



São Paulo, 10/15 de abril de 1972

Fonte Manual 203

GRUPO DE ESTUDOS DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

LIGAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO AO TERCIÁRIO
DOS TRANSFORMADORES DE TRÊS ENROLAMENTOS OU AUTOTRANSFORMA
DORES.

Engº Carlos Alberto Saraiva

Engº José Mariano Duarte Lanna Neto

CEMIG - Centrais Elétricas de Minas Gerais S.A.

1.0 INTRODUÇÃO:

Uma das formas mais econômicas de se fazer compensação de reativos em um sistema elétrico é pela utilização de bancos de capacitores em derivação. Quando se pretende ligar bancos de capacitores em subestações com, por exemplo, três níveis de tensão, surge de início o problema da escolha da tensão do banco, ou seja, o banco será ligado na tensão superior, na média tensão ou na tensão inferior? Como a ligação de bancos de capacitores em tensões acima de 69 KV é bastante complexa, tanto do ponto de vista técnico, quanto econômico, adotou-se na CEMIG como solução técnica e econômica mais vantajosa a ligação dos bancos de capacitores no terciário dos autotransformadores ou dos transformadores de três enrolamentos. Porém ao se adotar esta solução é necessário estar atento para certos problemas operativos que aparecem e levá-los em conta ao se fazer a especificação para compra desses autotransformadores ou transformadores de três enrolamentos.

1.1 - Problemas Operativos:

Um dos primeiros problemas que aparecem quando se liga um banco de capacitores no terciário dos transformadores de 3 enrolamentos ou autotransformadores é a possibilidade de aparecimento de sobretensões acima dos valores permitidos pelas Normas da ABNT, ou seja, 105% em carga ou 110% a vazio nos terminais do

terciário (1). O valor da sobretensão que aparece no terciário é função da impedância do transformador (auto ou transformador de três enrolamentos) e da potência do banco de capacitores.

No caso dos autotransformadores além do problema acima mencionado, se o mesmo não for corretamente dimensionado para trabalhar com banco de capacitores ligado ao terciário e fornecendo simultaneamente carga na tensão média, poderá haver sobrecarga no enrolamento comum. Ver referências 2 e 3. Este problema é mais grave para os autotransformadores, que trabalham nas interligações, onde há possibilidade de inversão do sentido do fluxo de potências; neste caso o auto trabalha como abaixador ora como elevador e a corrente no enrolamento comum varia em ambos os casos. Assim, se não forem corretamente especificadas as condições de carga do auto, o enrolamento comum poderá ser super ou subdimensionado. Caso haja comutação sem carga em um dos enrolamentos e comutação sob carga no outro, ao calcularmos a corrente no enrolamento comum com as fórmulas dadas nas referências 2 e 3, para o auto funcionamento como abaixador ou elevador devemos ter bastante cuidado ao entrarmos com os valores da tensão nas fórmulas.

1.2 - Condições a serem Especificadas:

Em vista dos problemas acima mencionados, devemos tomar várias precauções ao especificar

mos um transformador com terciário acessível para ligação de bancos de capacitores. Caso o transformador a ser comprado possua comutação sob carga em um dos enrolamentos e comutação a vazio no outro, devemos solicitar ao fabricante cotar duas alternativas uma para autotransformador e outra para transformador de três enrolamentos, isto porque a colocação de derivações nos autotransformadores influi decisivamente no custo dos mesmos. Devemos fixar as tensões nominais, níveis de isolamento respectivos, as potências dos enrolamentos e informar ao fabricante as condições de carga máxima (MVA. FP) e o(s) respectivo(s) sentido(s) do fluxo de potência, além de dizer que haverá simultaneamente com a carga acima um banco de capacitores de determinada potência ligado ao terciário. Procedendo assim, deixaremos a critério do fabricante a escolha das impedâncias do transformador de 3 enrolamentos ou do autotransformador que poderá assim projetar um equipamento mais econômico.

1.3 - Análise das Ofertas:

Ao analisarmos as ofertas deveremos verificar se as condições especificadas foram atendidas. Das condições especificadas a serem verificadas a mais trabalhosa é a da tensão no terciário com a carga capacitiva ligada, estando o transformador fornecendo uma carga na tensão média.

Para facilitar esta verificação elaboramos um programa para o computador IBM/360 o qual tem dupla finalidade:

- a) verificar a tensão nos terminais do terciário com o banco de capacitores de potência especificada ligado, a fim de saber se o transformador atende as exigências da especificação;
- b) para um autotransformador ou transformador de 3 enrolamentos já construído, determinar a potência máxima do banco de capacitores que pode ser ligado ao terciário sem exceder os limites admissíveis de tensão especificados nas Normas. Determinada esta potência, devemos verificar se o enrolamento comum do auto não ficará sobrecarregado quando o banco for ligado ao terciário. Caso haja sobrecarga, deveremos reduzir a potência do banco de capacitores.

O mesmo programa pode ser usado para calcular a subtensão que aparecerá nos terminais do terciário do autotransformador ou transformador de 3 enrolamentos, quando houver um reator derivação ligado ao mesmo. As modificações no programa decorrentes dessa hipótese, deverão ser levadas em conta nos dados de entrada. No parágrafo 3.0 essas modificações serão descritas com maiores detalhes.

2.0' - ELABORAÇÃO DO PROGRAMA:

Conhecidas as impedâncias dos transformadores ofertados, determinamos inicialmente o circuito equivalente dos mesmos como mostrado na figura 2.0-1, sendo as impedâncias referidas à base de 100 MVA trifásico. Supondo conhecidos: a tensão, potência e fator de potência entregue ao enrolamento de tensão superior ou média tensão, assim como a carga capacitiva ligada ao terciário, poderemos resolver o circuito da figura 2.0-1 e elaborar o programa para o cálculo. O programa apresentado foi elaborado supondo conhecidos a tensão, potência e fator de potência entregue ao enrolamento de tensão superior. De maneira análoga poderá ser feito um programa para o caso de serem conhecidos esses dados para o enrolamento de média tensão. A linguagem usada no programa foi PL1 base. Na figura 2.0-2 mostramos o diagrama de bloco do programa.

3.0 - DADOS DE ENTRADA

Serão fornecidos ao computador como dados de entrada os valores da tensão em p.u. na base da tensão nominal do enrolamento da tensão superior, potência entregue pelo sistema ao enrolamento da tensão superior em p.u. na base de 100 MVA trifásico e respectivo fator de potência, potência do banco de capacitores em p.u. na base de 100 MVA trifásico e respectivo F.P e as impedâncias equivalentes, Z_p ,

Z_S e Z_T do transformador de 3 enrolamentos ou auto-transformador em p.u. na base de 100 MVA trifásico.

O programa permite variar a potência do banco de capacitores (PBCO) ligada ao terciário. Para isto, basta entrar no cartão de dados com o valor inicial de carga capacitiva (PBCO), o intervalo que se deseja ter entre dois valores sucessivos de PBCO, chamado PASSO e o número desejado do PASSO, denominado NPASS. Constitui também um dado de entrada, um cartão de controle no qual é perfurado na coluna 5, o número de cartões de dados que vão ser lidos durante a execução do programa.

Caso se tenha ligado ao terciário um reator derivação sendo mantidas as mesmas condições de carga o programa poderá ainda ser usado. Basta atribuir o sinal negativo a PBCO e ao valor do PASSO.

4.0 - PREENCHIMENTO DO CARTÃO DE DADOS:

No preenchimento do cartão de dados, as colunas são utilizadas como descrito abaixo, sendo que o alinhamento é feito a partir da última coluna usada para representar certa grandeza:

Colunas 1 a 28 - Título (fabricante, subestação de aplicação).

Colunas 29 a 34 - Potência entregue pelo sistema ao enrolamento de tensão superior em p.u..

- Colunas 35 a 40 - Fator de Potência.
- Colunas 41 a 46 - Tensão em p.u. no enrolamento de tensão superior.
- Colunas 47 a 52 - Z_p = Impedância do Enrolamento - de Tensão Superior(em p.u.).
- Colunas 53 a 58 - Z_s = Impedância do Enrolamento de Média Tensão (em p.u.).
- Colunas 59 a 64 - Z_T = Impedância do Enrolamento de Tensão Inferior (em p.u.).
- Colunas 65 a 70 - PBCO = Valor inicial da potência do banco de capacitores (ou do reator) ligado ao terciário (em, MVar)
- Colunas 71 a 76 - PASSO = valor desejado entre 2 cargas capacitivas(ou reativas), sucessivas (em MVar).
- Coluas 77 a 80 - NPASS = número de PASSOS que se deseja.

5.0 - VALORES CALCULADOS PELO PROGRAMA:

Os valores (em p.u.) de corrente e tensão no terciário, de potência, tensão e corrente no enrolamento de média tensão, calculados através do programa, são apresentados em forma de tabela. Vide anexo.

Como os cálculos são processados com as grandezas na forma binomial complexa, na tabela de saída temos as componentes real e imaginária, bem como o módulo e ângulo das grandezas calculadas.

Na ilustração 5.0-1 representamos como exemplo o circuito equivalente de um transformador de 3 enrolamentos, indicando os valores calculados de tensão e potência nos enrolamentos supondo entregue uma potência de 225 MVA com fator de potência unitário e tensão 0,98 p.u. no enrolamento de tensão superior e estando ligado ao terciário um banco de capacitores de 75 MVar nominal. Vemos que - nestas condições a sobretensão no terciário é de apenas 3,7% e portanto abaixo dos 5% permitido pelas Normas. Por outro lado, verifica-se que o enrolamento de tensão média está com uma sobrecarga de apenas 1,4%. Conclui-se pois que o transformador com as impedâncias dadas na figura e sujeito às condições de carga acima é tecnicamente satisfatório.

6.0 - ADENDA - FÓRMULAS USADAS NO PROGRAMA:

As fórmulas matemáticas usadas no programa foram obtidas resolvendo o circuito equivalente do transformador de 3 enrolamentos ou auto-transformador com terciário acessível, ilustração 2.0-1, no qual são conhecidos os valores das impedâncias dos enrolamentos (pelo fabricante); a potência do banco de capacitores ligado ao terciário e a potência, fator de potência e tensão entregues ao enrolamento de tensão superior (4).

Nas fórmulas escritas abaixo, as grandezas envolvidas são supostas na forma binomial complexa, os índices P, S e T são usados para indicar um valor no

enrolamento de tensão superior, média ou inferior respectivamente e as letras P, E, Z e I representam respectivamente os valores de potência, tensão, impedância e corrente:

De acordo com a ilustração 2.0-1, temos:

$$(Z_P + Z_T) I_X + Z_T I_Y = E_P - E_T \quad (1)$$

$$Z_T I_X + (Z_S + Z_T) I_Y = E_S - E_T \quad (2)$$

$$I_T = -j X_C (-I_T) \quad I_T = -(I_X + I_Y)$$

$$E_T = -j X_C (I_X + I_Y) \text{ mas } I_X = I_P \text{ e } I_Y = I_S$$

$$E_T = -j X_C (I_P + I_S) \quad (3) \text{ e } I_T = -(I_P + I_S)$$

$$P_T = E_T I_T \quad P_T = j X_C (I_P + I_S)^2$$

Levando (3) em (1) e (2)

$$E_P = (Z_P + Z_T - j X_C) I_P + (Z_T - j X_C) I_S \quad (4)$$

$$E_S = (Z_T - j X_C) I_P + (Z_S + Z_T - j X_C) I_S$$

Sendo dado a potência do banco de capacitores PBCO, o valor de X_C em p.u. é dado por: $X_C = 100 / \text{PBCO}$.

Como os valores de potência (P_P), fator de potência e tensão (E_P) no enrolamento de tensão superior são conhecidos, obtêm-se os valores correspondentes no enrolamento de média tensão resolvendo o sistema de equações (4);

$$I_P = \frac{P_P}{E_P}$$

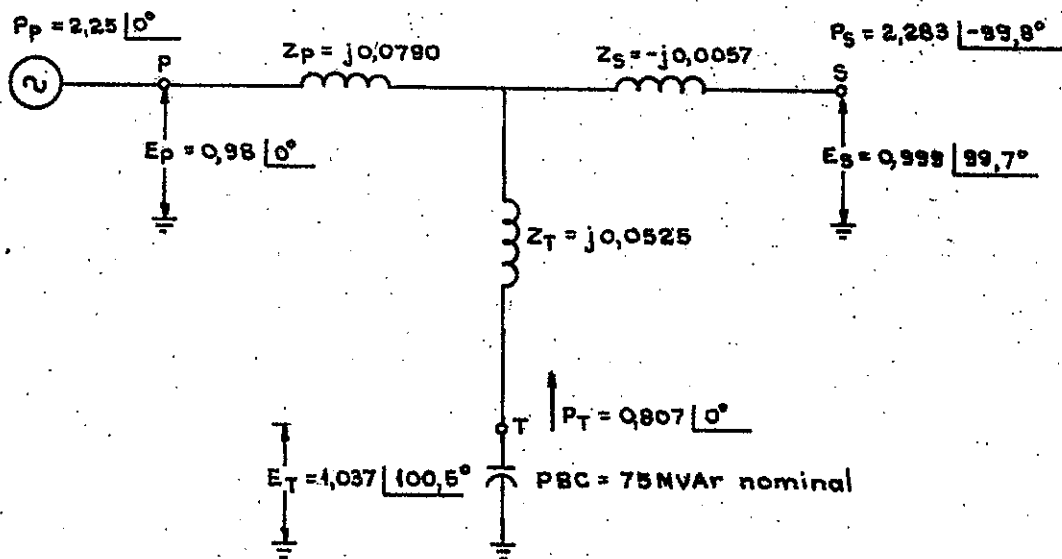
$$I_S = \frac{E_P - I_P (Z_P + Z_T - j X_C)}{(Z_T - j X_C)}$$

$$E_S = (Z_T - j X_C) I_P + (Z_S + Z_T - j X_C) I_S$$

Belo Horizonte , 12/01/72

BIBLIOGRAFIA

- 1 - ABNT - EB-91 - Transformadores Para Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica - 1971.
- 2 - Eric T.B. Gross - J.C. Pohlman - Rating of Autotransformers for System Interconnection - AIEE Trans., Feb. 1958
- 3 - Eric T.B. Gross - R.L. Bolger - Rating of Autotransformers Having Three Windings - AIEE Trans., Dez. 1957.
- 4 - Alvin H. Knable - Electrical Power Systems Engineering Mc Graw Hill - 1967



Dados

- P_p = Potencia fornecida ao enrolamento de tensão superior
- E_p = Tensão no enrolamento de tensão superior
- PBC = Potencia do banco de capacitores
- Z_p = Impedancia do enrolamento de tensão superior
- Z_s = Impedancia do enrolamento de média tensão
- Z_T = Impedancia do enrolamento de baixa tensão

Valores calculados

- E_s = Tensão no enrolamento de média tensão
- P_s = Potencia no enrolamento de média tensão
- E_T = Tensão no enrolamento de baixa tensão
- P_T = Potencia no enrolamento de baixa tensão

$$E_p \text{ base} = 345/\sqrt{3} \text{ kV}$$

$$E_s \text{ base} = 230/\sqrt{3} \text{ kV}$$

$$E_T \text{ base} = 13,8 \text{ kV}$$

$$P \text{ base} = 100 \text{ MVA trifásico}$$

Ilustração 5.0-1
Exemplo de aplicação

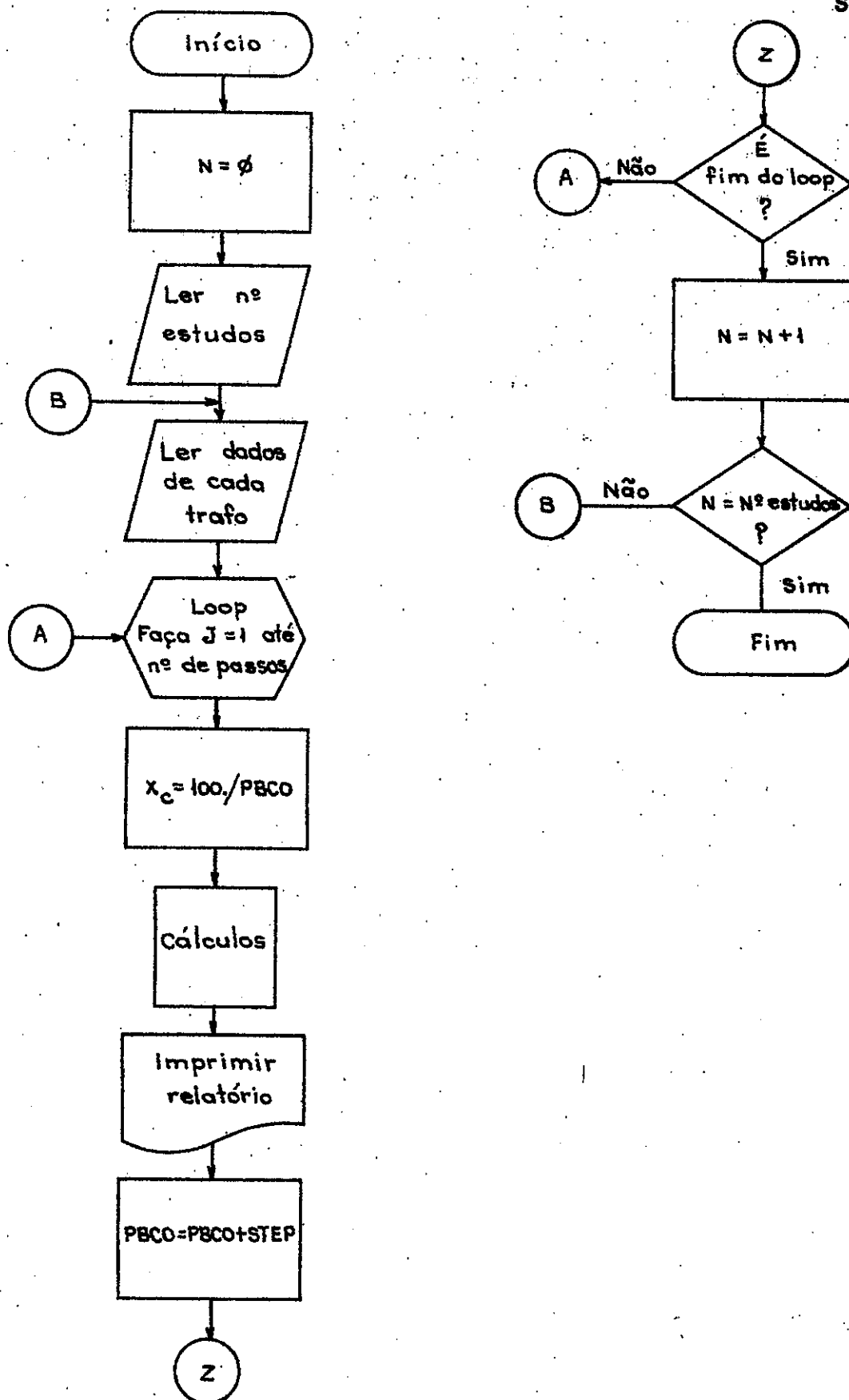
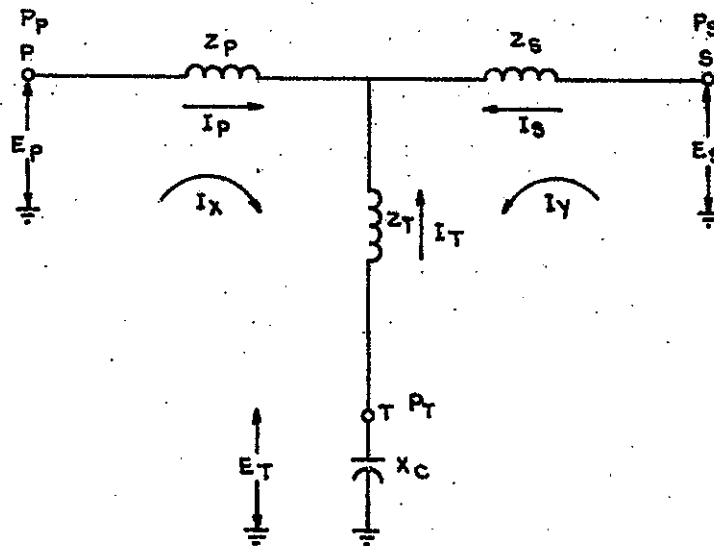


Ilustração 2.0-2
Diagrama de bloco



- Z_p, Z_s, Z_T = impedancias do enrolamento de alta, média e baixa tensão respectivamente
 I_p, I_s, I_T = corrente nos enrolamentos de alta, média e baixa tensão respectivamente
 X_c = reatância capacitiva do banco de capacitores
 E_p, E_s, E_T = tensão nos enrolamentos de alta, média e baixa tensão respectivamente
 I_x, I_y = correntes de malha

Ilustração 2.0-1

Circuito equivalente de um transformador de 3 enrolamentos ou auto-trafo com terciário acessível

TRAFO-FABR X - SE Y

POT= 2.250 FP=1.000 EP= .980 XP= .0790 XS= -.0057 XT= .0525 PBCO= 33.0 PAS= 3.0 NPAS= 16

POT. BANCO CAPACITOR	CORR. PRIMARIO REAL IMAG.	CORR. SECUNDARIO REAL IMAG.	CORR. TERCARIO REAL IMAG.	VOLT SECUNDARIO REAL IMAG.	VOLT TERCARIO REAL IMAG.	POT. SECUNDARIO REAL IMAG.	POT. TERCARIO REAL IMAG.
33.000	2.296 .000	-2.235 .329	-.061 -.329	.982 -.169	.997 -.185	-2.250 .054	-.000 .339
	2.296 90.06	2.259 -81.66	.335 -169.56	.996 99.76	1.014 100.56	2.251 -88.66	.339 -.06
36.000	2.296 .000	-2.229 .360	-.067 -.360	.982 -.169	.999 -.185	-2.250 .023	.000 .371
	2.296 90.06	2.258 -80.86	.366 -169.56	.996 99.76	1.016 100.56	2.250 -89.46	.371 .06
39.000	2.296 .000	-2.224 .390	-.072 -.390	.982 -.169	1.000 -.185	-2.250 -.008	.000 .404
	2.296 90.06	2.258 -80.06	.397 -169.56	.997 99.76	1.017 100.56	2.250 -90.26	.404 .06
42.000	2.296 .000	-2.218 .421	-.078 -.421	.982 -.169	1.002 -.185	-2.250 -.039	.000 .436
	2.296 90.06	2.258 -79.36	.428 -169.56	.997 99.76	1.019 100.56	2.250 -91.06	.436 .06
45.000	2.296 .000	-2.212 .452	-.084 -.452	.983 -.169	1.004 -.186	-2.250 -.070	.000 .469
	2.296 90.06	2.258 -78.56	.459 -169.56	.997 99.76	1.021 100.56	2.251 -91.86	.469 .06
48.000	2.296 .000	-2.207 .483	-.089 -.483	.983 -.169	1.005 -.186	-2.250 -.102	.000 .502
	2.296 90.06	2.259 -77.76	.491 -169.56	.997 99.76	1.022 100.56	2.252 -92.66	.502 .06
51.000	2.296 .000	-2.201 .514	-.095 -.514	.983 -.169	1.007 -.186	-2.250 -.133	.000 .535
	2.296 90.06	2.260 -76.96	.522 -169.56	.997 99.76	1.024 100.56	2.254 -93.46	.535 .06
54.000	2.296 .000	-2.195 .545	-.101 -.545	.983 -.169	1.009 -.187	-2.250 -.165	.000 .568
	2.296 90.06	2.262 -76.16	.554 -169.56	.998 99.76	1.026 100.56	2.256 -94.26	.568 .06
57.000	2.296 .000	-2.189 .576	-.107 -.576	.983 -.169	1.010 -.187	-2.250 -.196	.000 .602
	2.296 90.06	2.264 -75.36	.586 -169.56	.998 99.76	1.027 100.56	2.259 -95.06	.602 .06
60.000	2.296 .000	-2.184 .607	-.112 -.607	.983 -.169	1.012 -.187	-2.250 -.228	.000 .635
	2.296 90.06	2.266 -74.56	.617 -169.56	.998 99.76	1.029 100.56	2.262 -95.86	.635 .06
63.000	2.296 .000	-2.178 .639	-.118 -.639	.984 -.169	1.014 -.188	-2.250 -.260	.000 .669
	2.296 90.06	2.269 -73.76	.649 -169.56	.998 99.76	1.031 100.56	2.265 -96.66	.669 .06
66.000	2.296 .000	-2.172 .670	-.124 -.670	.984 -.169	1.015 -.188	-2.250 -.292	.000 .703
	2.296 90.06	2.273 -72.96	.681 -169.56	.998 99.76	1.032 100.56	2.269 -97.46	.703 .06
69.000	2.296 .000	-2.166 .702	-.130 -.702	.984 -.169	1.017 -.188	-2.250 -.324	.000 .738
	2.296 90.06	2.277 -72.16	.714 -169.56	.998 99.76	1.034 100.56	2.273 -98.26	.738 .06
72.000	2.296 .000	-2.160 .733	-.136 -.733	.984 -.169	1.018 -.189	-2.250 -.357	.000 .772
	2.296 90.06	2.281 -71.26	.746 -169.56	.999 99.76	1.036 100.56	2.278 -99.06	.772 .06
75.000	2.296 .000	-2.154 .765	-.142 -.765	.984 -.169	1.020 -.189	-2.250 -.389	.000 .807
	2.296 90.06	2.286 -70.46	.778 -169.56	.999 99.76	1.037 100.56	2.283 -99.86	.807 .06
78.000	2.296 .000	-2.148 .797	-.148 -.797	.985 -.169	1.022 -.189	-2.250 -.421	.000 .842
	2.296 90.06	2.291 -69.66	.811 -169.56	.999 99.76	1.039 100.56	2.289 -100.66	.842 .06
81.000	2.296 .000	-2.142 .829	-.153 -.829	.985 -.169	1.024 -.189	-2.250 -.454	.000 .878
	2.296 90.06	2.297 -68.86	.843 -169.56	.999 99.76	1.041 100.56	2.295 -101.46	.878 .06

SP / GSP / 06

ANEXO