



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**UM ESTUDO DE COLAPSO DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA UTILIZANDO AS CONSTANTES GENERALIZADAS, GRÁFICOS
TENSÃO X POTÊNCIA E DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS**

Luiz Bizerra de Aguiar

Salvador – Maio 2011

**UM ESTUDO DE COLAPSO DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA UTILIZANDO AS CONSTANTES GENERALIZADAS, GRÁFICOS
TENSÃO X POTÊNCIA E DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS**

Luiz Bizerra de Aguiar

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Bahia
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Professor Fernando Augusto Moreira



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA ELÉTRICA**



Luiz Bizerra de Aguiar

**UM ESTUDO DE COLAPSO DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA UTILIZANDO AS CONSTANTES GENERALIZADAS, GRÁFICOS
TENSÃO X POTÊNCIA E DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFBA.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Banca Examinadora

Prof. Fernando Augusto Moreira - UFBA

Orientador

Prof. André Luiz de Carvalho Valente - UFBA

Prof. Osvaldo Lívio Soliano Pereira - UNIFACS

Salvador – Maio 2011

RESUMO

Esta dissertação apresenta os resultados de um estudo sobre transmissão de energia elétrica, com ênfase no problema de colapso de tensão. São abordados os aspectos relacionados com colapso e estabilidade de tensão e com limite de capacidade da linha de transmissão, em condições de regime permanente. São obtidas as curvas usuais $V \times S$, representativas das tensões em função das potências das cargas, incluindo as influências das compensações em derivação e série e das características das cargas. É apresentado também um método de análise do problema utilizando hipérboles de potência. Nos estudos realizados são empregadas as constantes generalizadas da linha **A**, **B**, **C** e **D**. O uso dessas constantes e dos diagramas hiperbólicos de potência constitui-se no diferencial em relação aos trabalhos desenvolvidos sobre o tema. Assim, os resultados apresentados mostram uma forma didática para compreensão do fenômeno de colapso de tensão, bem como o potencial para aplicações no sistema de potência.

ABSTRACT

This dissertation presents the results of a study on electric energy transmission, with emphasis on the problem of voltage collapse. Aspects related to voltage collapse and stability and capacity limit of the transmission line, are addressed in steady-state conditions of permanent state. Models are used in order to obtain the usual $S \times V$ curves which represent the voltages as function of load powers, including the effect of series and shunt compensations and load characteristics. A method of analyzing the problem using power hyperbole is also presented. In the studies performed, the generalized line constants **A**, **B**, **C** and **D** are employed. The utilization of generalized constant and power hyperbole becomes the differing approach compared to previous work developed about this subject. Thus, the results presented show a didactic way in order to understand the voltage collapse phenomenon as well as the potential for applications in the power system.

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Luiz Carlos, como motivação e inspiração, para estimulá-lo ao bom aprendizado e melhor discernimento no preparo da sua formação profissional. Também dedico à minha esposa Sonia, pelo apoio e compreensão.

Homenageio meus pais, que garantiram minha formação, e a algumas pessoas que, por aproximação e bom relacionamento, estimularam meu crescimento pessoal e profissional e foram importantes para mim: Iradir Batista, Genaro Dantas Silva, Omar Catunda, Lolita Carneiro Campos Dantas e Álvaro Leal Moreno.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fernando Moreira, pelas contribuições e apoio como orientador nesta dissertação, e aos colegas professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFBA Caiuby Costa, Adhemar Fontes, Jês Cerqueira, Paulo Bastos e Niraldo Ferreira, pelas trocas de idéias e palavras de incentivo para a consolidação deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS

LT = linha de transmissão

V = tensão (V – Volt, kV)

I = corrente (A – Ampère)

S = $P + jQ$ = potência aparente (VA, kVA, MVA)

S = potência aparente (VA, kVA, MVA), módulo

P = potência real ou ativa (W - Watt, kW, MW)

Q_L = potência reativa indutiva (Var, kVar, MVar)

Q_C = potência reativa capacitiva (Var, kVar, MVar)

A, B, C e D - constantes generalizadas da linha de transmissão

A = $\cosh(\gamma.l) = A \angle \alpha$

B = $(Z_c) \cdot \sinh(\gamma.l) = B \angle \beta$

C = $(1/Z_c) \cdot \sinh(\gamma.l) = C \angle \rho$

D = **A** = $D \angle \varepsilon = A \angle \alpha$

cosh = cosseno hiperbólico

senh = seno hiperbólico

l = comprimento da linha

$\gamma = \sqrt{zy}$ = constante de propagação

$Z_c = \sqrt{z / y}$ = impedância característica (Ω - Ohm)

z = $r + j x$ = impedância série por km (Ω/km)

y = $g + j b$ = admitância shunt por km (Ω^{-1}/km)

Z = impedância (Ω - Ohm)

Y = admitância (Ω^{-1} - mho)

X_L = reatância indutiva (Ω - Ohm)

X_C = reatância capacitiva (Ω - Ohm)

Z = impedância (Ω - Ohm), módulo

Y = admitância (Ω^{-1} - mho), módulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de uma linha de transmissão.....	7
Figura 3.1.– Exemplo para uma LT de 230 kV, 200 km.....	12
Figura 3.2.– Exemplo para uma LT de 230 kV, 200 km, variando $\cos\phi$	13
Figure 4.1 - Curvas para cargas tipo potência constante.....	23
Figure 4.2 - Curvas para cargas tipo corrente constante.....	24
Figure 4.3 - Curvas para cargas tipo impedância constante.....	24
Figure 4.4 - Curvas para cargas tipos potência, corrente e impedância constante, fator de potência indutivo.....	25
Figure 4.5 – Curvas para cargas tipos potência, corrente e impedância constante, fator de potência capacitivo.....	25
Figure 4.6 - Curvas para cargas tipo potência constante, sem e com capacitor série.....	26
Figura 5.1 - Hipérboles de potência (esquema geral).....	31
Figura 5.2 - Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV.....	33
Figura 5.3 - Curvas V x S para um caso de LT 138 kV.....	34
Figura 5.4 - Hipérboles de potência para um caso de LT 69 kV.....	36
Figura 5.5 - Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV, sem capacitor série.....	37
Figura 5.6 - Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV, com capacitor série.....	38
Figura 5.7 - Hipérboles de potência para um caso de LT 230 kV, 2 condutores por fase com espaçamento de 0,4 m.....	39
Figura 5.8 - Hipérboles de potência para um caso de LT 230 kV, 2 condutores por fase com espaçamento de 2,0 m.....	39
Figura 5.9 - Hipérboles de potência para um caso de LT 500 kV, 2400 km, 4 condutores por fase.....	40
Figura 5.10 – Perfis de tensão para um caso de LT 750 kV, 2400 km, 4 condutores por fase (gráficos em separado).....	42
Figura 5.11 – Perfis de tensão para um caso de LT 750 kV, 2400 km, 4 condutores por fase (gráficos reunidos).....	43

**UM ESTUDO DE COLAPSO DE TENSÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA UTILIZANDO AS CONSTANTES GENERALIZADAS, GRÁFICOS
TENSÃO X POTÊNCIA E DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS**

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Considerações Preliminares.....	1
1.2	Considerações sobre as Referências.....	2
1.3	Objetivo.....	4
1.4	Estrutura da Dissertação.....	5
2.	EQUAÇÕES DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	7
3.	O PROBLEMA DE COLAPSO DE TENSÃO.....	10
4.	INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DAS CARGAS.....	16
4.1.	Introdução.....	16
4.2.	Análise dos Casos Básicos.....	18
4.3.	Análise de Sensibilidade.....	19
4.4	Compensação de Reativos.....	20
4.5	Exemplos e Aplicações.....	22
5.	DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS.....	28
5.1	Fundamentos.....	28
5.2	Exemplos e Aplicações.....	33
6.	APLICAÇÕES NO SISTEMA.....	44
7.	CONCLUSÕES.....	47
	BIBLIOGRAFIA.....	49
	ANEXO 1.....	56
	ANEXO2.....	57

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

Diversas abordagens e metodologias são consideradas nos estudos de estabilidade e colapso de tensão, em função dos tipos das pesquisas que são desenvolvidas pelos vários pesquisadores de diversas empresas e instituições de pesquisa. Esses trabalhos, dependendo do tipo de estudo considerado, apresentam uma grande variedade de enfoques, envolvendo os aspectos conceituais, metodologias ou métodos de análise, ferramentas computacionais e perspectivas das pesquisas sobre o tema.

Embora o problema de colapso de tensão e capacidade de transmissão tenha sido tratado sob os mais diversos aspectos e de maneira bem abrangente, neste trabalho o assunto é considerado para situações simples voltadas para a compreensão dos pontos básicos do problema. No entanto, a análise feita neste trabalho é para uma linha de transmissão, representada pela sua equação geral, de forma exata, com as constantes generalizadas **A**, **B**, **C** e **D**. Isto representa o diferencial em relação aos desenvolvimentos encontrados nas diversas abordagens sobre o assunto.

Com a utilização de programas computacionais, podem ser traçados gráficos que mostram as tensões em função das cargas, as usuais curvas $V \times S$ ou $V \times P$, considerando diversas condições de operação e características de cargas, com o destaque para a situação de colapso de tensão. Também podem ser traçados os diagramas hiperbólicos, introduzidos nesta dissertação, através dos quais podem ser observadas as diversas condições de operação da linha, em particular as condições de colapso e capacidade de transmissão.

Embora a abordagem seja simples, ela pode ser utilizada na análise das condições limites de operação de linhas de distribuição e transmissão muito carregadas e nas linhas de transmissão longas, contribuindo para a visualização e o entendimento do fenômeno de estabilidade de tensão em casos específicos de linhas. No entanto, essa análise limitada pode contribuir de forma significativa para a compreensão dos problemas de colapso de tensão no sistema como um todo.

2.2 Considerações sobre as Referências

Esta dissertação foi desenvolvida, principalmente, a partir de alguns trabalhos anteriores do autor, apresentados em eventos técnicos, conforme relacionados nas referências.

Em [1] são apresentados alguns elementos para avaliação de colapso de tensão em linhas de transmissão, já considerando as constantes **A**, **B**, **C** e **D**. Na época (1989), a literatura técnica sobre o assunto era bastante escassa. O problema de colapso era apresentado em alguns poucos artigos e livros, No entanto, era ilustrado através do modelo da linha representada pela resistência **R** e reatância indutiva **X**. Em [2] a avaliação de colapso de tensão incorpora as características das cargas, ocasião em que alguns artigos já eram disponíveis considerando esse aspecto.

Em [3] é mostrada uma análise e visualização de colapso de tensão e limite de transmissão através de diagramas hiperbólicos de tensão. O conceito de hipérbole de potência é introduzido através da referência [4] e complementado em [5]; as constantes **A**, **B**, **C** e **D** foram utilizadas. Essas referências serviram de base para este trabalho, no que se refere às hipérbolas de potência.

Dentre as publicações sobre estabilidade e colapso de tensão as referências [6] e [7] estão entre as pioneiras, e foram utilizadas na elaboração de [1], mesmo com modelo de linha diferente. Tratam de sistemas radiais, com as linhas de transmissão representadas através da resistência e reatância, mas ilustram bem o problema de colapso. Em [8] são tratados os aspectos de planejamento do sistema considerando colapso de tensão. As referências [9], [10] e [11] consideram as características das cargas, em regime permanente, e [12] inclui as características dinâmicas.

A referência [13] mostra os resultados de um projeto de pesquisa sobre instabilidade de tensão e a [14] apresenta as metodologias para avaliação de estabilidade de tensão, ambas entre as pioneiras brasileiras.

Ao lado da divulgação de uma grande variedade de artigos técnicos, foram publicados livros sobre o assunto, conforme [15] e [16], e textos de cursos, a exemplo das referências [17], [18] e [19]. A análise de colapso e estabilidade de tensão passou a ser

incorporada em programas de computador, conforme as referências [20], [21], [22] e [23].

Vale ressaltar que no Brasil, na última década, o tema tem sido objeto de muito interesse por parte das empresas de energia elétrica e instituições de pesquisas tem sido objeto de várias dissertações de mestrado, conforme as referências [24] a [47], e teses de doutorado, referências [48] a [60], abordando os mais diversos aspectos sobre o problema. Pela consulta de grande parte dessas referências, pode-se observar que a abordagem aqui mostrada não é tratada em nenhuma delas, o que se constitui em aspecto inovador. Apresenta, portanto, potencial para desenvolvimentos futuros tratando do sistema de potência como um todo.

As referências [61] a [68] também serviram para consultas sobre os aspectos básicos relacionados com colapso de tensão.

Quanto aos aspectos conceituais, metodologias, ferramentas computacionais e perspectivas, já mencionados, podem ser feitas algumas considerações, conforme segue:

- **Aspectos conceituais** - Trata dos diversos aspectos relacionados com limite de transmissão e colapso de tensão, a saber: conceito de estabilidade; o problema de estabilidade de tensão; fundamentos de estabilidade de tensão; limite de transmissão; classificação para estabilidade de tensão; definição dos estudos de estabilidade de tensão; características potência x tensão ($P \times V$, $S \times V$), ou tensão x potência; características potência ativa x potência reativa ($P \times Q$); índices de sensibilidade; regiões de operação e de estabilidade; máxima transferência de potência ativa / reativa; instabilidade de tensão. Várias referências apresentam estes aspectos, particularmente alguns livros, [15] e [16], e artigos técnicos, [17] e [18].
- **Metodologias** – Trata dos métodos empregados na avaliação de estabilidade de tensão: métodos gerais de análise de estabilidade de tensão [15], [16]; índices de colapso de tensão [37], [39]; máximo carregamento e colapso [44], [47], [50], [60]; representação da carga [49]; matriz de sensibilidade, matriz Jacobiana aumentada e reduzida [35], [45]; análise modal, autovalores e singularidades [42], [57], [58]; teoria das bifurcações [53]; indicadores de contingências críticas [37], [39].

- **Ferramentas computacionais** – São as ferramentas analíticas e programas computacionais utilizados para avaliação de colapso e estabilidade de tensão, abrangendo: fluxo de potência normal, fluxo de potência ótimo, fluxo de potência continuado [32], [54]; atuação de controles e segurança [59]; margem de estabilidade de tensão [24], [28], [31], [34], [41], [45], [46], [56]; critérios de estabilidade de tensão [27], [48]; programas computacionais específicos, destacando os do CEPEL: Anarede, NH2, Voltstab, Pacdyn [20], [21], [22], [23].
- **Perspectivas** – São pontos relevantes que estão em desenvolvimento, relacionados com colapso de tensão, definindo linhas de pesquisa em estabilidade de tensão: aplicações de redes neurais no estudo de estabilidade de tensão [26]; programação orientada a objeto e estabilidade de tensão [55]; estabilidade e colapso de tensão on-line [62]; confiabilidade com otimização incluindo colapso de tensão [21].

As referências [61] a [68] também deram suporte a este estudo.

A bibliografia indicada, bastante ampla, dá uma idéia da dimensão e abrangência do tema. Essas referências, embora consultadas em sua maioria, não foram citadas explicitamente por não apresentarem diretamente o enfoque aqui apresentado.

1.3 Objetivo

Este trabalho apresenta uma abordagem para avaliação da capacidade de linhas de transmissão de energia elétrica com ênfase no problema de colapso de tensão. O estudo trata basicamente do equacionamento, solução e representação gráfica do problema, para sistemas radiais em condições de regime permanente. Seus resultados, no entanto, podem ser utilizados em aplicações no sistema de potência como um todo, auxiliando na visualização e compreensão do fenômeno de colapso de tensão.

Partindo das equações gerais de uma linha de transmissão, determinam-se as expressões que caracterizam o comportamento da linha, destacando as condições de operação estável e de instabilidade de tensão, assim como a situação limite que corresponde ao ponto onde pode ocorrer o fenômeno de colapso de tensão e apresenta a situação de máxima capacidade de transmissão da linha.

São apresentados os gráficos usuais da tensão terminal, na carga, em função das potências aparente ou ativa, gráficos $V \times S$ ou $V \times P$, respectivamente, considerando

para a linha de transmissão as equações na forma exata, com as constantes generalizadas **A, B, C e D**, representativas do quadripolo correspondente. Usualmente esses gráficos são apresentados a partir da equação da linha sob forma simplificada, utilizando os valores da resistência R e reatância indutiva X_L .

São analisadas as influências das características das cargas na capacidade de transmissão e condições de colapso, considerando os modelos básicos de representação das cargas por potência constante, corrente constante e impedância constante.

As equações da linha de transmissão podem assumir expressões, a serem vistas adiante, em que são identificadas algumas propriedades de uma hipérbole. Isso permite uma forma de visualização gráfica do problema de colapso de tensão através de diagramas hiperbólicos de potência, diferentemente dos usuais diagramas circulares de potência, constituindo-se numa forma alternativa de visualização do comportamento das variáveis envolvidas.

São apresentados casos exemplos, em ambos os métodos analisados, utilizando os gráficos $V \times S$ e diagramas hiperbólicos, envolvendo algumas aplicações específicas em linhas de transmissão e no sistema de potência como um todo. Igualmente podem ser utilizados os gráficos $V \times P$.

Verifica-se que o tema colapso e instabilidade de tensão vêm apresentando uma importância cada vez maior, principalmente diante das constatações das possibilidades de ocorrência desse fenômeno, tanto na operação como no planejamento dos sistemas elétricos de algumas empresas. Dessa forma, algumas instituições de pesquisas e empresas vêm desenvolvendo esforços para o equacionamento e solução dos problemas relacionados, considerando estudos de casos simples, que ilustram o problema e facilitam sua compreensão, bem como em sistemas complexos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é constituída de 7 capítulos, incluindo esta introdução. No final são indicadas as referências bibliográficas.

O capítulo 2 mostra as equações das linhas de transmissão utilizadas nos estudos. O capítulo 3 apresenta o problema de colapso de tensão, com equacionamento e

solução, inclusive a determinação dos limites de capacidade de transmissão, com os gráficos representativos. O capítulo 4 analisa a influência da modelagem das cargas nos valores associados ao colapso e na capacidade de transmissão. O capítulo 5 apresenta a conceituação e o desenvolvimento sobre as hipérboles de potência com os respectivos diagramas hiperbólicos. O capítulo 6 apresenta algumas indicações para aplicações no sistema. As conclusões são apresentadas no capítulo 7.

2. EQUAÇÕES DA LINHA DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão do sistema estão aqui representadas pelas constantes generalizadas **A**, **B**, **C** e **D**, correspondente ao quadripolo correspondente que estabelece as relações entre as tensões e as correntes em seus terminais, com as grandezas do terminal emissor **V_s** e **I_s** (lado da fonte) e do terminal receptor **V_r** e **I_r** (lado da carga).

Um diagrama esquemático simples da linha é mostrado na figura 2.1:

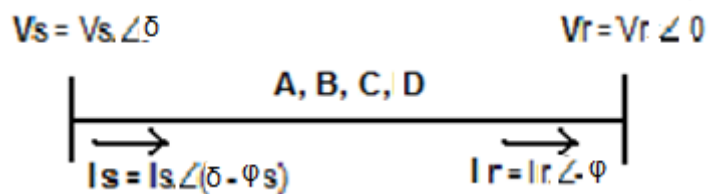


Figura 2.1 – Esquema de uma linha de transmissão

Em regime permanente, as equações da linha de transmissão, na sua forma exata, são definidas pelas expressões representativas do quadripolo, conforme segue:

$$V_s = A.V_r + B.I_r \quad (2.1)$$

$$I_s = C.V_r + D.I_r$$

No modelo, utilizam-se as tensões de linha (entre fases) e as correntes de fase (correntes de linha multiplicadas por $\sqrt{3}$), resultando para a potência aparente trifásica a expressão consistente **S = V.I***.

As constantes **A**, **B**, **C** e **D** são determinadas através das seguintes expressões:

$$A = \cosh (\gamma.l)$$

$$B = (Z_c). \sinh (\gamma.l) \quad (2.2)$$

$$C = (1/Z_c). \sinh (\gamma.l)$$

$$D = A$$

onde:

l = comprimento da linha

$$\gamma = \sqrt{Z.y} = \text{constante de propagação}$$

$$Z_c = \sqrt{Z / y} = \text{impedância característica}$$

$Z = r + j x = \text{impedância série por km } (\Omega/\text{km})$

$y = g + j b = \text{admitância shunt por km } (\Omega^{-1}/\text{km})$

As constantes podem ser expressas, em termos de módulo e ângulo, sob a forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= A \angle \alpha \\ \mathbf{B} &= B \angle \beta \\ \mathbf{C} &= C \angle \rho \\ \mathbf{D} &= D \angle \xi = A \angle \alpha \end{aligned} \quad (2.3)$$

Essa representação é geral, válida para todas as linhas, independentemente de serem longas, médias ou curtas, portanto, para qualquer comprimento e nível de tensão. Representações simplificadas podem ser adotadas, com a resistência **R**, reatância indutiva **X** e susceptância **B**, para linhas médias, e **R** e **X** para linhas curtas.

O sistema analisado considera uma fonte alimentando uma carga através da linha de transmissão. O modelo também é aplicável ao caso em que o sistema é representado pelo equivalente na barra de carga definido pela impedância vista da barra.

A análise inicial é feita considerando as cargas representadas por potência constante, ou pela potência efetiva da carga. Em seguida, um modelo é desenvolvido para as cargas representadas através de uma determinada relação funcional, variando com a tensão.

As características das cargas podem ser definidas pelas constantes **ks**, **kp** e **kq**, respectivamente em relação às potências aparente, ativa e reativa. Considerando a potência aparente, pode-se utilizar o modelo exponencial, da forma $\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 \cdot (\mathbf{V}/\mathbf{V}_0)^{ks}$, onde **S**₀ é a potência aparente na tensão de referência **V**₀. No caso da potência ativa, o modelo exponencial é da forma: $\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 \cdot (\mathbf{V}/\mathbf{V}_0)^{kp}$, onde **P**₀ é a potência ativa em **V**₀.

Representando as tensões e correntes sob a forma polar, essas variáveis podem ser expressas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s &= V_s \angle \delta \\ \mathbf{V}_r &= V_r \angle 0 \\ \mathbf{I}_s &= I_s \angle (\delta - \phi_s) \\ \mathbf{I}_r &= I_r \angle -\phi \end{aligned} \quad (2.4)$$

Os módulos das tensões são V_s na fonte e V_r na carga e os módulos das correntes I_s na fonte e I_r na carga. Os ângulos φ e φ_s correspondem às defasagens angulares entre as tensões e as correntes, respectivamente na carga e na fonte. A tensão na carga é adotada como referência, com ângulo igual a 0 (zero); δ é o ângulo da tensão na fonte.

A corrente na carga I_r é dada por: $I_r = (S_r/V_r)^*$

As equações correspondentes à tensão e à corrente, em (2.1), resultam em:

$$V_s \angle \delta = A.V_r \angle \alpha + B.I_r \angle (\beta - \varphi) \quad (2.5a)$$

$$I_s \angle (\delta - \varphi_s) = C.V_r \angle \rho + D.I_r \angle (\varepsilon - \varphi) \quad (2.5b)$$

A equação (2.5a), relativa à tensão, servirá como base na análise do colapso de tensão e do limite de transmissão, assim como no estudo das hipérboles de potência, conforme desenvolvimento nos itens seguintes. Para objeto deste estudo a equação (2.5b), relativa à corrente, não apresenta maior interesse, e aqui não terá desenvolvimentos.

A equação (2.5a) é complexa. O desdobramento nas partes reais e imaginárias, para as tensões, resulta em:

$$V_s \cos \delta = A.V_r \cos \alpha + B.I_r \cos(\beta - \varphi) \quad (2.6a)$$

$$V_s \sin \delta = A.V_r \sin \alpha + B.I_r \sin(\beta - \varphi) \quad (2.6b)$$

Elevando essas expressões ao quadrado e somando-as membro a membro, resulta a seguinte equação:

$$A^2.V_r^2 + 2.A.B.I_r \cos(\beta - \varphi - \alpha).V_r + B^2.I_r^2 - V_s^2 = 0 \quad (2.7)$$

Esta equação será utilizada nos desenvolvimentos seguintes, em todas as situações envolvendo colapso de tensão, limite de transmissão, características das cargas e hipérboles de potência.

3. O PROBLEMA DE COLAPSO DE TENSÃO

Uma grande variedade de trabalhos sobre estabilidade e colapso de tensão tem sido divulgada em diversos encontros técnicos e periódicos especializados pela atualidade e importância que o assunto vem tendo nos últimos anos.

Esta dissertação apresenta uma abordagem sobre o tema, considerando a linha de transmissão representada pelas constantes generalizadas. A análise é feita orientada para uma visualização gráfica das tensões em função das potências, em particular do ponto de colapso de tensão e o limite de transmissão.

É apresentado também o conceito de hipérboles de potência. No desenvolvimento do assunto mostram-se relações entre as equações de uma linha de transmissão e propriedades da hipérbole. São traçados os diagramas hiperbólicos de potência, através dos quais se podem visualizar também as condições de colapso de tensão e do limite de transmissão de potência.

O método desenvolvido considera um sistema de potência simples constituído de duas barras, sendo a linha de transmissão correspondente representada pelo modelo exato, utilizando as equações generalizadas, que estabelecem as relações entre tensões e correntes através do quadripolo descritor da linha, com as constantes **A**, **B**, **C** e **D**. Então, é determinada a expressão que permite o traçado dos gráficos.

Através de transformações adequadas dessas equações obtém-se uma função que pode ser associada a uma hipérbole. Aplicando-se então propriedades da hipérbole são deduzidas algumas relações para a linha de transmissão, destacando-se, em particular, as que se referem ao limite de transmissão de potência e ponto de colapso de tensão.

Os resultados encontrados permitem a construção de curvas $V \times P$ e $V \times S$, bem como os diagramas de hipérboles, mostrando as variações das tensões na barra receptora com as variações das cargas nessa barra. Verifica-se também a influência da tensão na fonte, como barra emissora ou de referência, nos resultados obtidos na carga, como barra receptora, indicados nessas curvas. Os diagramas mostram então o

comportamento do sistema nas regiões de operação normal, ou de estabilidade de tensão, e na região de instabilidade, assim como o ponto de colapso de tensão.

O método é útil na análise de sistemas radiais, bem como na análise das condições de fluxo de potência de determinadas linhas do sistema e seus limites de transmissão, não havendo limitações de nível de tensão e comprimento de linhas. Adiante, nos capítulos 4, 5 e 6, são mostradas aplicações dos métodos desenvolvidos, considerando alguns casos específicos de sistemas em diferentes níveis de tensão de transmissão.

Inicialmente a análise do problema de colapso será feita considerando a situação em que as cargas são representadas como potência constante. Partindo da equação (2.7), e observando que nessa condição $S = S_0 = \text{constante}$ (módulo da potência aparente) e $I_r = S/V_r$ (módulo da corrente), chega-se à seguinte equação:

$$A^2.Vr^2 + 2A.B.S.\cos(\beta - \varphi - \alpha) + B^2.S^2.Vr^{-2} - Vs^2 = 0 \quad (3.1)$$

Essa equação equivale à seguinte:

$$A^2.Vr^4 + (2A.B.S.\cos(\beta - \varphi - \alpha) - Vs^2).Vr^2 + B^2.S^2 = 0 \quad (3.2)$$

A solução dessa equação bi-quadrada, de sinal positivo por ser módulo de tensão, é o valor de V_r , que resulta na seguinte expressão:

$$Vr = \sqrt{\frac{-K \pm \sqrt{K^2 - (2A.B.S)^2}}{2A^2}} \quad (3.3)$$

onde: $K = 2A.B.S.\cos 2\lambda - Vs^2$, $\lambda = (\beta - \varphi - \alpha)/2$

A expressão (3.3) indica dois valores para V_r para cada valor de S . A representação gráfica dessa expressão resulta numa curva $V_r=f(S)$ ou $V_r \times S$. Nessa curva são visualizados os valores de V_r para cada S , ficando o maior na região de operação estável e o menor na região instável; no limite os valores de V_r são coincidentes.

Como exemplo, a Figura 3.1 mostra a representação gráfica para uma linha de 230 kV, condutor ACSR 636.0 MCM, com 200 km de comprimento, espaçamento equivalente entre os condutores de 10 m e fator de potência na carga de 0,9 indutivo (gráfico obtido através do Matlab). Os parâmetros utilizados foram $R=20,98 \, \Omega$, $X_L=104,14 \, \Omega$ e

$X_C=15,98 \times 10^4 \, \Omega$, resultando: $\mathbf{A}=0,968 \angle 0,38^\circ$, $\mathbf{B}=96,44 \angle 78,73^\circ$, $\mathbf{C}=6,776 \times 10^{-4} \angle 90,13^\circ$ e $\mathbf{D}=\mathbf{A}$ (utilizados os módulos: $A=0,968$ e $B=96,44$).

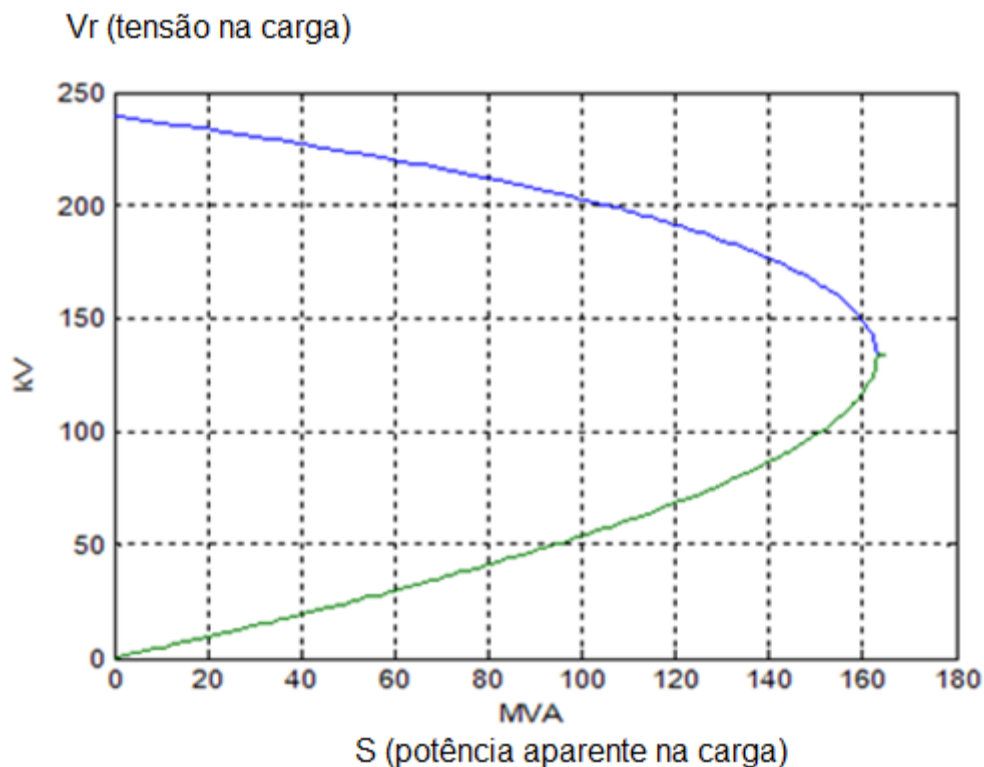


Figura 3.1– Exemplo para uma LT de 230 kV, 200 km

Observa-se pelo gráfico obtido que a potência limite é da ordem de 164 MVA, sendo o valor da tensão da ordem de 135 kV.

De forma semelhante, podem-se obter também curvas de tensões em função de potências ativas, isto é, $V = f(P)$ ou $V \times P$, com $S = P \cdot \cos \varphi$.

Variando o fator de potência da carga podem-se construir famílias de curvas, que podem ser representadas parametricamente no plano, como no exemplo acima, só que se obtendo mais de uma curva, como será mostrado mais adiante.

A representação espacial da função $V_r = f(S, \text{fp})$, ou $V_r = f(S, \cos \varphi)$, são superfícies que podem ser obtidas através de softwares adequados. A Figura 3.2 mostra um caso exemplo (gráfico obtido através do Matlab)..

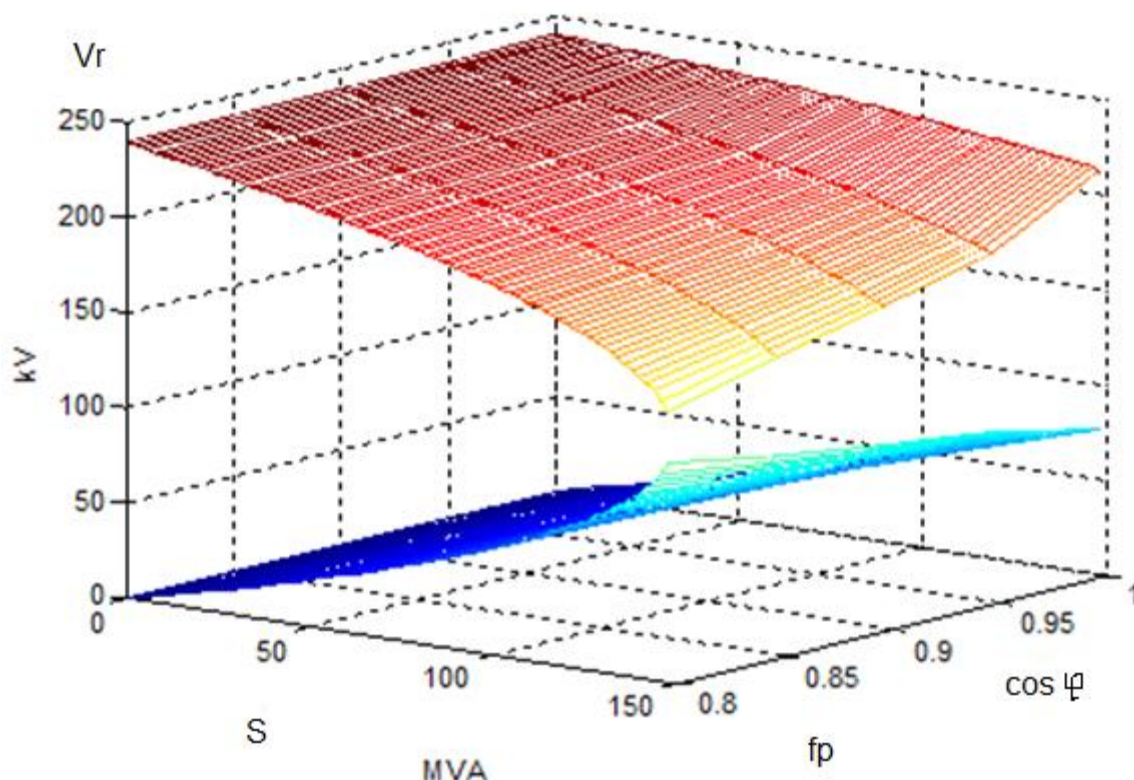


Figura 3.2– Exemplo para uma LT de 230 kV, 200 km, variando $\cos \varphi$

A partir da expressão (3.3), de $V_r = f(S)$, são determinadas as condições críticas para o sistema, obtendo-se como resultados os valores da potência limite $S = S_L$ e da tensão crítica $V_r = V_{rL}$.

Nessa condição limite, tem-se:

$$K^2 - (2A \cdot B \cdot S_L)^2 = 0 \quad (3.4)$$

resultando nas seguintes expressões:

$$(2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda - V_s^2)^2 - (2A \cdot B \cdot S_L)^2 = 0 \quad (3.5)$$

$$V_{rL} = \sqrt{\frac{-K}{2A^2}} = \sqrt{\frac{-(2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda - V_s^2)}{2A^2}} \quad (3.6)$$

A equação (3.5) apresenta duas soluções, através das equações:

$$(2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda - V_s^2) = +(2A \cdot B \cdot S_L) \quad (3.7)$$

$$(2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda - V_s^2) = -(2A \cdot B \cdot S_L) \quad (3.8)$$

De (3.7) tem-se:

$$V_s^2 = (2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda) - (2A \cdot B \cdot S_L) = 2A \cdot B \cdot S_L (\cos 2\lambda - 1) \quad (3.9)$$

De (3.8) tem-se:

$$V_s^2 = (2A \cdot B \cdot S_L \cdot \cos 2\lambda) + (2A \cdot B \cdot S_L) = 2A \cdot B \cdot S_L (\cos 2\lambda + 1) \quad (3.10)$$

Pode-se, então, determinar S_L em ambas as equações, (3.9) e (3.10), observando que $\cos 2\lambda = 2(\cos \lambda)^2 - 1$. Verifica-se que o valor de S_L é negativo na primeira equação sendo, portanto, inconsistente.

A solução consistente é obtida da equação (3.10), cujo resultado é:

$$S_L = \frac{V_s^2}{4A \cdot B (\cos \lambda)^2} \quad (3.11)$$

Substituindo este valor de S_L em (3.6), obtém-se o seguinte valor de V_{rL} :

$$V_{rL} = \frac{V_s}{2A \cdot \cos \lambda} \quad (3.12)$$

Esses valores correspondem, portanto, ao ponto de colapso de tensão e ao limite de transmissão; eles podem ser identificados facilmente nas figuras 3.1 e 3.2.

As expressões para a tensão na carga V_r assumem formas mais simples quando são consideradas as aproximações: $\mathbf{A} \approx 1 \angle 0$ e $\mathbf{B} \approx \mathbf{Z} \angle \theta$, que correspondem à representação simplificada da linha de transmissão com $\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\mathbf{X}$, ou quando se usa o equivalente do sistema na barra de carga em estudo.

De forma semelhante, pode-se determinar os valores de V_r , V_{rL} e S_L para os casos de representação da carga por corrente constante e impedância constante, utilizando-se das relações funcionais correspondentes.

Sendo dados os valores das constantes do quadripolo, da tensão da fonte e da carga, são determinados a tensão no ponto receptor, a capacidade limite de transmissão, a tensão crítica, o ponto em que ocorre o colapso, as regiões de operação estável e de instabilidade do sistema e a sensibilidade da tensão em relação à carga.

São considerados na análise do colapso de tensão os efeitos das variações do fator de potência ou da compensação de reativos da carga, destacando-se as representações das cargas por potência constante, corrente constante e impedância constante; a influência da compensação série também é incorporada ao estudo.

Um programa de computador foi elaborado com a finalidade de fornecer o comportamento da linha de transmissão para as diversas situações especificadas. Através desse programa são traçadas as curvas correspondentes à tensão na carga em função da potência aparente e fator de potência. De forma semelhante, podem ser obtidas as curvas da tensão na carga em função da potência ativa e do fator de potência, ou da potência ativa e potência reativa. Um fluxograma simplificado do programa está mostrado no Anexo 1.

Como resultado final tem-se uma ferramenta de aplicação simples, com resultados rápidos e precisos, e que tem aplicação na análise de muitas situações práticas, com destaque para sistemas radiais, em elos de transmissão, podendo assim se obter o comportamento da tensão de uma barra qualquer utilizando o sistema equivalente (R , X) correspondente a essa barra. Pode ser utilizado também como apoio aos estudos realizados pelos programas computacionais de grande porte.

Os estudos assim desenvolvidos são aplicáveis na operação e no planejamento do sistema, permitindo, com a identificação das situações em que possam ocorrer colapso e instabilidade de tensão, o estabelecimento de medidas para se evitar a ocorrência desses problemas, bem como uma maior utilização da capacidade de transmissão das instalações existentes.

4. INFLUÊNCIA DA MODELAGEM DAS CARGAS

4.1. Introdução

Os estudos dos problemas associados a instabilidade e colapso de tensão têm considerado, em geral, as cargas como sendo do tipo potência constante, isto é, as potências não variando com as tensões. Entretanto, tem crescido bastante o número de publicações tratando da influência dos modelos das cargas na operação do sistema, em particular, nos limites de transmissão e colapso de tensão.

As características das cargas são então consideradas no sistema constituído pela fonte, linha de transmissão e receptor, ou no sistema representado pelo equivalente visto da barra objeto de análise das condições de colapso, incluindo a utilização dos modelos básicos para as cargas.

As cargas são representadas como funções da tensão, expressas através de funções potência utilizando, portanto, o modelo exponencial, em que a tensão é elevada a um determinado expoente. Assim, a potência aparente assume a seguinte forma:

$$S = S_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{ks} \quad (4.1)$$

Expressões semelhantes podem ser apresentadas para potência ativa e potência reativa:

$$P = P_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{kp} \quad \text{e} \quad Q = Q_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{kq} \quad (4.2)$$

Os valores de ks , kp e kq definem as características das cargas, respectivamente em relação às potências aparente, ativa e reativa.

São analisadas as seguintes situações particulares, para potência aparente:

- Potência constante ($ks=0$): $S = S_0$ (4.3a)

- Corrente constante ($ks=1$): $S = S_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)$ (4.3b)

- Impedância constante ($ks=2$): $S = S_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^2$ (4.3c)

O colapso de tensão ocorre no sistema quando a potência transmitida tender a ultrapassar o limite de capacidade de transmissão e não houver medidas para solucionar sobrecargas, resultando numa redução de tensão, tendendo a zero.

Para cargas tipo potência constante essa situação é mais grave, pois o valor nominal das cargas permanece o mesmo com a redução da tensão. É uma situação mais conservativa, usada principalmente em planejamento, que estabelece folgas para o sistema, desde que haja disponibilidade de recursos suficientes para isso. Em operação essa modelagem pode apresentar resultados que se afastam dos valores reais.

No caso de corrente constante a potência resultante é reduzida proporcionalmente com a tensão e a possibilidade de ocorrência de colapso se dá para um valor nominal de potência muito maior, mantendo uma situação mais estável para o sistema. Para cargas tipo impedância constante a potência resultante é muito mais reduzida, variando com o quadrado da tensão, e não há fenômeno de colapso e instabilidade de tensão, pois a tensão tenderia a zero caso a carga crescesse indefinidamente.

Sob os aspectos de sensibilidade da tensão em relação à carga, esse indicador mostra, para o caso de potência constante, o crescimento acentuado do seu valor na região próxima ao ponto crítico, tornando-se infinita nesse limite. Para corrente constante a sensibilidade é semelhante ao caso de potência constante, com a diferença de que seu valor na região estável é inferior ao caso de potência constante, e torna-se infinita para potências limites maiores. A sensibilidade para o caso de impedância constante, embora possa crescer inicialmente, passa a decrescer gradativamente com o aumento da potência, tendendo a zero.

Sistemas com cargas de características compostas podem ser analisados como situações intermediárias a partir dos casos básicos. Uma análise quantitativa do problema de colapso de tensão e a influência das características das cargas pode ser feita utilizando as equações da linha de transmissão na forma complexa ou na forma real explícita. A equação a ser utilizada é a (2.5).

Para o caso geral, em que $S = S_0 \cdot (V/V_0)^{ks}$ e $I_r = S_r/V_r$ resulta a seguinte equação:

$$A^2 \cdot V_r^2 + (2A \cdot B \cdot S_0 \cdot V_r^{-ks} \cdot \cos 2\lambda) V_r^2 + (B \cdot S_0 \cdot V_r^{-ks}) V_r^{2(ks-1)} - V_s^2 = 0 \quad (4.4)$$

A solução indicaria o valor da tensão na carga em função da potência aparente e do fator de potência, bem como das constantes da linha e da tensão de referência.

5.2. Análise dos Casos Básicos

Para as situações particulares de potência constante, corrente constante e impedância constante têm-se as seguintes expressões resultantes:

a) Potência Constante ($k_s=0$):

$$Vr = \sqrt{\frac{-K \pm \sqrt{K^2 - (2A.B.S)^2}}{2A^2}} \quad (4.5)$$

onde: $K = 2A.B.S.\cos 2\lambda - Vs^2$, $\lambda = (\beta - \phi - \alpha)/2$

b) Corrente Constante ($k_s=1$):

$$Vr = -K \pm \sqrt{K^2 - \left(\left(\frac{B.S_0}{A.V_0}\right)^2 - \left(\frac{Vs}{A}\right)^2\right)} \quad (4.6)$$

onde: $K = \left(\frac{B.S_0}{A.V_0}\right)\cos 2\lambda$

c) Impedância Constante ($k_s=2$):

$$Vr = \frac{Vs}{\sqrt{A^2 + \left(\frac{2A.B.S_0}{V_0^2}\right)^2 \cos 2\lambda + \left(\frac{B.S_0}{V_0^2}\right)^2}} \quad (4.7)$$

No caso de potência constante as condições críticas são determinadas através das expressões (3.11) e (3.12), vistas anteriormente, isto é:

$$S_L = \frac{Vs^2}{4A.B.(\cos \lambda)^2} \quad \text{e} \quad Vr_L = \frac{Vs}{2A.\cos \lambda}$$

Para corrente constante as expressões nas condições limites tomam as seguintes formas:

$$S_L = \frac{V_0.Vs}{B.\sin 2\lambda} \quad (4.8)$$

$$Vr_L = \frac{-Vs}{A.\tan 2\lambda} \quad (4.9)$$

Observa-se que nesse caso de corrente constante a condição $V_r = 0$ implica:

$$S = \frac{V_0 \cdot V_s}{B}$$

No caso de impedância constante pode-se verificar que a tensão tende assintoticamente a zero quando a potência cresce indefinidamente, isto é:

$$V_r \rightarrow 0 \text{ quando } S \rightarrow \infty.$$

As expressões para a tensão na carga V_r assumem formas mais simplificadas quando são consideradas as aproximações: $\mathbf{A} \approx 1 \angle 0$ e $\mathbf{B} \approx Z \angle \theta$, que correspondem à representação simplificada da linha de transmissão ou ao equivalente do sistema na barra de carga em estudo. As novas expressões resultam:

a) Potência constante:

$$V_r = \sqrt{\frac{-K \pm \sqrt{K^2 - (2Z \cdot S_0)^2}}{2}} \quad (4.10)$$

$$\text{onde: } K = 2Z \cdot S_0 \cos(\theta - \varphi) - V_s^2$$

b) Para corrente constante:

$$V_r = -K \pm \sqrt{K^2 - \left(\frac{Z \cdot S_0}{V_0}\right)^2} \quad (4.11)$$

$$\text{onde: } K = \frac{Z \cdot S_0}{V_0} \cos(\theta - \varphi)$$

c) Para impedância constante:

$$V_r = \frac{V_s}{\sqrt{1 + \left(Z \cdot \frac{S_0}{V_0^2}\right)^2 + \left(2Z \cdot \frac{S_0}{V_0^2}\right) \cos(\theta - \varphi)}} \quad (4.12)$$

4.3. Análise de Sensibilidade

A sensibilidade do sistema $\mathbf{s}$, definida pela variação de tensão na carga, em relação à variação da potência aparente, é expressa por: $s_s = \frac{dV_r}{dS}$, e em relação à potência ativa

$$\text{por: } s_p = \frac{dV_r}{dP}.$$

Para os casos especiais em estudo, a sensibilidade em relação à potência aparente pode ser determinada pelas seguintes expressões:

a) Potência constante:

$$S_s = -\frac{B}{2V_s} \left(\cos 2\lambda + \frac{K \cos 2\lambda + 2A.B.S}{K^2 - (2Z.S_0)^2} \right) \quad (4.13)$$

A sensibilidade dada por esta expressão, e observada através da curva $V \times S$, apresenta-se negativa na parte superior da curva, embora possa ser positiva na sua parte inicial, em que a carga é baixa ou a linha está em vazio. Na parte inferior da curva é sempre positiva. No ponto de colapso ela se torna infinita.

b) Corrente constante:

$$S_s = -\frac{B}{2V_0} \left(\cos 2\lambda - \frac{(\sin 2\lambda)^2}{\sqrt{\frac{V_0.V_s}{B.S_0} - (\sin 2\lambda)^2}} \right) \quad (4.14)$$

Neste caso, a sensibilidade é, em geral, negativa. Raramente assume valores positivos no início da curva, ou torna-se infinita por atingir raramente o ponto de colapso.

c) Impedância constante:

$$S_s = \frac{B.V_s}{V_0^2} \left(\frac{A.\cos 2\lambda + \frac{B.S_0}{V_0^2}}{\sqrt{A^2 + \left(\frac{2A.B.S_0}{V_0^2} \right) \cos 2\lambda + \left(\frac{B.S_0}{V_0^2} \right)^2}} \right) \quad (4.15)$$

Neste caso, a sensibilidade é, em geral, negativa. Raramente assume valores positivos no início da curva e não se torna infinita por não haver ponto de colapso.

5.4 Compensação de Reativos

A compensação de reativos, tanto em derivação como série, exerce uma influência considerável nas condições de colapso e instabilidade de tensão,

Através das expressões já apresentadas pode-se verificar a influência da compensação em derivação variando o fator de potência das cargas. Com o aumento do fator de potência ocorre um aumento da capacidade de transmissão e, conseqüentemente, uma melhora no desempenho do sistema e nas condições de colapso e instabilidade de tensão. Isso ocorre, no entanto, com valores mais elevados de tensão e comprimento

da linha, podendo atingir valores da ordem da tensão operativa do sistema. Evidentemente que com o aumento excessivo da compensação de reativos, tornando o fator de potência muito capacitivo, essa situação passa a se inverter.

A utilização de compensação série também contribui muito favoravelmente para a melhoria do desempenho do sistema e das condições de colapso e instabilidade de tensão. Neste estudo o exemplo considera a compensação série no lado da carga, ou seja, está no terminal receptor em série com a linha de transmissão, ou com o equivalente do sistema nesse terminal.

As expressões para o estudo do capacitor série decorrem da composição dos seguintes quadripolos correspondentes ao sistema e ao capacitor resultando, com o capacitor no lado da carga, na equação:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

O quadripolo composto apresenta, portanto, as seguintes constantes:

$$\begin{aligned} A' &= A \\ B' &= B - j A.X_c \\ C' &= C \\ D' &= D - j C.X_c \end{aligned} \quad (4.17)$$

Com o capacitor no lado da fonte, resulta a equação:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

As constantes do quadripolo composto são:

$$\begin{aligned} A' &= A - j C.X_c \\ B' &= B - j D.X_c \\ C' &= C \\ D' &= D \end{aligned} \quad (4.19)$$

O modelo desenvolvido pode ser utilizado na análise de casos específicos e uma visualização gráfica pode ser apresentada. Podem, então, ser encontrados resultados para os casos de interesse, considerando os diversos aspectos abordados neste

trabalho. Resultados para outras composições podem ser obtidos de forma semelhante.

4.5 Exemplos e Aplicações

Alguns exemplos e aplicações são apresentados a seguir, utilizando os modelos desenvolvidos em casos específicos, com uma visualização gráfica para cada caso.

Os gráficos para variação da tensão em função da potência aparente, $V_r \times S$ (MVA), foram obtidos variando o fator de potência, sem e com capacitor série, no final da linha, para condições de potência constante, corrente constante e impedância constante. Gráficos semelhantes podem ser obtidos com variação de potência ativa, $V_r \times P$ (MW).

Para uma determinada condição de carga, pode ser avaliada a sensibilidade da tensão em relação à potência aparente e à potência ativa, bem como os valores das perdas, a regulação e o ângulo entre a tensão na fonte e no receptor. Não há limitações de comprimento e nível de tensão das linhas.

Como exemplo, alguns resultados são apresentados através de gráficos ilustrativos determinados para o caso de uma linha de transmissão de 138 kV, 200 km, condutor ACSR 636 MCM.

Utilizando uma torre típica, com espaçamento equivalente de 6 m, podem ser usados valores típicos para a resistência, reatância indutiva e reatância capacitiva, a partir dos quais são determinadas as constantes **A**, **B**, **C** e **D**. Neste caso, foram usados os valores: $R=20,98 \ \Omega$, $X_L=96,44 \ \Omega$ e $X_C=14,76 \times 10^4 \ \Omega$, resultando: **A**=0,968 $\angle$ 0,42°, **B**=96,44 $\angle$ 77,86°, **C**=6,776 $\times 10^{-4}$ $\angle$ 90,14° e **D**=**A**.

Os gráficos seguintes apresentam diversos casos analisados. As curvas representam as tensões V_r (pu) em função das potências aparentes S (MVA), considerando as influências dos modelos das cargas, dos fatores de potência e de compensação série.

A Figura 4.1 mostra as curvas para carga tipo potência constante e os fatores de potência indutivos (0,2; 0,9 e 1,0) e capacitivo (-0,9).

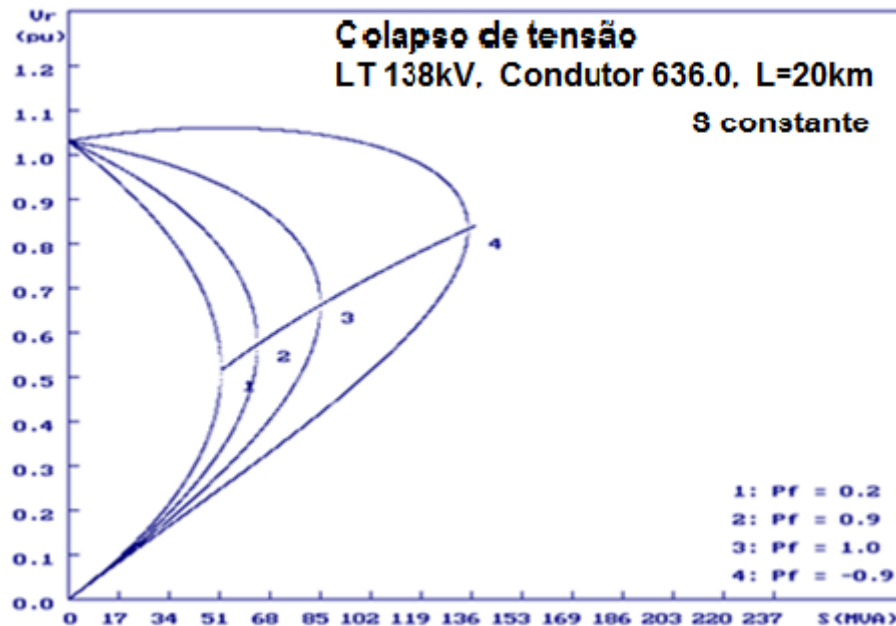


Figura 4.1 - Curvas para cargas tipo potência constante

Pode-se observar pela Figura 4.1 como a capacidade de transmissão e o ponto de colapso crescem com o aumento da compensação de reativos. Essa variação torna-se mais acentuada com fatores de potências capacitivos, podendo-se verificar tensões no ponto de colapso da ordem de grandeza das tensões operativas.

Embora seja importante que a linha transfira o máximo de potência, utilizando-se de compensação de reativos, sua operação muito próxima do ponto de colapso deve ser evitada, para não ocorrer situações de instabilidade de tensão.

A Figura 4.2 mostra as curvas para carga tipo corrente constante e os mesmos fatores de potência anteriores.

As observações neste caso podem ser semelhantes ao caso anterior, quanto à influência da compensação de reativos na capacidade de transmissão e no ponto de colapso. Esses valores, no entanto, são mais elevados, e o ponto de colapso dificilmente chega a ser alcançado.

Com a redução da potência proporcionalmente com a tensão, este caso fica praticamente semelhante ao de potência constante, considerando-se, porém, os valores para a potência efetiva resultante.

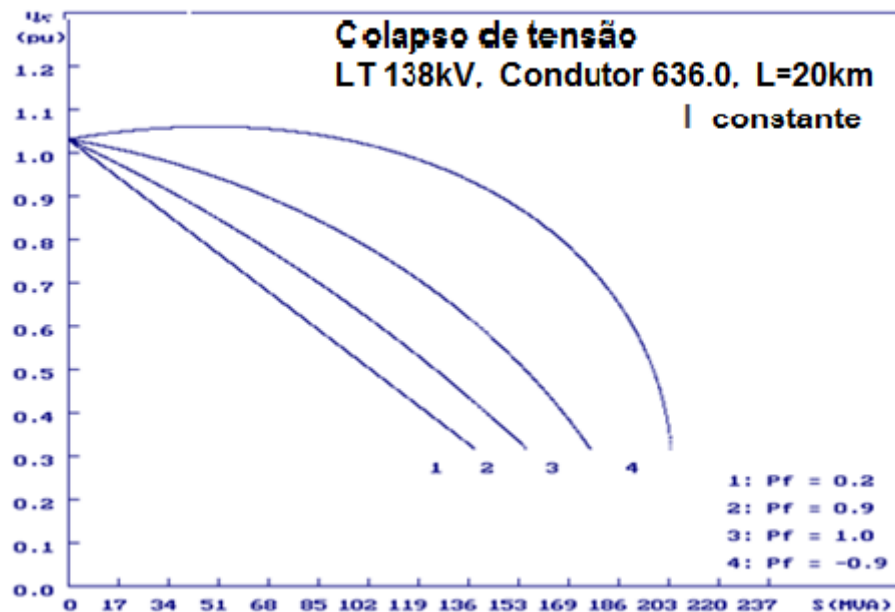


Figura 4.2 - Curvas para cargas tipo corrente constante

A Figura 4.3 mostra as curvas para carga tipo impedância constante e os mesmos fatores de potência anteriores.

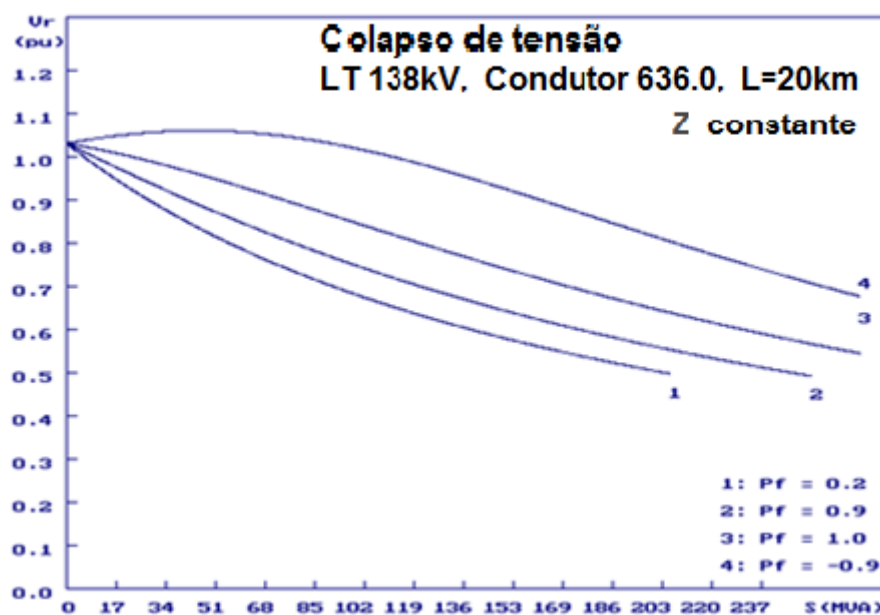


Figura 4.3 - Curvas para Cargas tipo Impedância Constante

Neste caso, com a variação das potências com o quadrado das tensões, praticamente não há condição de colapso e a potência transmitida pode crescer bastante. No entanto, com a potência efetiva resultante o caso pode se tornar semelhante ao de potência constante.

As Figuras 4.4 e 4.5 mostram simultaneamente as curvas para cargas tipo potência constante, corrente constante e impedância constante para os fatores de potência indutivo (+0,9) e capacitivo (-0,9).

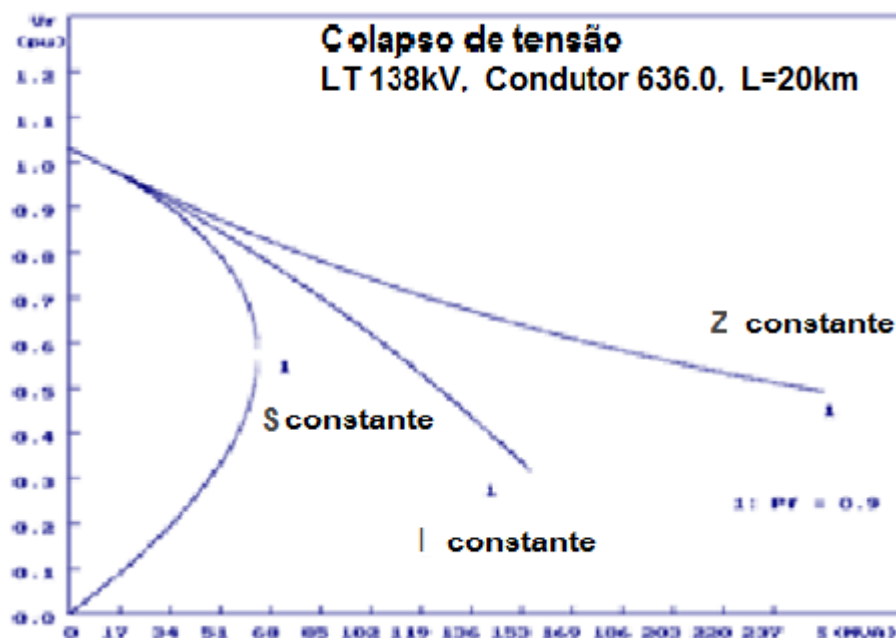


Figura 4.4 - Curvas para cargas tipos potência, corrente e impedância constante, fator de potência 0,9 indutivo

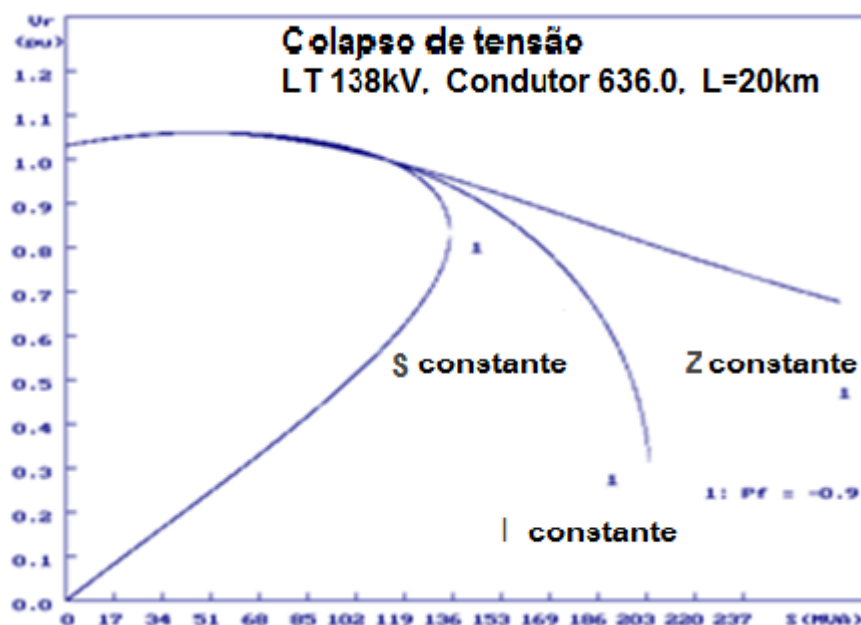


Figura 4.5 – Curvas para cargas tipos potência, corrente e impedância constante, fator de potência 0,9 capacitivo

Pode-se verificar nestes casos, reunindo-se as curvas dos três casos anteriores, com mesmo fator de potência $\text{fp}=0,9$, como a modelagem da carga exerce forte influência nos resultados sobre os limites de transmissão e colapso de tensão. Normalmente são dadas as cargas nas barras do sistema e a análise é feita considerando o modelo de potência constante. Os resultados são praticamente equivalentes nos três casos para valores de carga relativamente baixos e de tensões próximas à nominal.

Observa-se também que, para fatores de potência capacitivos, os resultados para os três modelos praticamente são equivalentes para uma faixa maior de valores de carga, com as tensões próximas a nominal.

A Figura 4.6 mostra as curvas para cargas tipo potência constante fator de potência 0,9 (indutivo), sem e com capacitor série (grau de compensação: $X_C/X_L=1,2$).

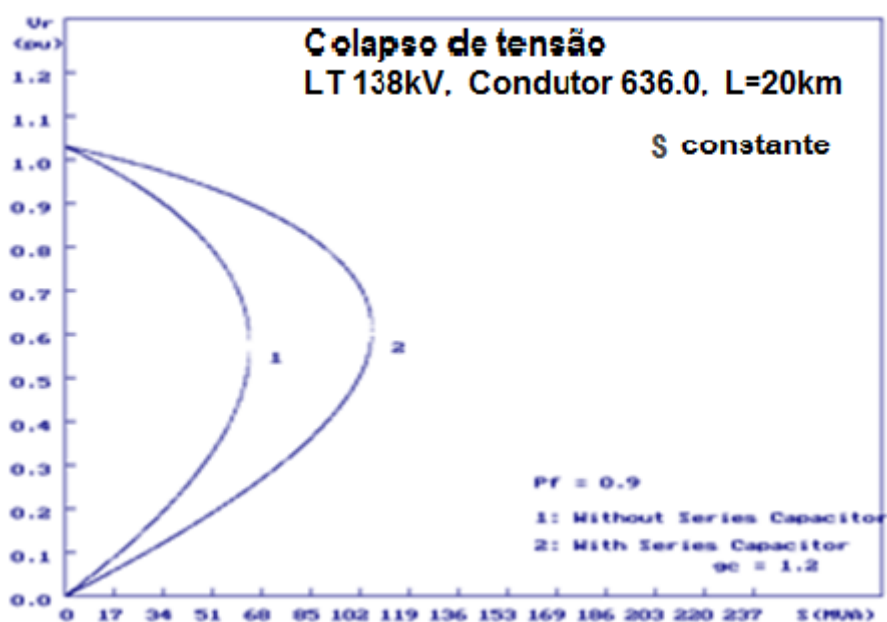


Figura 4.6 - Curvas para cargas tipos potência constante, sem e com capacitor série

Pode-se verificar, neste caso, a forte influência da compensação série no aumento da potência transmitida e na condição de colapso. As curvas são deslocadas para a direita, mantendo a tensão no ponto de colapso afastada das tensões normais de operação, o que representa melhor condição de estabilidade do sistema. O grau de compensação empregado $\text{gc}=1,2$ é elevado por se tratar de subtransmissão; na transmissão é mais usual valores da ordem de 0,4.

Os gráficos mostram, portanto, resultados da análise com o modelo utilizado na avaliação de colapso e instabilidade de tensão considerando as características de carga, em particular as situações básicas de potência constante, corrente constante e impedância constante.

Verifica-se que não há grandes diferenças nos resultados sobre o comportamento do sistema, quando são considerados diferentes modelos de carga em relação ao modelo mais usual de potência constante, quando as tensões estão próximas da tensão nominal ou as cargas são baixas. No entanto, o uso de modelos mais precisos para as cargas e para os componentes do sistema certamente irá conduzir a análise do sistema, incluindo o colapso de tensão e instabilidade, a resultados mais exatos e, portanto, mais realistas e confiáveis.

A utilização do método aqui desenvolvido nas situações indicadas, considerando um sistema simples, mostra também o potencial de sua aplicação em sistemas de grande porte, em casos complexos, como em análise dinâmica e determinação dos fluxos de potência do sistema operando próximo ao seu limite de operação.

5. DIAGRAMAS HIPERBÓLICOS

5.1 Fundamentos

A representação gráfica do fenômeno de estabilidade e colapso de tensão tem sido feita usualmente através das curvas $\mathbf{V} \times \mathbf{P}$, conforme visto anteriormente, e $\mathbf{V} \times \mathbf{Q}$. Outra possibilidade para essa representação é através de diagramas hiperbólicos de potência, que permite também visualizar a estabilidade e o colapso de tensão e avaliar a capacidade de transmissão em sistemas radiais.

Tradicionalmente, têm sido empregados nos estudos de linhas de transmissão os denominados diagramas circulares de potência para se visualizar o comportamento das variáveis envolvidas, na operação em regime permanente [66].

A partir da equação $V_s \angle \delta = A.V_r \angle \alpha + B.I_r \angle (\beta - \varphi)$, conforme (2.5a), é determinada a expressão para a potência complexa $\mathbf{S} = \mathbf{S}_r$, no receptor:

$$\mathbf{S}_r = P_r + jQ_r = \frac{V_s.V_r}{B} \angle (\beta - \delta) - \frac{A.V_r^2}{B} \angle (\beta - \alpha) \quad (5.1)$$

A potência ativa P_r e a reativa Q_r são dadas por:

$$P_r = \frac{V_s.V_r}{B} \cos(\beta - \delta) - \frac{A.V_r^2}{B} \cos(\beta - \alpha) \quad (5.2)$$

$$Q_r = \frac{V_s.V_r}{B} \sin(\beta - \delta) - \frac{A.V_r^2}{B} \sin(\beta - \alpha) \quad (5.3)$$

Através de uma adequada representação das variáveis num plano, com P_r no eixo horizontal, Q_r no eixo vertical e início de $\mathbf{S}_r$ na origem dos eixos, o extremo de $\mathbf{S}_r$ descreve uma circunferência com as variações de potências e tensões.

Os diagramas circulares, embora pouco usados atualmente pelas concessionárias de energia, deram contribuições importantes para o entendimento do comportamento da linha de transmissão, e ainda se mantém como um bom instrumento didático de análise. Esses estudos consideram a linha representada pelas constantes $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{D}$.

O método das hipérboles de potência, aqui desenvolvido, apresenta algumas idéias básicas semelhantes ao método dos círculos de potência. No entanto, a abordagem conduz a hipérboles ao invés de circunferências. O método considera basicamente um

sistema radial, constituído de duas barras. A linha de transmissão correspondente é representada pelo modelo exato, utilizando as equações generalizadas, que estabelecem as relações entre correntes e tensões da linha com as constantes **A**, **B**, **C** e **D**. Essas equações assumem uma forma que pode ser associada a uma hipérbole e, em função disso, o comportamento da linha de transmissão pode ser analisado a partir de algumas propriedades da hipérbole.

Os resultados encontrados permitem a construção de diagramas de hipérboles, mostrando as variações das tensões na barra receptora com as variações das cargas nessa barra; verifica-se também a influência da tensão na barra emissora ou de referência no traçado dessas curvas. Os diagramas hiperbólicos mostram então o comportamento do sistema nas regiões de operação normal e na região de instabilidade de tensão, assim como o ponto de colapso de tensão e o limite de transmissão.

O traçado das hipérboles é feito através de um programa computacional, partindo das equações da linha de transmissão, conforme indicado em [4]. Pode-se estabelecer uma correspondência entre os gráficos dessas hipérboles com as usuais curvas tensão x potência (curvas $V \times P$ ou $V \times S$), utilizadas na análise de estabilidade de tensão.

Algumas aplicações são apresentadas a seguir, considerando particularmente casos específicos de sistemas radiais nas tensões de 69 kV, 138 kV e 230 kV, embora não haja restrições quanto ao nível de tensão e comprimento de linhas, podendo ter aplicações desde a distribuição até a transmissão em linhas longas.

Embora o estudo enfatize sistemas radiais, ele pode ser útil também na análise das condições de transferência de potência em linhas de um sistema e na determinação de seus limites de transmissão, podendo contribuir na análise posterior do sistema global.

As aplicações consideram as influências de alguns fatores que modificam a capacidade de transmissão, o ponto de colapso de tensão e condições de estabilidade de tensão, tais como compensação de reativos, compensação série, características das cargas e espaçamentos entre os condutores da linha e condutores de fase, cujos resultados podem ser obtidos quantitativamente e visualizados através dos diagramas hiperbólicos.

O sistema analisado considera uma fonte alimentando uma carga através de uma linha de transmissão. O modelo poderia ainda ser ajustado para aplicações ao caso em que o sistema fosse representado pela impedância equivalente na barra de carga.

São apresentados resultados considerando as cargas representadas por potência constante. Em geral, o método considera a potência efetiva da carga.

A equação correspondente à tensão está apresentada no capítulo 2, equação 2.5a, sob a seguinte forma:

$$Vs\angle\delta = A.Vr\angle\alpha + B.Ir\angle(\beta - \varphi) \quad (5.4)$$

Essa equação é o ponto de partida na análise do colapso de tensão e do limite de transmissão, assim como no estudo das hipérboles de potência, conforme desenvolvimento a seguir.

Basicamente o método parte dessa equação, definindo as grandezas M e N da seguinte forma:

$$\begin{aligned} M &= A.Vr \\ N &= B.S/Vr \end{aligned} \quad (5.5)$$

Verifica-se que o produto de M por N é uma constante, para uma dada potência S. Tem-se, então:

$$M.N = A.B.S \quad (5.6)$$

Os valores de M e N correspondem às componentes da tensão **Vs** nas direções $\angle\alpha$ e $\angle(\beta - \varphi)$. Sendo constante o produto desses valores, para uma dada potência S, a igualdade acima representa, portanto, uma hipérbole. As direções mencionadas são eixos oblíquos e correspondem às assíntotas da hipérbole.

Assim, para determinado valor de S pode-se visualizar graficamente, através de uma hipérbole, ou diagrama hiperbólico de potência, as componentes de Vs, a partir das quais fica determinado o valor de Vr. De forma mais abrangente pode ser feita uma avaliação paramétrica envolvendo os valores de S, Vs e Vr.

Utilizando algumas propriedades da hipérbole podem-se obter resultados importantes para o caso de uma linha de transmissão. Indicando no eixo de referência a tensão V_r , as assíntotas tem como direções os ângulos α e $\beta - \varphi$ e a bissetriz o ângulo $\lambda = (\beta - \varphi - \alpha)/2$. O valor de V_r pode ser obtido utilizando-se do triângulo de lados V_s , M e N .

A Figura 5.1 mostra, de forma esquemática, alguns elementos das hipérboles de potência associados à linha de transmissão. Nas aplicações os resultados e gráficos foram obtidos utilizando um programa de computador específico sobre linhas de transmissão e hipérboles de potência [4], conforme o fluxograma simplificado mostrado no Anexo 2.

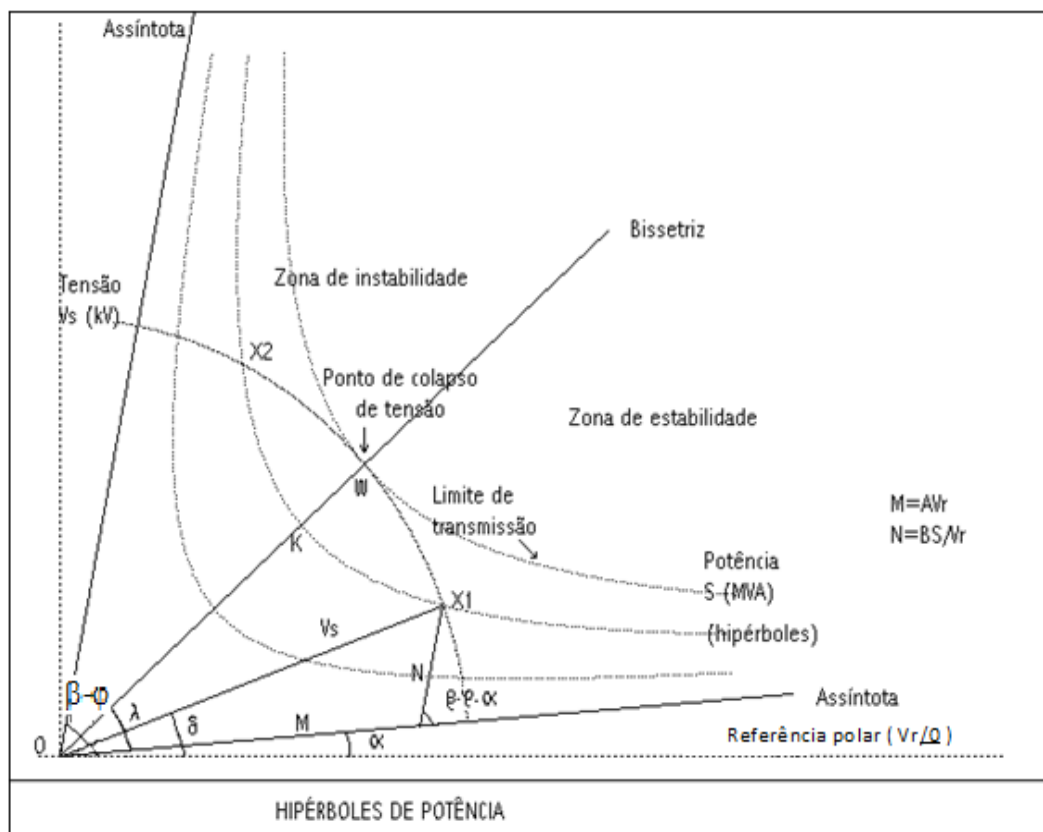


Figura 5.1 - Hipérboles de potência (esquema geral)

Verifica-se que, para uma determinada potência a ser transmitida S e para uma tensão da fonte V_s , o encontro da hipérbole em que S é constante com a circunferência em que V_s é constante verifica-se em dois pontos, localizando-se um deles na região de operação (à direita da bissetriz) e o outro na região de instabilidade (à esquerda da bissetriz). A cada um desses pontos corresponde um valor da tensão no receptor V_r .

Com a variação dos parâmetros, principalmente comprimento da linha de transmissão, as hipérbolas vão mudando de posição, em relação aos quadrantes. No caso base analisado elas estão no primeiro quadrante, mas em outras situações podem posicionar-se dentro dos demais quadrantes. O ângulo de abertura das bissetrizes depende, principalmente, do carregamento da linha.

O método é aplicável no estudo de linhas de transmissão em qualquer nível de tensão, podendo-se considerar variações nos dados referentes a temperatura do condutor, espaçamento equivalente da linha, número de condutores por fase e fatores de potência da carga. Pode ser utilizado também no estudo da linha de transmissão com acréscimo de capacitor série, especialmente no início ou no final da linha.

Para se determinar a potência limite de transmissão S_L , onde se faz corresponder o ponto de colapso de tensão, o valor de V_s corresponde ao semi-eixo transversal da hipérbole, para o qual vale a relação:

$$V_s = (2\sqrt{M \cdot N}) \cos \lambda \quad (5.7)$$

Observando que $M \cdot N = A \cdot B \cdot S_L$ e $V_{rL} = M/A$, obtém-se para a potência limite e para a tensão nessa condição as seguintes expressões:

$$S_L = \frac{V_s^2}{4A \cdot B (\cos \lambda)^2} \quad (5.8)$$

$$V_{rL} = \frac{V_s}{2A \cos \lambda} \quad (5.9)$$

Esses resultados são equivalentes aos encontrados anteriormente, conforme as expressões (3.4) e (3.5),

Pode-se determinar ainda a seguinte expressão, equivalente à (3.1):

$$A V_r^2 + 2A \cdot B \cdot S \cos 2\lambda + B \cdot S \cdot V_r^{-1} - V_s^2 = 0 \quad (5.10)$$

Tem-se também como resultado para V_r a seguinte expressão, que é equivalente à (3.3):

$$V_r = \sqrt{\frac{-K \pm \sqrt{K^2 - (2A \cdot B \cdot S)^2}}{2A^2}} \quad (5.11)$$

onde: $K = 2A \cdot B \cdot S \cdot \cos 2\lambda - V_s^2$, $\lambda = (\beta - \varphi - \alpha)/2$

A partir da expressão de V_r pode-se determinar também as condições críticas para o sistema, obtendo-se como resultados os valores da potência limite S_L e da tensão crítica V_{rL} indicadas anteriormente.

5.2 Exemplos e Aplicações

Para ilustrar o método, são apresentados, a seguir, alguns casos exemplos com aplicações. O primeiro exemplo mostra os diagramas hiperbólicos de potência (Figura 5.2) e estabelece uma comparação com o método das curvas $S \times V$ (Figura 5.3). Os demais casos (Figuras 5.4 a 5.9) apresentam exemplos adicionais de diagramas hiperbólicos.

A Figura 5.2 mostra as hipérboles de potência para o exemplo de uma linha de transmissão de $V_s=138$ kV, condutor ACSR 636 MCM, com fator de potência da carga unitário, isto é: $\text{fp}=1$ ($\cos\varphi=1$).

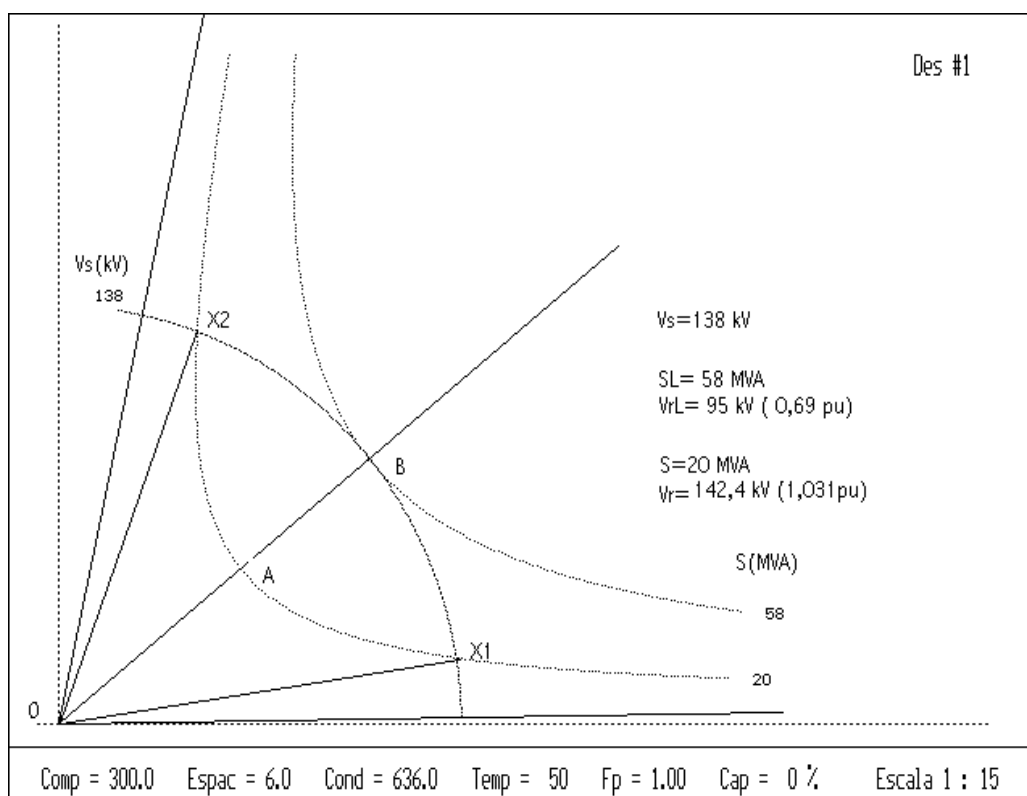


Figura 5.2 – Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV

Neste caso, para esclarecimentos adicionais, considerou-se uma linha de 300 km de comprimento, com uma configuração típica para suas estruturas (triangular, horizontal

ou vertical), apresentando um espaçamento equivalente de 6 m e uma temperatura dos condutores de 50° C.

Os valores obtidos para os parâmetros, constantes e características dessa linha são os seguintes:

- Parâmetros: $R=0,1049 \Omega/\text{km}$, $X_L=0,4822 \Omega/\text{km}$ e $X_C=0,3389 \text{ M}\Omega.\text{km}$;
- Constantes: $A=D=0,927\angle 0,96^\circ$, $B=144,4\angle 78,03^\circ$ e $C=9,917\times 10^{-4}\angle 90,31^\circ$;
- Características: $Z_c=381,6 \Omega$ e $\lambda=4887,3 \text{ km}$.

Neste diagrama podem-se observar apenas duas hipérboles, correspondentes às potências de 20 MVA e 58 MVA, sendo esta o limite de transmissão. As tensões no lado da carga são 142,4 kV e 95 kV, respectivamente, para a tensão de 138 kV na fonte, indicada no segmento circular. Estão representadas as assíntotas, a bissetriz, o ponto X1 na região estável e o ponto X2 na região de instabilidade.

A Figura 5.3 mostra as curvas $V \times S$, correspondente ao caso acima, em que é possível a visualização das correspondências entre ambas as representações gráficas.

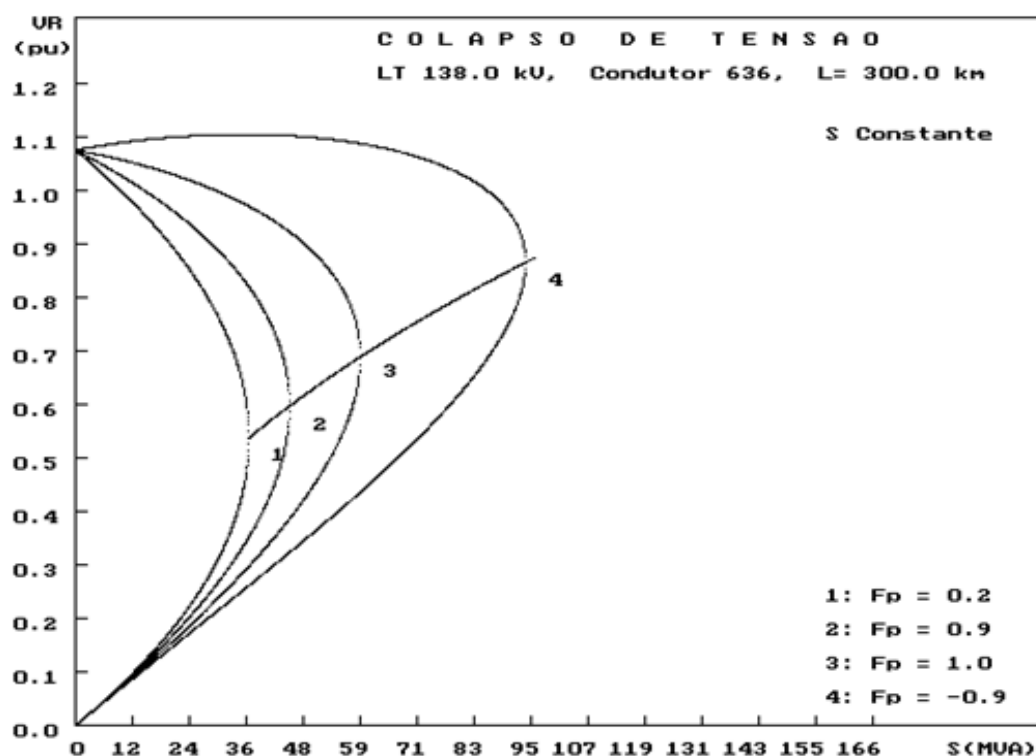


Figura 5.3 – Curvas $V \times S$ para um caso de LT 138 kV

Pode-se verificar, na ilustração da Figura 5.3, que para a tensão na fonte $V_s = 138$ kV, na curva 3 referente ao fator de potência $fp=1$, a potência limite de transmissão é $S_L = 58$ MVA e a correspondente tensão crítica na carga é $V_{rL} = 95$ kV (0,69 pu).

Para uma carga de $S = 20$ MVA tem-se as soluções (graficamente):

$V_{r1} = 142,4$ kV (1,031pu) - na região de operação

$V_{r2} = 21,9$ kV (0,158pu) - na região de instabilidade.

No diagrama hiperbólico, esses valores podem ser obtidos graficamente a partir dos valores de M e N, correspondentes aos pontos X1 e X2:

O caso da potência de 58 MVA indica a condição limite de operação e não há margem de estabilidade de tensão. Para potência inferior a esse valor pode-se observar, no gráfico das hipérboles, as figuras BAX1 e BOX1, cujas áreas podem ser consideradas como indicadores de margem de estabilidade de tensão. Em particular, em ambos os casos, pode ser observado o ponto crítico, correspondente à localização do colapso de tensão e limite de transmissão de potência aparente.

Observa-se que ambas as representações gráficas, além de mostrar resultados quantitativos, fornecem alguns subsídios que ajudam a visualização e compreensão dos problemas de colapso e instabilidade de tensão, assim como do limite de transmissão.

Os exemplos seguintes ilustram a exposição do método das hipérboles de potência. Nesses casos, não estão indicados aqui a configuração da estrutura nem os parâmetros e as constantes resultantes.

A Figura 5.4 mostra o caso de uma linha de transmissão de 69 kV, condutor ACSR 336.4 MCM, 100 km de comprimento e fator de potência da carga $fp = 0,9$ indutivo, espaçamento equivalente 4,0 m.

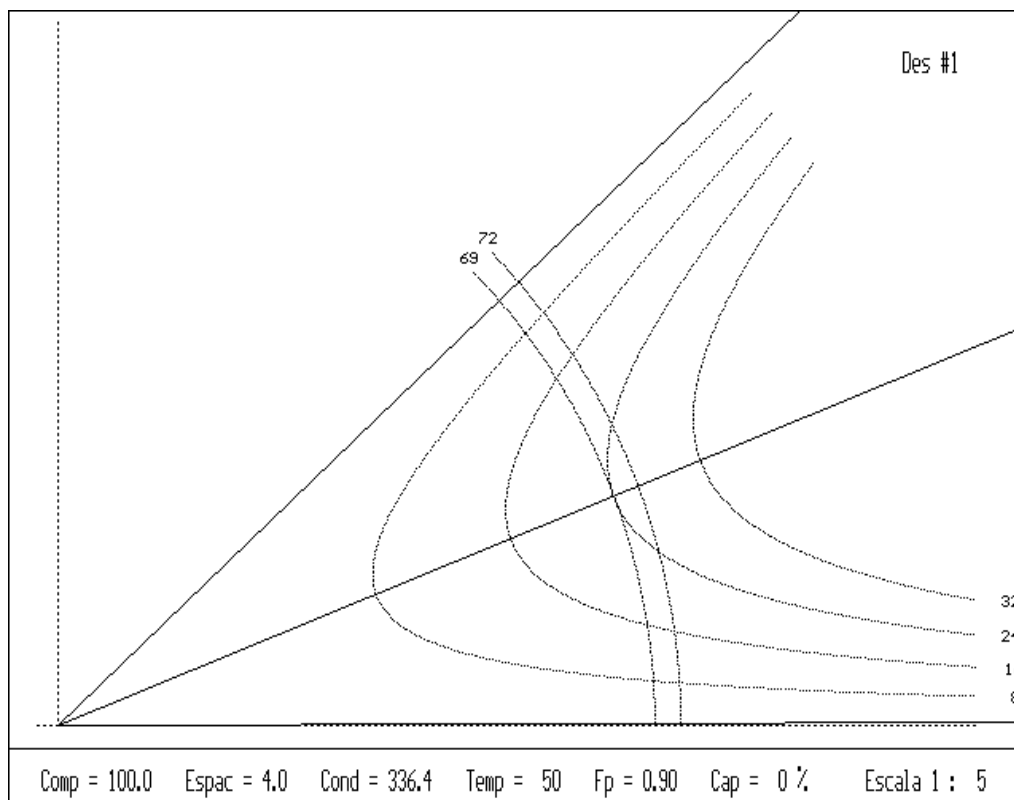


Figura 5.4 - Hipérboles de potência para um caso de LT 69 kV

Este caso apresenta as hipérboles nas potências 8 MVA, 16 MVA, 24 MVA e 32 MVA e as curvas das tensões de 69 kV e 72 kV. Na tensão de 69 kV, por exemplo, a potência limite é 24 MVA; potências com valores acima desse limite poderiam ser alcançada com tensões mais elevadas.

A Figura 5.5 mostra o caso de uma linha de transmissão de 138 kV, condutor ACSR 636.0 MCM, 200 km de comprimento e fator de potência da carga $f_p = 0,9$ indutivo, espaçamento equivalente 6,0 m; neste caso não foi empregada nenhuma compensação série.

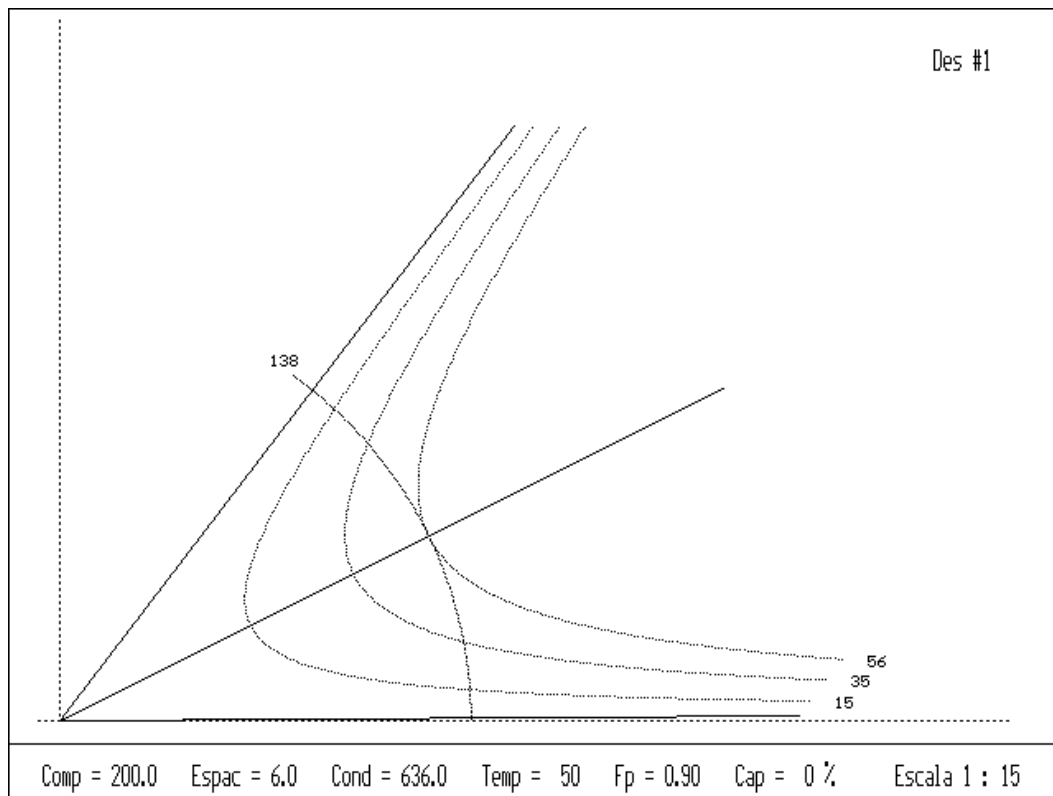


Figura 5.5 - Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV, sem capacitor série

A Figura 5.6 mostra o caso de uma linha de transmissão de 138 kV, condutor ACSR 636.0 MCM, 200 km de comprimento e fator de potência da carga $f_p = 0,9$ indutivo, espaçamento equivalente 6,0 m, correspondente ao mesmo caso anterior, porém com capacitor série no lado da carga apresentando um grau de compensação de 40%, isto é: $g_c = X_C/X_L = 0,4$.

Este caso pode ser comparado com o anterior para se verificar a influência do capacitor série no comportamento da linha, quanto à variação da capacidade de transmissão e condições de colapso de tensão.

Pode-se observar que na tensão de 138 kV o limite de transmissão passa para 81 MVA, deslocando o ponto de colapso para uma condição de maior estabilidade de tensão.

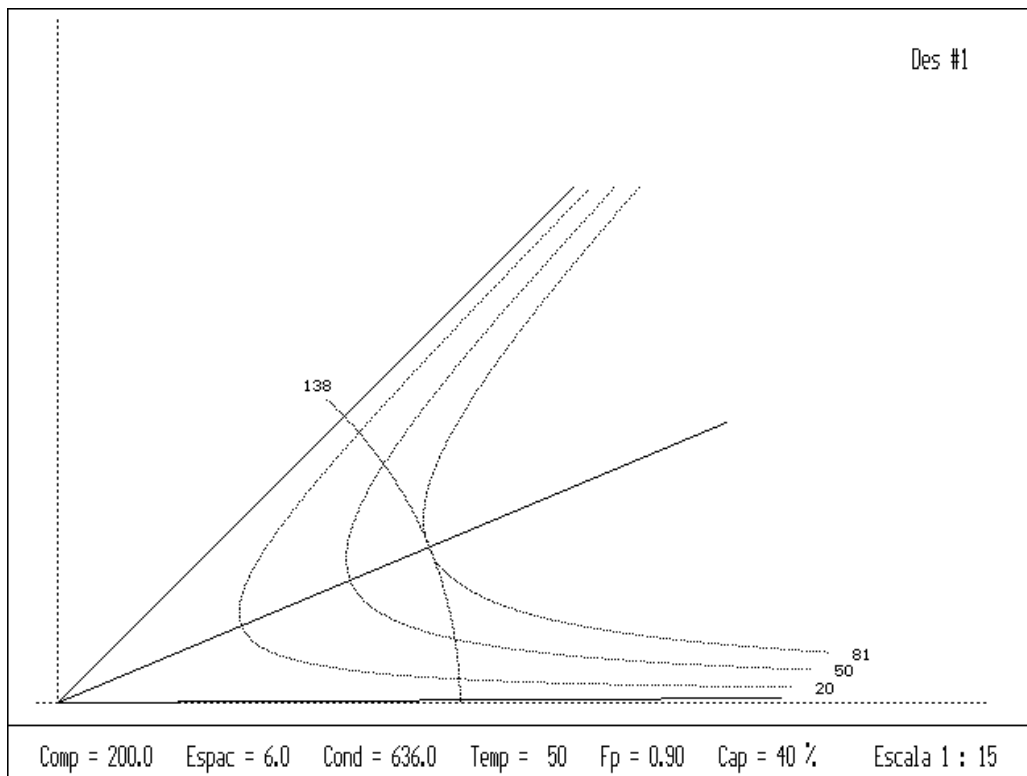


Figura 5.6 - Hipérboles de potência para um caso de LT 138 kV, com capacitor série

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram os casos de uma linha de transmissão de 230 kV, condutor ACSR 636.0 MCM, 300 km de comprimento, fator de potência da carga $f_p = 1$ e com 2 condutores por fase com espaçamentos de 0,4 m e 2 m, respectivamente.

Os dois casos podem ser comparados para se verificar a influência do espaçamento entre os subcondutores dos condutores múltiplos de uma linha de transmissão, particularmente quanto à variação da capacidade de transmissão e condições de colapso de tensão.

Verifica-se que, com o aumento do espaçamento entre os 2 subcondutores de 0,4 m para 2,0 m, o limite de transmissão em 230 kV é aumentado de 180 MVA (Figura 5.7) para 206 MVA (Figura 5.8), Isto indica a possibilidade de se avaliar alternativas em linhas de transmissão de potência natural elevada (LPNE).

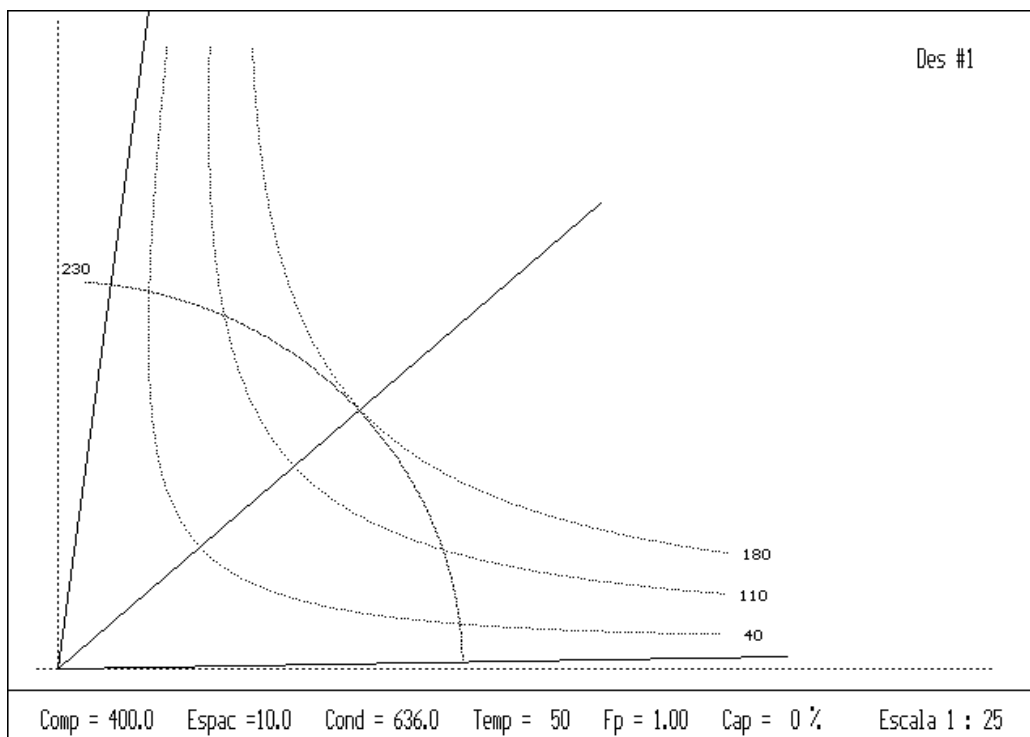


Figura 5.7 - Hipérboles de potência para um caso de LT 230 kV, 2 condutores por fase com espaçamento de 0,4 m

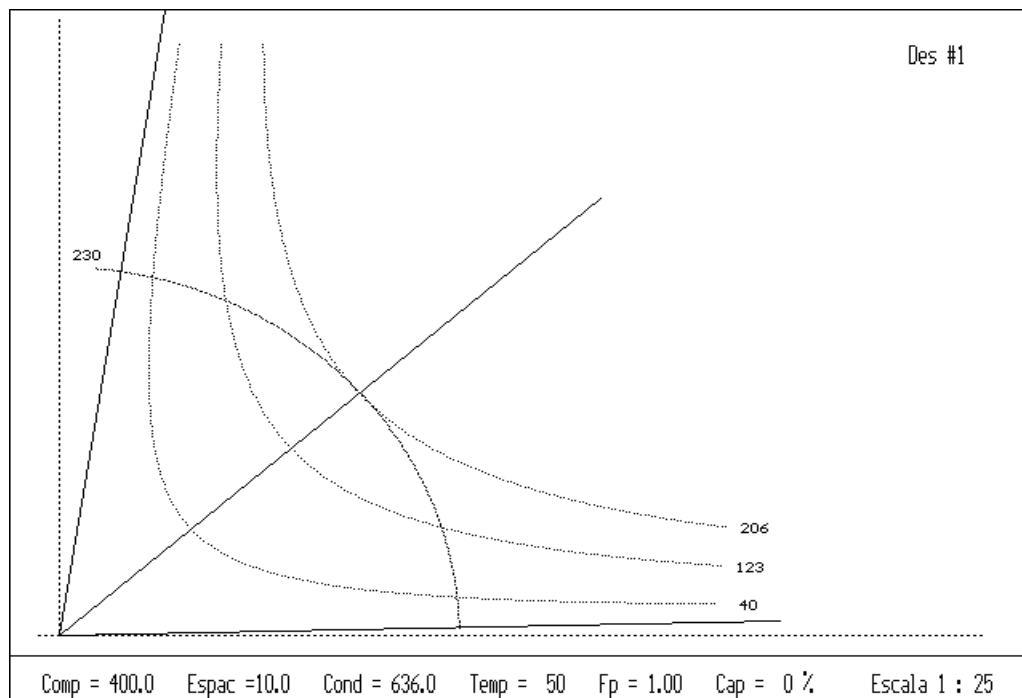


Figura 5.8 - Hipérboles de potência para um caso de LT 230 kV, 2 condutores por fase com espaçamento de 2,0 m

Nos exemplos apresentados acima, as hipérboles mostradas estão no primeiro quadrante, em função do pequeno comprimento das linhas. Na medida em que comprimento da linha aumenta, as hipérboles podem aparecer nos demais quadrantes. Para linhas com o comprimento na faixa de 1250 km a 2500 km as hipérboles passam para o segundo quadrante, na faixa de 2500 km a 3750 km passam para o terceiro quadrante e na faixa de 3750 km a 5000 km (comprimento da onda senoidal de 60 Hz) passam para o quarto quadrante.

Os exemplos seguintes mostram os resultados considerando, por exemplo, uma linha de transmissão de 2400 km, nas tensões de 500 kV e 750 kV, condutor ACSR 900.0 MCM, 4 condutores por fase. Esse comprimento é próximo ao de uma linha de meio comprimento de onda em corrente alternada de 60 Hz. As linhas, por exemplo, que transmitirão a energia a ser produzida da região amazônica apresentam comprimento dessa ordem.

A Figura 5.9 mostra o caso em 500 kV, com $f_p=1$, com as cargas na faixa de 500 MW a 2200 MW e espaçamento equivalente 15 m.

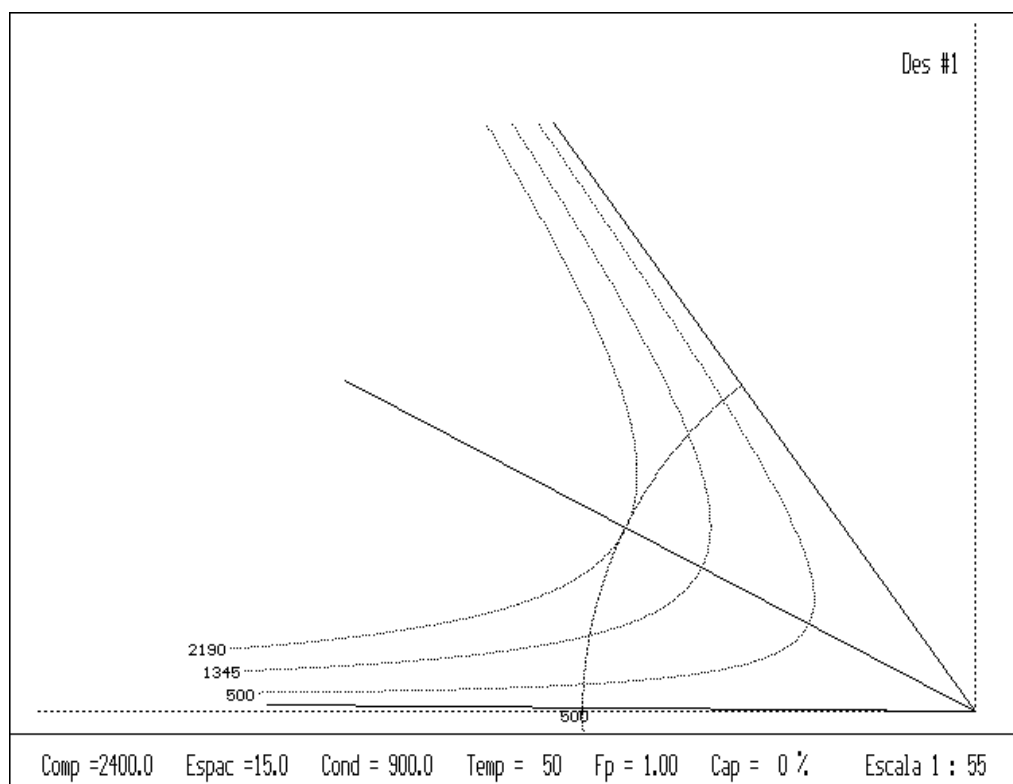


Figura 5.9 - Hipérboles de potência para um caso de LT 500 kV, 2400 km, 4 condutores por fase

Observando o gráfico verifica-se que no ponto de colapso a potência transmitida em 500 kV é da ordem de 2190 MW. Nesse caso, as hipérboles localizam-se no segundo quadrante, ficando mais próximas do eixo horizontal do que do eixo vertical.

Analisando, ainda, o caso da linha anterior em 750 kV, com $f_p=0,97$, com as cargas na faixa de 2000 MW a 6000 MW, pode-se verificar que o limite de transmissão fica em torno de 5300 MW. Nesse caso as hipérboles localizam-se também no segundo quadrante, como no caso anterior.

Outro aspecto que poderia ser explorado, para complementar as análises com os gráficos $V \times S$ e com as hipérboles, é o perfil de tensão ao longo da linha, especialmente para os casos de linhas longas, em condições de operação próximas ao ponto de colapso.

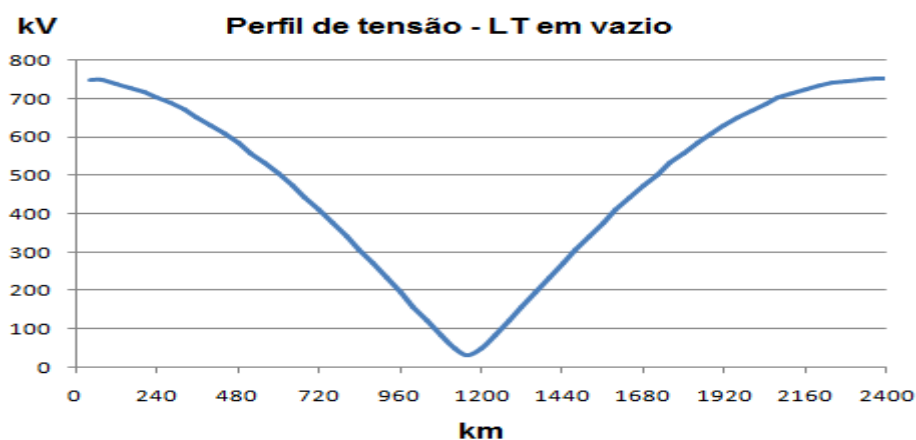
A Figura 5.10 mostra os perfis de tensão para o caso da linha em 750 kV, acima, considerando em separado os seguintes casos:

- a) Linha em vazio;
- b) Linha com carga muito próxima do limite de transmissão (4800 MW) e, portanto, próximo ao ponto de colapso;
- c) Linha com carga de 2000 MW (aproximadamente 40% do limite).

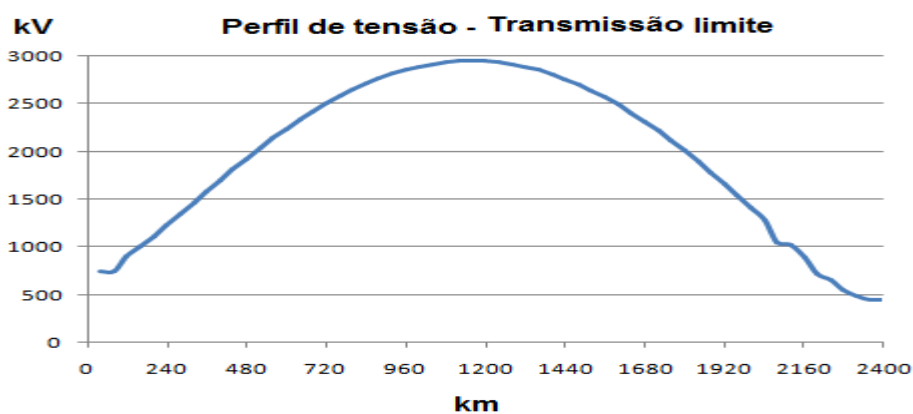
A Figura 5.11 reúne numa mesma figura os perfis de tensão acima.

Vale mencionar que os valores das tensões foram calculados ao longo da linha em determinados pontos, igualmente espaçados (foram utilizados 60 pontos). Em seguida, foram esboçados os gráficos correspondentes da tensão V em função da posição, ou seja: $V=f(e)$.

a) LT em vazio



b) LT com carga muito próxima ao limite de transmissão



c) LT com 40% da carga limite, aproximadamente

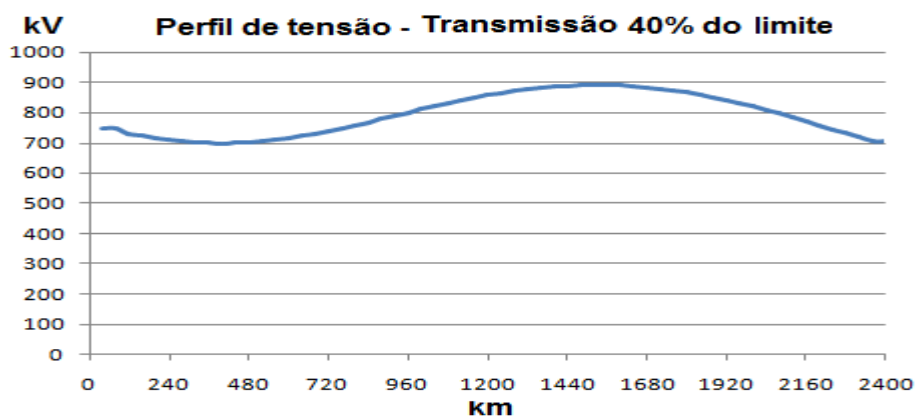


Figura 5.10 – Perfil de tensão para um caso de LT 750 kV, 2400 km, 4 condutores por fase (gráficos em separado)

Casos anteriores em um único quadro

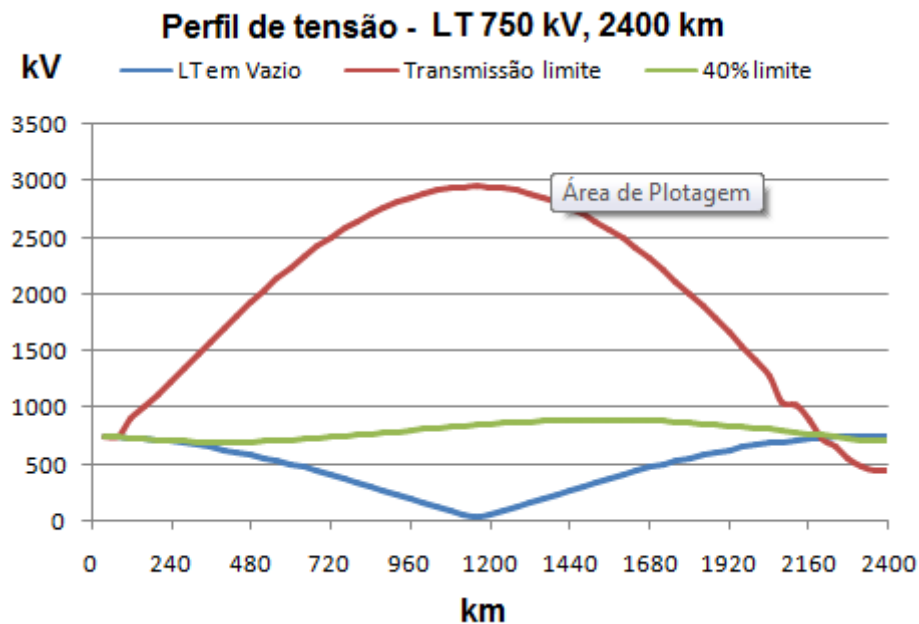


Figura 5.11 – Perfil de tensão para um caso de LT 750 kV, 2400 km,
4 condutores por fase (gráficos reunidos)

Pode-se verificar nesses gráficos que os perfis de tensão na linha de transmissão dependem muito dos valores das cargas e apresentam grandes variações ao longo da linha. Em todos os casos os valores das tensões no final da linha são da mesma ordem da tensão na fonte, por se tratar de uma linha com comprimento em torno do meio comprimento da onda (em 60 Hz).

O meio da linha apresenta as condições mais críticas. Em vazio as tensões atingem valores muito baixos; com a potência limite os valores são muito elevados; com carga média o perfil fica relativamente uniforme.

6. APLICAÇÕES NO SISTEMA

Embora os métodos desenvolvidos considerem apenas uma linha de transmissão, os resultados desses estudos podem contribuir na análise do sistema global. Neste capítulo serão feitas algumas indicações que podem ser consideradas para o sistema.

Primeiramente, como auxiliar nos estudos de fluxo de potência, analisando linhas críticas. Em função dos resultados obtidos podem ser selecionadas as linhas que apresentam grande carregamento, para as quais podem ser feitas análises particulares, e daí ajustando melhor o fluxo de potência do sistema. As linhas de grandes comprimentos podem ser também assim analisadas.

Outra possibilidade seria analisar o comportamento da tensão em determinada barra a partir da impedância equivalente nessa barra, expressa pelos valores equivalentes da resistência e da reatância. Esse caso equivaleria ao de uma linha representada pela sua resistência e reatância, com parâmetros concentrados. A análise seria feita para variação da carga no ponto considerado.

Análise com variação progressiva das cargas ao longo do sistema só poderia ser feita com a representação de todo o sistema, e utilizando-se de programas apropriados para o traçado das curvas $V \times S$ ou $V \times P$, para as barras de interesse, a exemplo do Anarede [20].

A consideração das características das cargas pode fornecer indicações para a necessidade de representá-las através de modelos mais apropriados, ao invés do modelo mais utilizado de potência constante.

Neste trabalho, as aplicações no sistema podem ficar restritas aos casos envolvendo a impedância equivalente nas barras em que se deseja analisar suas condições de operação, diante de elevado carregamento. Desta forma, a análise no ponto é semelhante ao caso da linha de transmissão de igual impedância, e utilizando-se das equações da linha na forma simplificada, sendo dados os valores equivalentes da resistência $R_e=R$ e reatância indutiva $X_e=X$, obtidos a partir da matriz de impedância do sistema.

Neste caso, a expressão para a determinação da tensão V_r e as condições de colapso, com as cargas representadas por potência constante, é equivalente à apresentada em (4.10), conforme segue:

$$V_r = \sqrt{\frac{-K \pm \sqrt{K^2 - 2Z \cdot S_0^2}}{2}} \quad (6.1)$$

onde: $K = 2Z \cdot S_0 \cdot \cos(\theta - \varphi) - V_s^2$, $\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R}$

As condições limites são determinadas pelas expressões:

$$S_L = \frac{V_s^2}{4Z(\cos(\frac{\theta - \varphi}{2}))^2} \quad (6.2a)$$

$$V_{rL} = \frac{V_s}{2 \cdot \cos(\frac{\theta - \varphi}{2})} \quad (6.2b)$$

Dado, por exemplo, os valores equivalentes numa determinada barra do sistema $R_e=20,98 \, \Omega$ e $X_e=104,14 \, \Omega$, tensão de 230 kV, tem-se o gráfico $V_r \times S$ mostrado na Figura 6.1 (obtido através do Matlab).

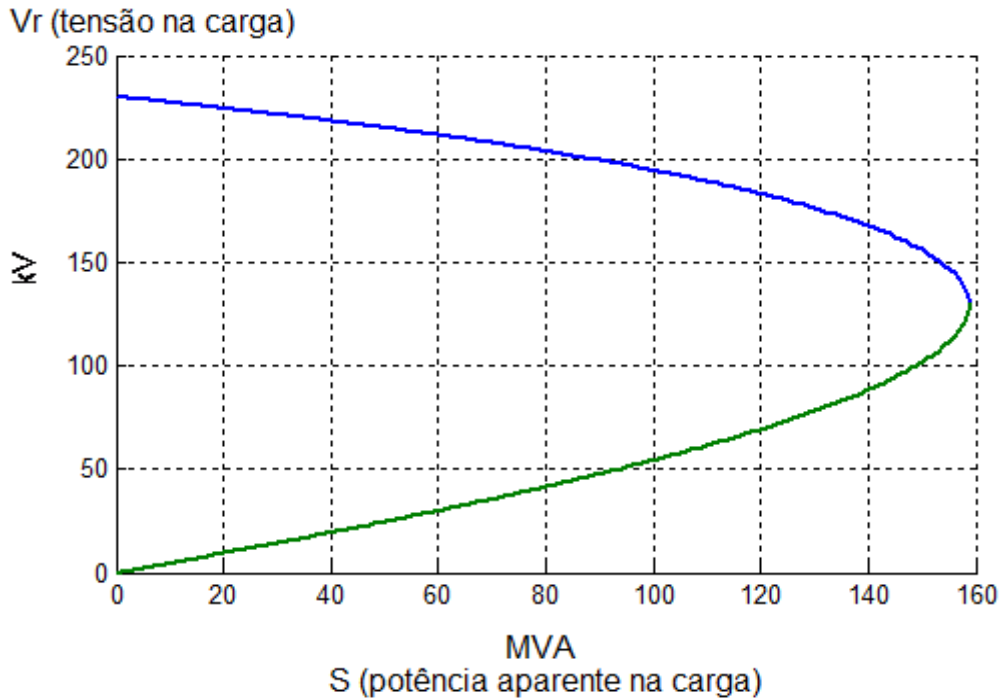


Figura 6.1.– Exemplo para uma impedância equivalente em 230 kV

A Figura 6.1 é semelhante à Figura 3.1 sendo, porém, que a potência limite neste caso é da ordem de 168 MVA, em vez de 164 MVA do caso anterior. Os valores utilizados

para a resistência e reatância equivalentes foram iguais aos valores da resistência e reatância da linha de transmissão utilizados anteriormente

Dispondo-se dos gráficos para algumas barras de interesse pode-se, então, visualizar de forma simplificada as condições de operação dessas barras, podendo essas informações ajudar a análise do sistema como um todo.

A determinação dos valores limites, no ponto de colapso, pode corresponder no sistema a problemas com utilização de técnicas de otimização. A análise de sensibilidade pode também corresponder a técnicas que utilizam matrizes de sensibilidade do sistema.

7. CONCLUSÕES

O trabalho mostra uma abordagem para avaliação de colapso de tensão e capacidade de transmissão, basicamente para sistemas radiais. Os métodos usados consideram os traçados das curvas $V \times S$ e das hipérboles de potência. O desenvolvimento teórico permite determinar resultados importantes para o comportamento de uma linha de transmissão, representada pelo seu modelo exato, como também utilizando algumas propriedades da hipérbole.

As representações gráficas permitem a visualização do comportamento da linha de transmissão, particularmente nas condições críticas. Fornecem, de certa forma, algumas contribuições para a compreensão do problema de colapso e instabilidade de tensão e a determinação do limite de transmissão. Os casos exemplos apresentados mostram o potencial para aplicações em diversas situações.

O método é particularmente útil na análise de sistemas radiais e na verificação dos limites de transmissão e condições de fluxo de potência de determinadas linhas do sistema. Pode ser útil também como ferramenta auxiliar na análise de estabilidade de tensão em algumas situações, que utilizam simulações do sistema como um todo. Não há limitações quanto ao nível de tensão e comprimento de linhas, tendo aplicações desde a distribuição até a transmissão em linha longa, sendo precisos os resultados encontrados nas situações estudadas.

Este trabalho mostrou também um modelo para análise de colapso e instabilidade de tensão considerando as características das cargas, analisando em particular as situações de cargas de potência constante, corrente constante e impedância constante.

Ficou evidenciada a grande diferença dos resultados sobre o comportamento do sistema quando são considerados modelos mais precisos para as cargas, comparado com o modelo mais usual de potência constante, especialmente nas condições de colapso e instabilidade de tensão, em que o sistema se encontra em situação crítica.

O uso de modelos mais precisos para as cargas, assim como para os componentes do sistema, certamente conduzirá a análise do sistema, incluindo colapso e instabilidade de tensão, a resultados mais exatos e, portanto, mais realistas e confiáveis.

A utilização do modelo nas situações analisadas, considerando um sistema simples, mostra também o potencial para sua aplicação em grandes sistemas, bem como em situações mais complexas. O campo apresenta, ainda, grandes possibilidades para desenvolvimentos futuros, considerando o sistema de potência como um todo.

Outros desenvolvimentos poderiam ser no sentido de se incorporar os métodos aqui apresentados em algumas das metodologias mais gerais, para o sistema, selecionadas dentre as apresentadas nas diversas dissertações e teses, indicadas nas referências. Softwares específicos para os modelos apresentados poderiam ser elaborados com recursos e técnicas atualizadas, para permitir um melhor entendimento e visualização, constituindo-se numa ferramenta didática mais atraente na análise de colapso e estabilidade de tensão e da capacidade de transmissão das linhas.

BIBLIOGRAFIA

a) Referências Básicas

- [1] Aguiar, L. B. - "Elementos para Avaliação de Colapso de Tensão em Linhas de Transmissão" - 3º. ERLAC/CIGRÉ, Foz do Iguaçu, abril/1989.
- [2] Aguiar, L. B. - A Model for Voltage Collapse Study Considering Load Characteristics, V SEPOPE, Foz do Iguaçu, maio 1996.
- [3] Aguiar, L. B. – “Análise e Visualização de Colapso de Tensão e Limite de Transmissão através de Diagramas Hiperbólicos de Tensão” – VIII ERLAC/CIGRÉ, Foz do Iguaçu, maio 1999.
- [4] Moreno, A. L. – “Linhas de Transmissão – Método Exato – Hipérboles de Potência”, documento interno ao DEE/UFBA, 1987.
- [5] Aguiar, L. B. – “Notas sobre a Hipérbole e Relação com a Equação da Linha de Transmissão”, documento interno ao DEE/UFBA, 1987.
- [6] Weedy B. M - "Voltage Stability of Radial Power Links " - Proc. IEE, Vol. 115, No. 4, April 1964.
- [7] Barbier, C. e Barret - "Analyse des Phenomènes d'Ecroutement de Tension Sur un Reseaux de Transport" - EDF, RGE, Juliet 1980.
- [8] CIGRÉ Study Committee 38-01 Task Force 03 – “Planning Against Voltage Collapse” - ELECTRA N.111, March 1987.
- [9] Taylor, C. W. – “A Perspective on Voltage Stability with Emphasis on Load Characteristics” - I SEPOPE, São Paulo, August 1989.
- [10] Taylor, C. W. – “A Conceptual Analysis of Voltage Stability as Related to Load Characteristics” - IEEE / BPA, 1991.
- [11] Pal, M. K. – “Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics” - IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, Feb 1992.
- [12] Taylor, C. W. (ed.) – “Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena” - CIGRÉ Task Force 38.02.10, March 1993.

- [13] Prada R.B. - "Research Project Voltage Stability - Final Report" - PUC/ELETRONBRAS, June 1992.
- [14] "Metodologias para Avaliação de Estabilidade de Tensão" – Relatório da Força Tarefa de Estabilidade de Tensão/GTCP/CTST/GCPS,1996.
- [15] Taylor, C. W. – "Power System Voltage Stability" - Mac Graw Hill, 1994.
- [16] Kundur, P. – "Power System Stability and Control" - Mac Graw Hill, 1994.
- [17] IEEE Power Engineering Society 1998 Summer Meeting, "IEEE Special Tutorial Course Voltage Stability", San Diego, CA, July 13,1998.
- [18] Souza, A. C. Z. - "Análise de Estabilidade de Tensão" – FUPAI, 1997.
- [19] Seminar "Reactive Power Compensation and Voltage Stability: removing transmission limitations" – Carlson W. Taylor, Seminar Leader, May 1992 version.
- [20] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, ELETRONBRÁS, "Manual do Programa de Análise de Redes - Anarede", Versão 01, 1999.
- [21] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, ELETRONBRÁS, "Manual do Programa NH2", Versão 7.3, 2005.
- [22] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, ELETRONBRÁS, "Manual do Programa Pacdyn", Versão 01, 1999.
- [23] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL, ELETRONBRÁS, "Manual do Programa Flupot", Versão 01, 1999.

b) Dissertações de Mestrado

- [24] Bedoya, D. R. – "Obtenção da Margem Mínima de Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência" - Dissertação de mestrado, Unicamp, 2007.
- [25] Causarano, W. J. – "Método de Simulação Rápida no Tempo para Avaliação da Estabilidade de Tensão" - Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, 1997.
- [26] Cifuentes, A. J. - "Avaliação das Condições de Operação de Sistemas Elétricos de Potência com Relação à Estabilidade de Tensão Utilizando Redes Neurais Artificiais" - Dissertação de mestrado, Unicamp, março 2005.

- [27] Cortez, A. N. - “Critérios e Procedimentos para Avaliação de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência” – Dissertação de mestrado, CPDEE/UFMG, 2001.
- [28] França, R. F. – “Índices e Margens para Avaliação da Segurança de Tensão” - Dissertação de mestrado, PUC/RJ, março 2003.
- [29] Francisco, G. S. – “Avaliação de Ferramentas de Análise de Estabilidade de Tensão” - Dissertação de mestrado, EFEI, outubro 2005.
- [30] Guedes, R. B. L. – “Aplicação de Métodos Estáticos para Estudos de Colapso de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência” - Dissertação de mestrado, EESC/USP 2000.
- [31] Kopcak, I. – “Melhoria da Margem de Estabilidade de Tensão no Âmbito do Pré-despacho da Operação através de Corte Mínimo de Carga” - Dissertação de mestrado, Unicamp, agosto 2003.
- [32] Martins, A. C. P. – “Simulação Estática de Colapso de Tensão Através da Resolução Continuada de um Fluxo de Potência Modificado” - Dissertação de mestrado, EESC/USP, 2000.
- [33] Meireles, E. D. – “Uma Contribuição ao Estudo do Problema de mal Condicionamento de Redes Elétricas de Potência sob o Ponto de Vista de Estabilidade de Tensão” - Dissertação de mestrado, Unicamp, maio 2005.
- [34] Menezes, V. T. – “Melhoria na Margem de Estabilidade de Tensão no Pré-Despacho da Operação de Sistemas de Energia Elétrica via Otimização de Reativos” - Dissertação de mestrado, Unicamp, 2002.
- [35] Moreira, C. M. – “Modelo de Sensibilidade de Potência para Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica” - Dissertação de mestrado, Unicamp, junho 1997.
- [36] Naturesa, J. S. – “A Influência de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica” - Dissertação de mestrado, Unicamp, maio 2001.
- [37] Nema, O. M. S. – “Índice de Proximidade ao Colapso de Tensão Baseado nas Perdas de Potência Ativa: Investigação do Potencial de Utilização Na Análise de

Segurança em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência” - Dissertação de mestrado, Unicamp, dezembro 1996.

[38] Paixão, R. L. D. – “A Compensação Série Chaveada Como Solução Para o Problema do Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte-Nordeste” - Dissertação de mestrado, UNB, 2006.

[39] Quintela, A. S., Castro, C. A. – “Estudo de um Índice de Proximidade ao Limite de Estabilidade de Tensão e sua Aplicação na Seleção de Contingências” - Dissertação de mestrado, Unicamp, 2002.

[40] Resende, J. D. – “Método do Ponto de Colapso Aplicado na Análise de Contingências Críticas em Sistemas Elétricos de Potência” - Dissertação de mestrado, UFJF, julho 2007.

[41] Santos, C. J. R. – “Método Rápido para Avaliação da Margem de Estabilidade de Tensão Considerando os Limites de Potência Reativas dos Geradores” – Dissertação de mestrado, UESC, 2008.

[42] Silva, L. C. P. – “Uma Formulação Analítica para a Análise Modal da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica” - Dissertação de mestrado, Unicamp, março 1997.

[43] Silva, L. J. - “Análise da Estabilidade de Tensão e Áreas Críticas da Rede Elétrica do Estado de São Paulo” - Dissertação de mestrado, Unicamp, dezembro 2006.

[44] Silveira, C. S. – “Estudo de Maximo Carregamento em Sistemas de Energia Elétrica” - Dissertação de mestrado, EESC/USP 2003.

[45] Tognete, A. L. – “Um Novo Método de Calculo de Margem de Segurança Ao Colapso de Tensão Utilizando Análise de Sensibilidade” - Dissertação de mestrado, Unicamp, agosto 1997.

[46] Zàrate, L. A. Llacua - “Método Eficiente de Calculo de Margem de Segurança ao Colapso de Tensão” - Dissertação de mestrado, Unicamp, setembro 2001.

[47] Zeferino, C. L. – “Estudo do Maximo Carregamento em Sistemas de Energia Elétrica via Método da Barreira Modificada” - Dissertação de mestrado, EESC/USP, 2006.

c) Teses de Doutorado

- [48] Affonso, C. M. – “Planejamento de Curto Prazo da Operação Incluindo Critérios de Estabilidade de Tensão” – Tese de doutorado, Unicamp, setembro 2004.
- [49] Andrade, J. G. B. M. – “Uma Contribuição ao Estudo de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência: Novos Aspectos Relacionados à Representação da Carga” - Tese de doutorado, USP, 2007.
- [50] Alves, D. A. – “Obtenção do Ponto de Máximo de Carregamento de sistema Elétricos de Potência Utilizando Novas técnicas de Parametrização para o Método de Continuação” – Tese de doutorado, Unicamp, junho 2000.
- [51] Guedes, R. B. L. – “Cálculo das Soluções de Baixa Tensão das Equações de Fluxo de Carga Através de Sistemas Dinâmicos Auxiliares e Função de Energia Estendidas com Modelo ZIP para Análise de Colapso de Tensão” - Tese de doutorado, EESC/USP, 2004.
- [52] Kopcak, I. – “Uma Plataforma Unificada para Análise de Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência” – Tese de doutorado, Unicamp, Agosto 2007.
- [53] Lemos, F. A. B. - “Determinação da Instabilidade de Tensão Associada à Bifurcação Sela-Nó” - Tese de doutorado, UFSC, 2000.
- [54] Malange, F. C. V. “Proposta de Parametrização para o Fluxo de Carga Continuado Visando Redução de Perdas na Transmissão e o Aumento da Margem Estática de Estabilidade de Tensão”- Tese de doutorado, UNESP, Ilha Solteira, 2008.
- [55] Manzoni, A. – “Desenvolvimento de um Sistema Computacional Orientado a Objetos para Sistemas Elétricos de Potência: Aplicação a Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão”- Tese de doutorado, COPPE-UFRJ, 2005.
- [56] Oliveira, A. C. C. – “Método para aumento da Margem de Estabilidade de Tensão via Redespacho Ótimo de Potência Ativa” - Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, março 2005.
- [57] Pinto, H. J. C. P. - “Análise Modal Aplicada ao Problema de Estabilidade de Tensão”- Tese de doutorado, UFRJ, março 1998.

[58] Silva, L. C. P. – “Uma Expansão dos Métodos de Curva PV e de Análise Modal Estática para Estudo de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência” - Tese de doutorado, Unicamp, 2001.

[59] Souza, L. J. – “Adequação das Ações de Controle de Tensão em Sistemas Elétricos Objetivando o Reforço das Condições de Segurança de Tensão” - Tese de doutorado, PUC/RJ, março 2007.

[60] Zárate, L. A. L. – “Estimação Rápida do Ponto de Máximo Carregamento para Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência” – Tese de doutorado, Unicamp, novembro 2004.

d) Bibliografia Adicional

[61] Lehmann, C. H. – “Geometria Analítica”, John Willey & Sons, 1942.

[62] Sami Repo – “On-line Voltage Stability Assessment of Power System - An Approach of Black-box Modeling” - Tampere University of Technology, 2001.

[63] Monticelli, A. J. – “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”. São Paulo: Blucher, 1983.

[64] Fucs, R. D. – “Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas” – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2ªEd. 1979.

[65] Camargo, C. C. B – “Transmissão de Energia Elétrica – Aspectos Fundamentais” - Editora da UFSC, 2ª Ed. 1991.

[66] Stevenson Jr., W. D. – “Elementos de Análise de Sistemas de Potência” – Mc Graw Hill, 2ªEd. 1986.

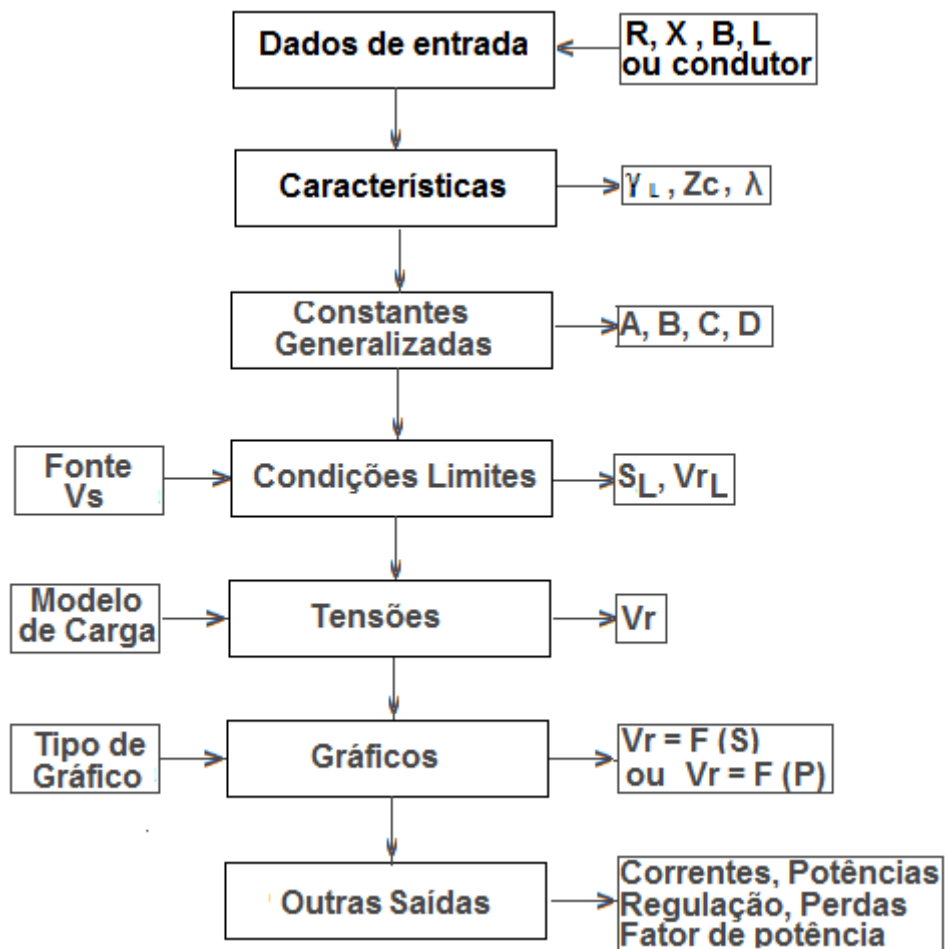
[67] Elgerd, O. – “Electric Energy System Theory – An Introduction” - Mc Graw Hill, 1971.

[68] Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools – IEEE/PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, August 2002.

ANEXO 1

PROGRAMA COLAPSO DE TENSÃO

Fluxograma Simplificado



ANEXO 1

PROGRAMA LINHAS DE TRANSMISSÃO

E

HIPÉRBOLES DE POTÊNCIA

Fluxograma Simplificado

