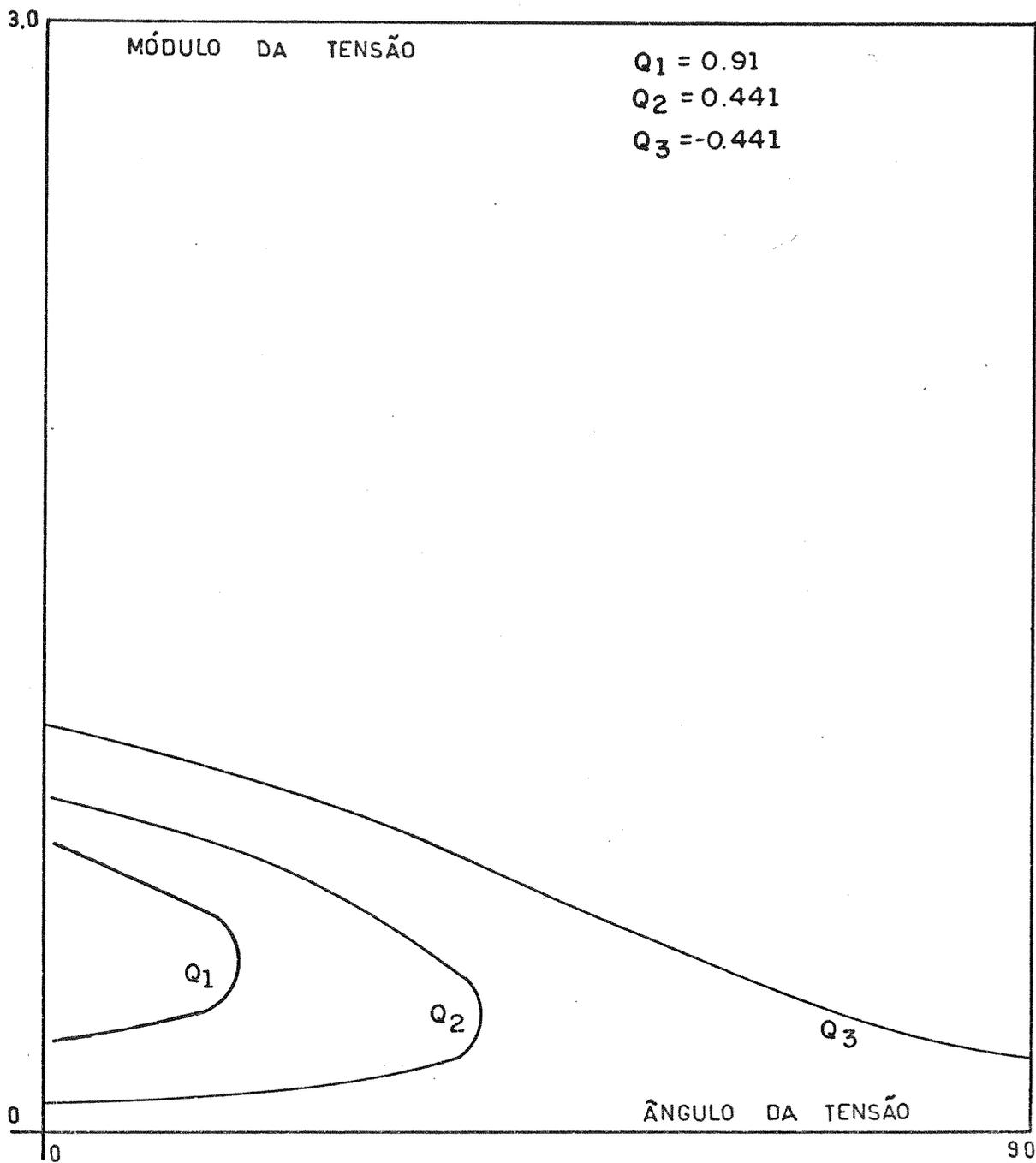


FIG 2.3 => Curvas $V \times \theta$ para potência reativa constante.

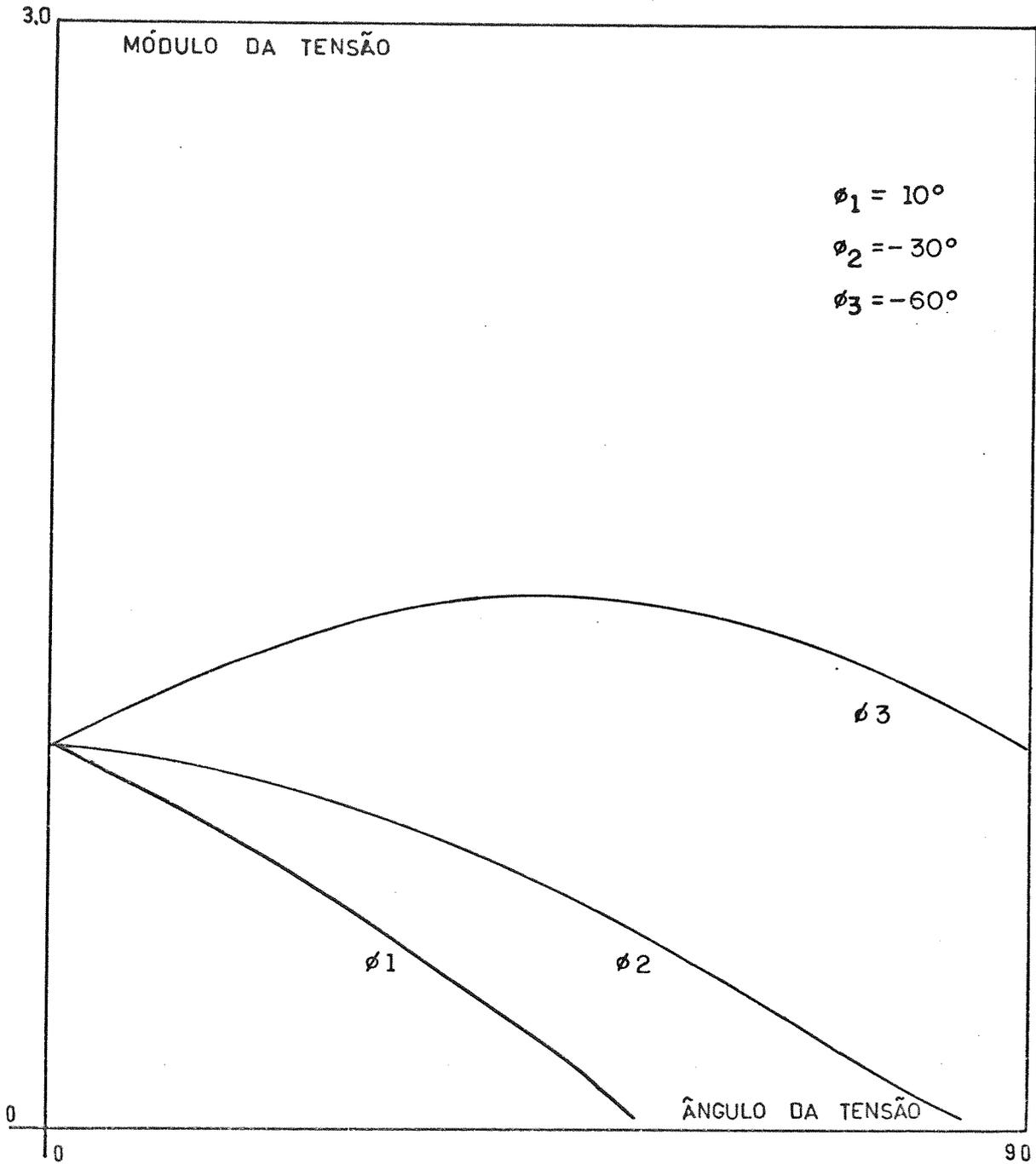


FIG 2.4 => Curvas $V \times \theta$ para $\text{arc tan}(Q/P)$ constante.

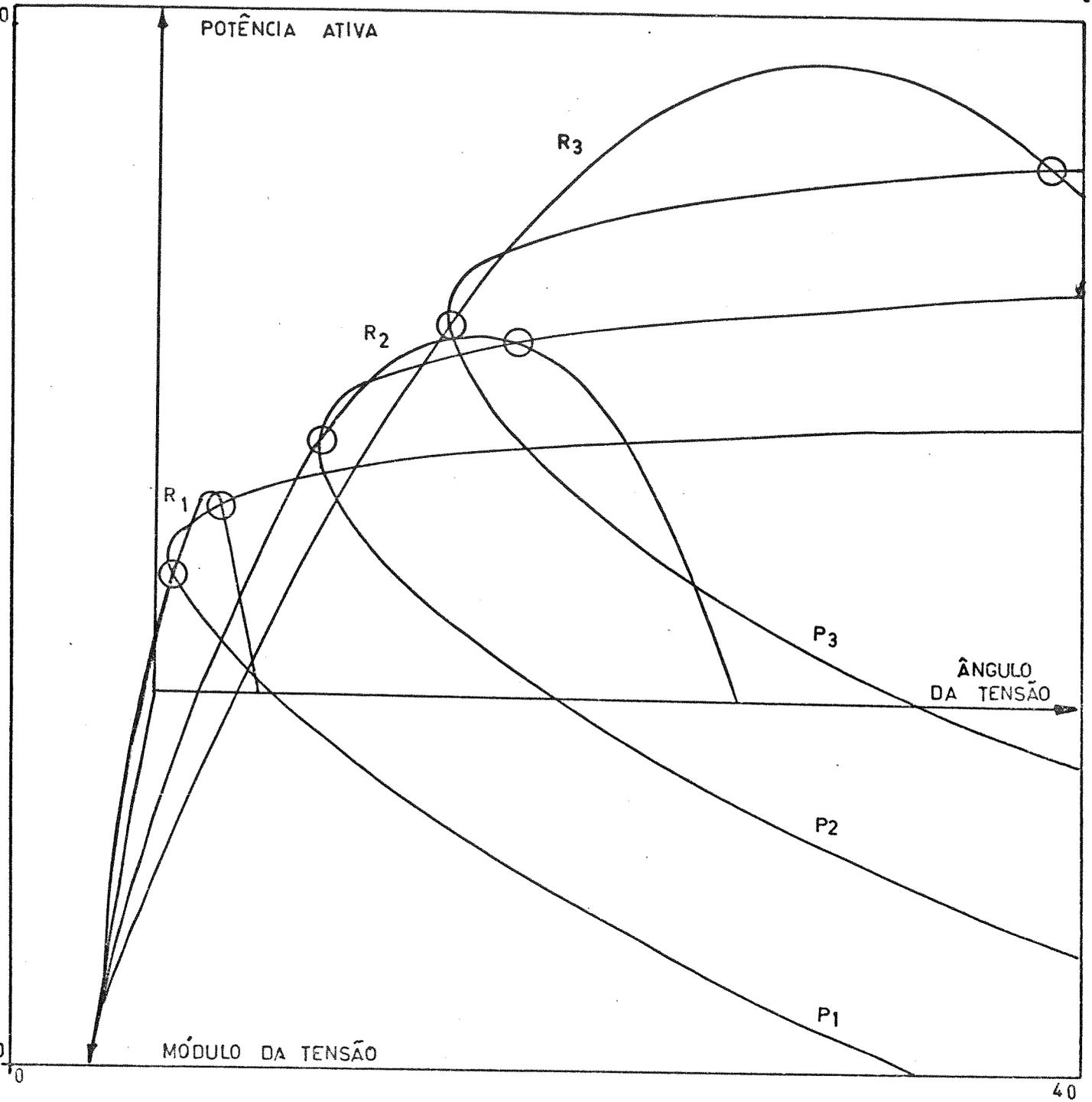


FIG 2.6 => A vista em três dimensões das variáveis da barra de carga.

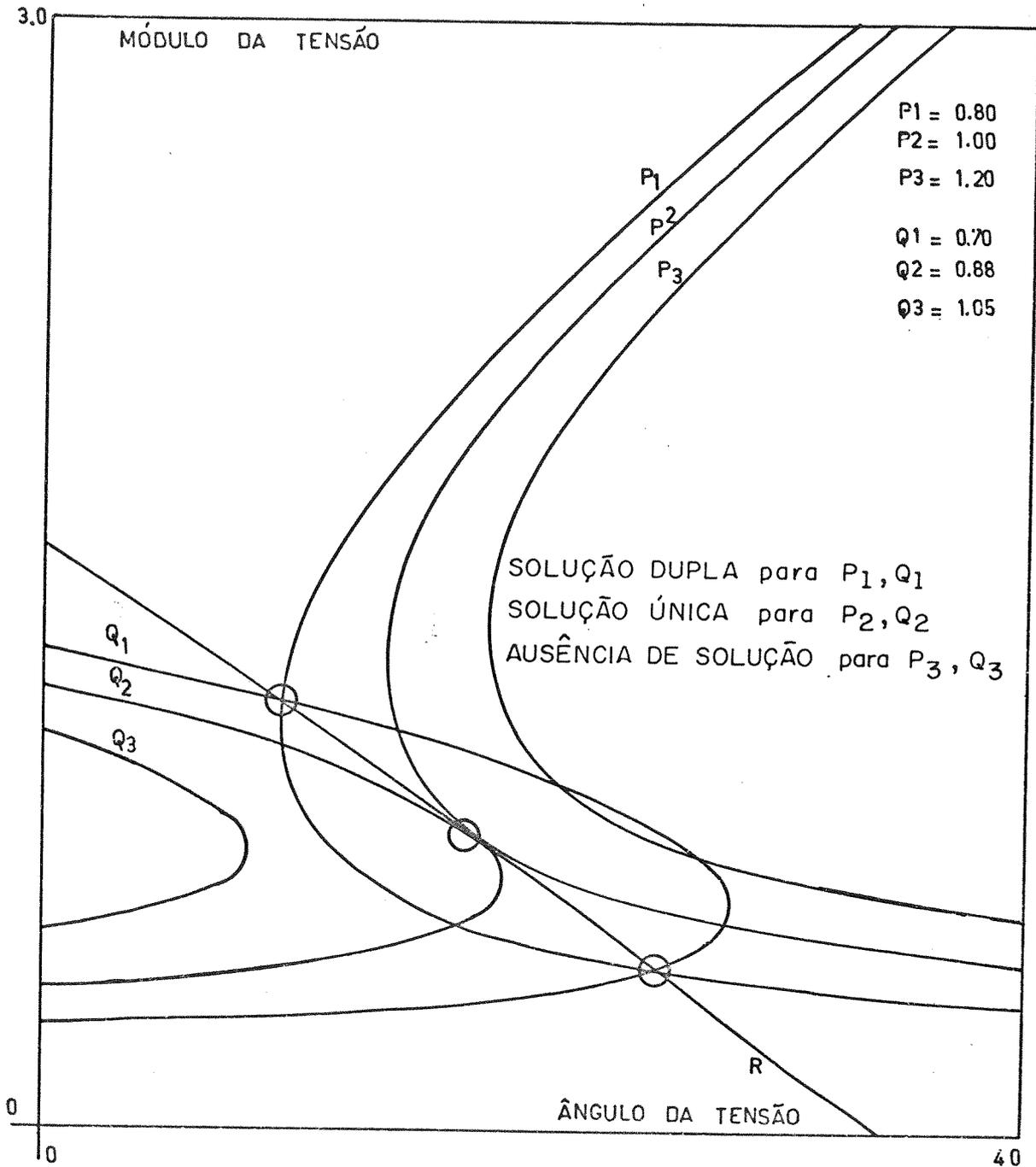


FIG 2.7 => Curvas $V \times \theta$ mostrando três possibilidades de solução de tensão.

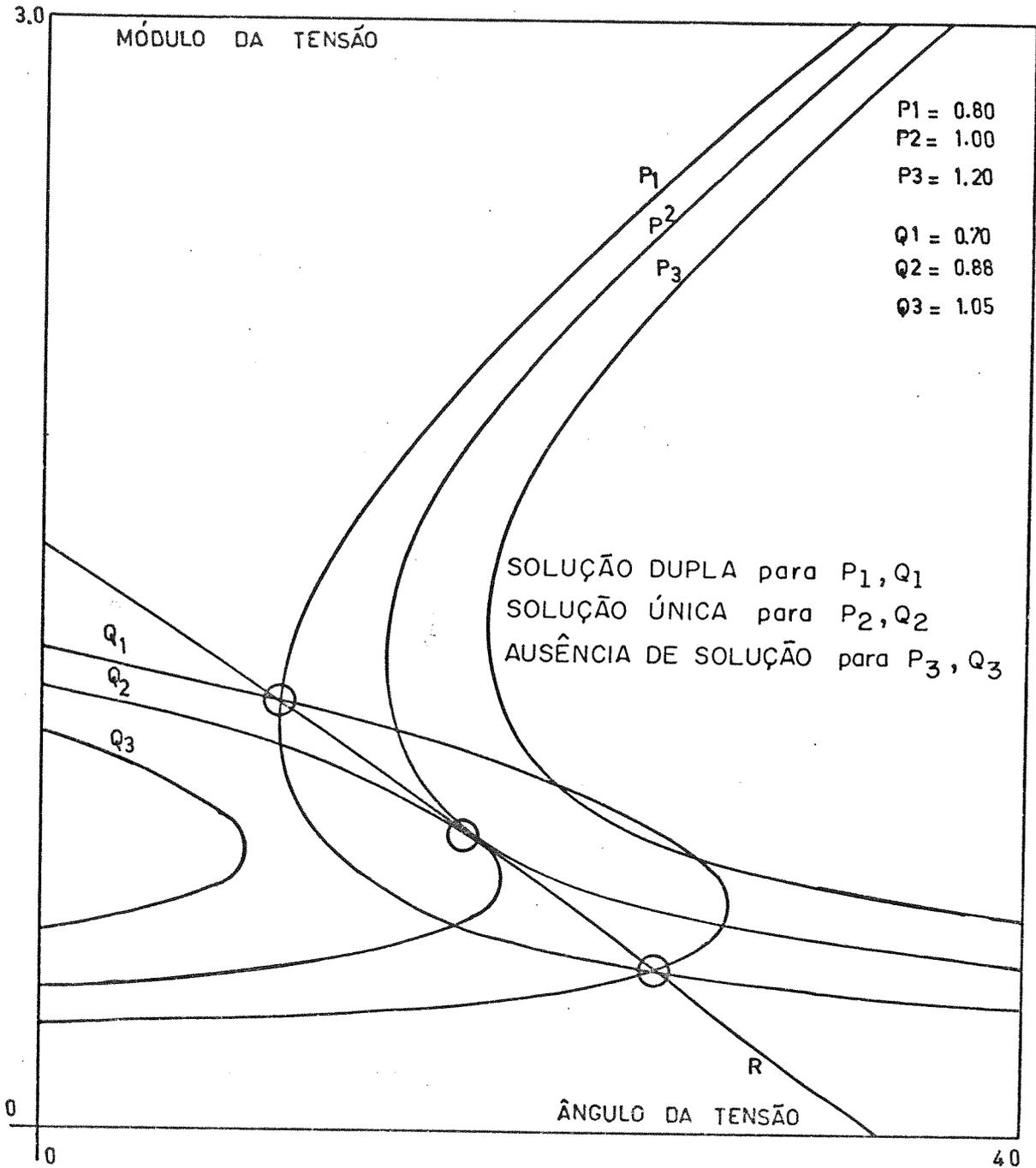


FIG 2.7 => Curvas $V \times \theta$ mostrando três possibilidades de solução de tensão.

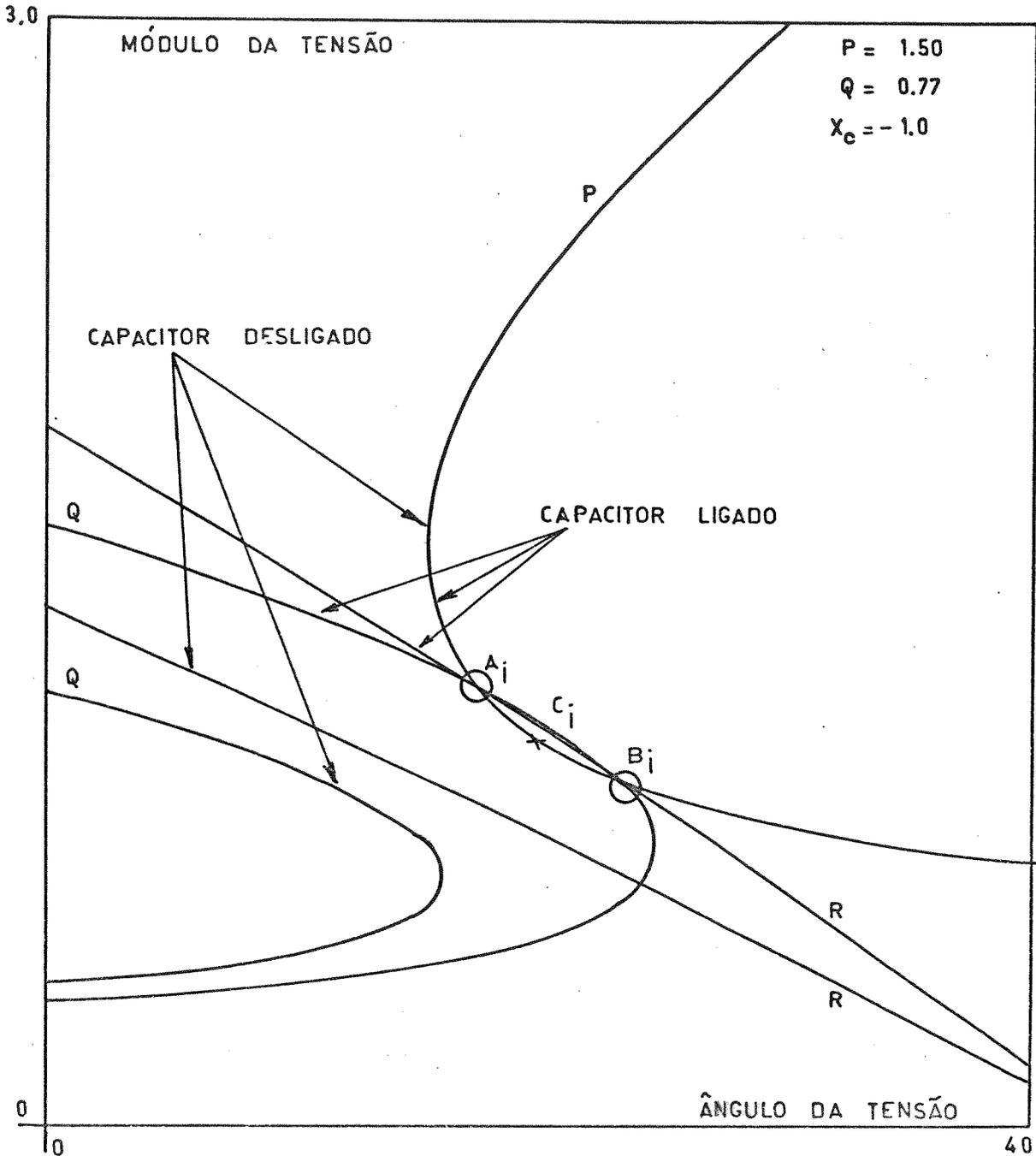


FIG 2.11 => Efeitos sobre a tensão na carga com o aumento da capacidade de transmissão através da instalação de um capacitor em paralelo.

1.2 MÓDULO DA TENSÃO

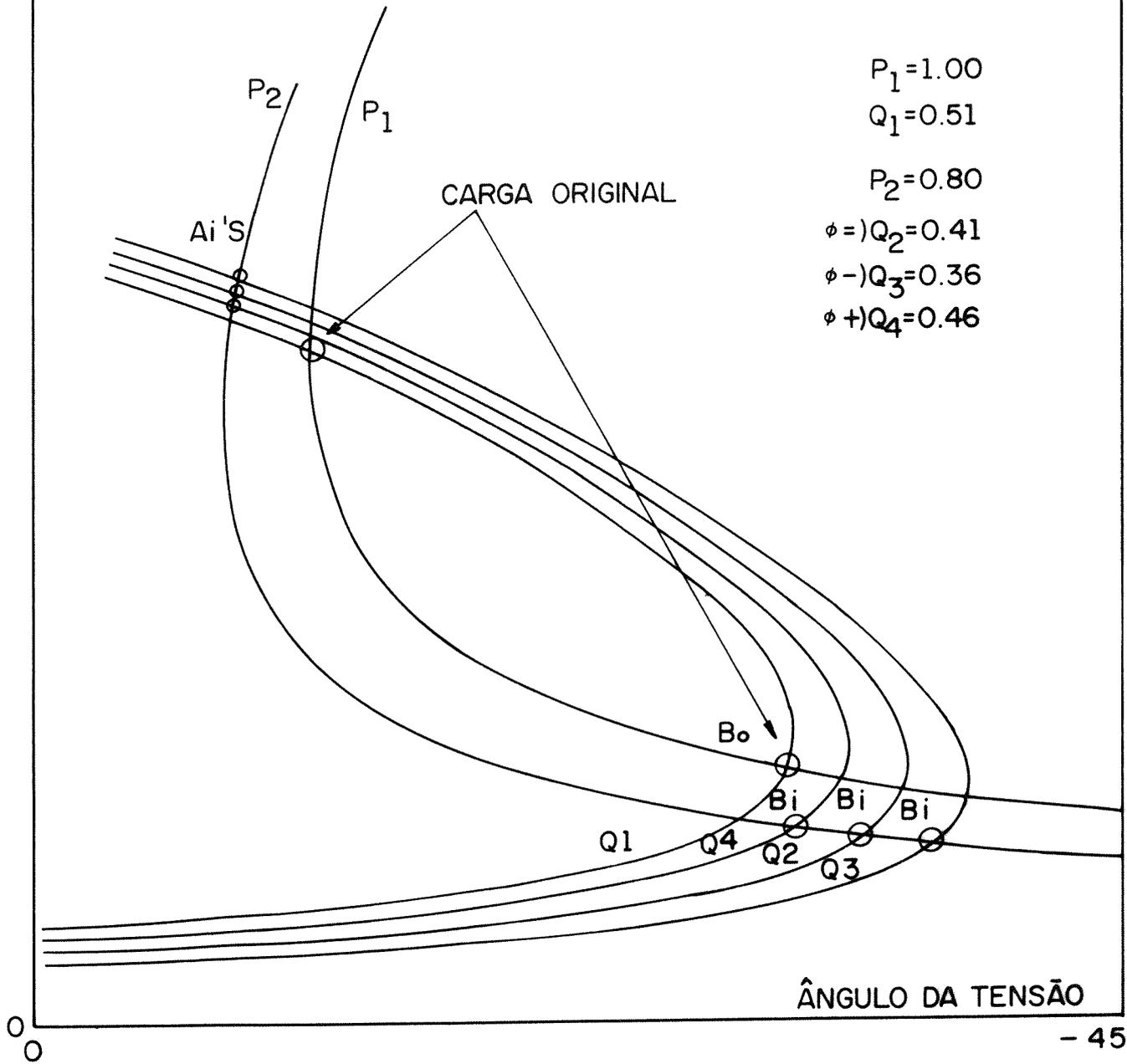


FIG. 2.12 Efeitos sobre a tensão na carga de três cortes de carga parciais correspondendo a cargas remanescentes com três fatores de potência diferentes.

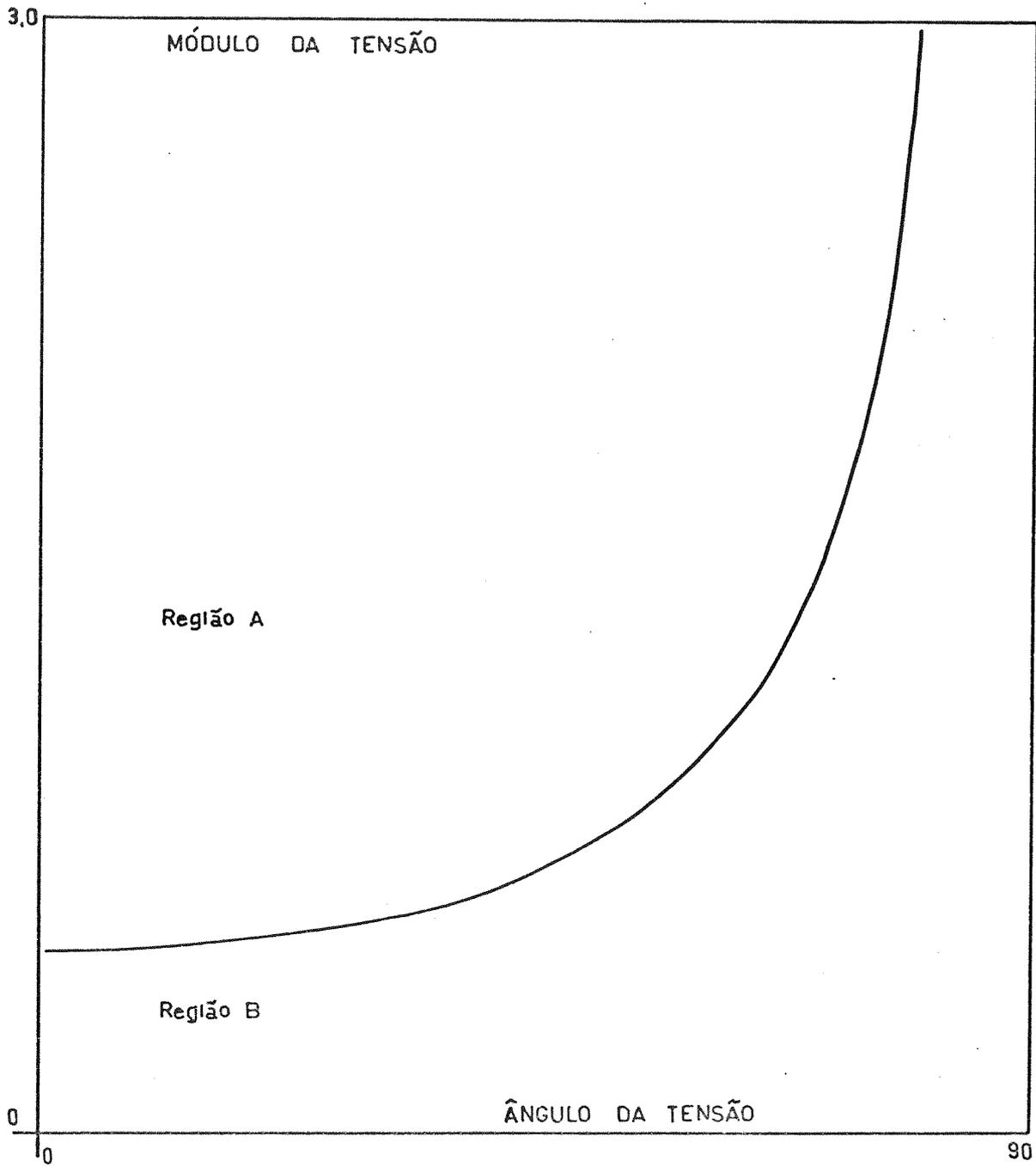


FIG 2.13 => Curva $V \times \theta$ para valores de máximo carregamento.