





Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-108 Rev 0 25/08/16
RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CONDUTOR - CAMPO MAGNÉTICO		

ÍNDICE

1.	OBJETIVO.....	2
2.	DADOS ELÉTRICOS DO SISTEMA	2
3.	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	2
4.	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES	2
5.	CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO	3
6.	CAMPO ELÉTRICO	3
7.	CARREGAMENTO NOS CIRCUITOS	3
8.	METODOLOGIA APLICADA	3
8.1	Premissas de Cálculo	3
9.	LIMITES DE EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS.....	4
10.	SIMULAÇÕES DE EMISSÃO DE CAMPO MAGNÉTICO	4
10.1	CASO 1.....	6
10.2	CASO 2.....	7
10.3	CASO 3.....	8
11.	CONCLUSÃO.....	8
	ANEXO 1 – CÁLCULO CASO I	9
	ANEXO 2 – CÁLCULO CASO 2	122
	ANEXO 3 – CÁLCULO CASO 3	155

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-108 Rev 0 25/08/16
RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CONDUTOR - CAMPO MAGNÉTICO		

1. OBJETIVO

Apresentar os cálculos realizados para determinar os níveis de emissão de campo magnético do futuro RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138kV).

2. DADOS ELÉTRICOS DO SISTEMA

PARÂMETRO	VALOR
TENSÃO NOMINAL	145 KV
TENSÃO DE OPERAÇÃO ATUAL	88 KV
TENSÃO DE OPERAÇÃO FUTURA	138 KV
NÍVEL BÁSICO DE ISOLAMENTO	650 KV
POTÊNCIA NOMINAL EM REGIME PERMANENTE (88 KV)	120 MVA
POTÊNCIA NOMINAL EM REGIME PERMANENTE (138 KV)	188 MVA
CORRENTE DE CURTO CIRCUITO TRIFÁSICA	40 KA
CORRENTE DE CURTO CIRCUITO FASE-TERRA	21 KA
TEMPO DE DURAÇÃO DO CURTO CIRCUITO	1 seg
FREQUÊNCIA	60 Hz
FATOR DE CARGA	0,77



3. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

- Dissertação: Estudo de instalações de linhas subterrâneas de alta tensão com relação a campos magnéticos – Fábio Gabriel de Oliveira – São Paulo, 2010 – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
- ANEEL – Resolução normativa Nº 616 de 01/07/2014.
- “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 to 100 kHz)”, ICNIRP, HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010;
- The design of specially bonded cable circuits”, by Working Group 07 of Study Committee Nº 21, Electra Nº 28, May 1973, pp. 55-81;
- The design of specially bonded cable circuits (Part II)”, by Working Group 07 of Study Committee Nº 21, Electra Nº 47, June-July 1976, pp. 61-86;
- Magnetic field in HV cable systems 1: Systems without ferromagnetic component”, Cigré guide 104 SC 21 Doc 95/16 – JTF 36-01/21 – June 1996.
- NBR 15415 – Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50Hz e 60Hz.

4. CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES

Todos os cálculos foram feitos considerando o uso do cabo extrudado com as seguintes características:

Condutor	Alumínio
Seção	800mm ²
Isolação	XLPE
Blindagem metálica	Fios de cobre
Cobertura	HDPE

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-108 Rev 0 25/08/16
RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CONDUTOR - CAMPO MAGNÉTICO		

5. CARACTERÍSTICAS DA INSTALAÇÃO

Distância entre circuitos	500mm (horizontal)
Distância entre fases	190mm
Formação	Trifólio
Sistema de Aterramento	Crossbonding

6. CAMPO ELÉTRICO

Os cabos isolados a serem utilizados possuem blindagem metálica a fios de cobre que será diretamente aterrada em alguns pontos para formar o sistema de aterramento crossbonding.

De acordo com as leis da eletrostática (Faraday) o campo elétrico gerado pelo condutor de fase é nulo a partir da blindagem metálica do cabo.

Portanto não existe a possibilidade de emissão de campo elétrico ao meio externo do RSE.

7. CARREGAMENTO NOS CIRCUITOS

As simulações de emissão de campo magnético foram realizadas levando em consideração os carregamentos para os circuitos conforme tabela abaixo.

Caso	Tipo de Instalação	Carregamento Circuito 1	Carregamento Circuito 2
01	Banco de dutos	50%	50%
02	Banco de dutos	100%	0%
03	MND	100%	0%



Tabela 1: Carregamento dos circuitos da linha de transmissão subterrânea

8. METODOLOGIA APLICADA

O cálculo da resultante de B é baseado na Lei de Biot-Savart e no princípio da superposição da densidade de fluxo magnético gerado pelos cabos da linha.

8.1 Premissas de Cálculo

- O comprimento do circuito é longo e retilíneo, onde os cabos estão sempre paralelos entre si.
- O plano XY, onde B é calculado, é suficientemente distante das extremidades da linha, de forma a desprezar qualquer efeito externo existentes nestas extremidades.
- Não existem materiais ferromagnéticos presentes nos cabos ou próximos da linha, ou seja, a permeabilidade magnética relativa de todo o sistema é considerada unitária.
- As correntes circulantes nos condutores dos cabos são balanceadas, ou seja, são defasadas de 120° e possuem mesma magnitude.
- Em sistemas de aterramento especiais das linhas de transmissão subterrâneas, como aterramento tipo "crossbonding", as correntes induzidas nas blindagens/capas metálicas dos cabos são consideradas nulas.

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-108 Rev 0 25/08/16
RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CONDUTOR - CAMPO MAGNÉTICO		

9. LIMITES DE EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS

Os limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos, previstos na Resolução Normativa da ANEEL Nº 616 de 1 de julho de 2014, são mostrados na tabela abaixo:

	Campo elétrico (kV/m)	Campo magnético (μT)
Público em geral	4.17	200
Público ocupacional	8.33	1000

Tabela 2: Limites de exposição humana a campos elétricos e magnéticos a freq. de 60 Hz.

A portaria nº 80/SVMA/2005 da Prefeitura da Cidade de São Paulo, item 8.2, define que o limite de densidade de fluxo magnético em instalações novas deve ser de 3 micro tesla calculados como valor médio de 24 horas em locais de permanência prolongado.



10. SIMULAÇÕES DE EMISSÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

Com base nos estudos apresentados nos documentos de referência (Ítem 3), foram calculados os comportamentos do campo magnético para as três configurações de funcionamento do RSE apresentadas na Tabela 1, Ítem 6.

Nos subitens a seguir serão apresentados os resultados dos cálculos de emissão de campo magnético.

Os cálculos foram realizados considerando a altura de 1,5m sobre a superfície, num raio de 5 metros do centro entre os circuitos.

O eixo zero dos gráficos representa o centro entre os circuitos tanto no banco de dutos como no MND.

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-108 Rev 0 25/08/16
<p align="center">RSE V. FORMOSA 1-2 (88/138KV)</p> <p align="center">MEMÓRIA DE CÁLCULO</p> <p align="center">CONDUTOR - CAMPO MAGNÉTICO</p>		

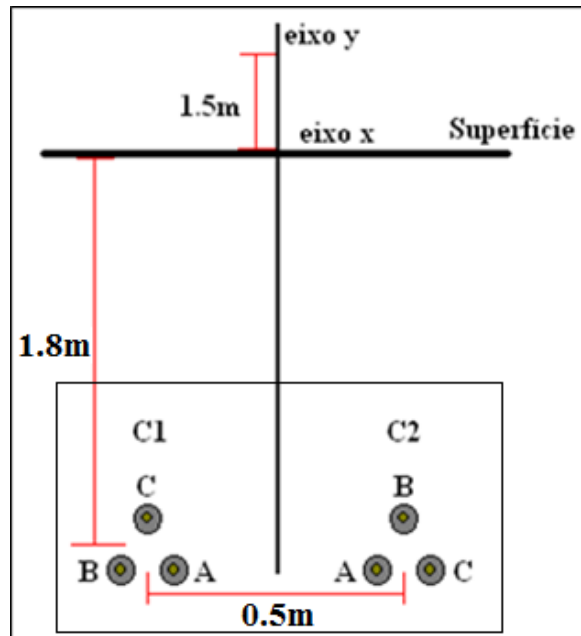


Figura 1: Banco de dutos.

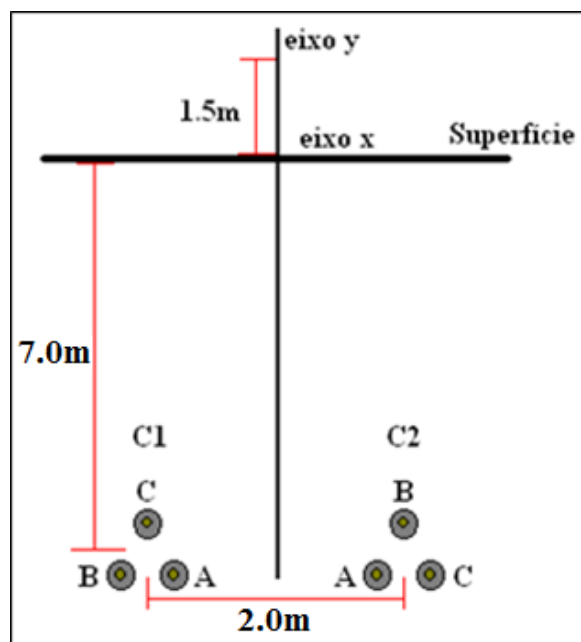




Figura 2: MND

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

10.1 CASO 1

Banco de dutos com 02 (dois) circuitos operando com fases invertidas, sendo a potência dividida em 50% para o Circuito 1 e 50% para o Circuito 2.

Nesta condição, a máxima densidade de fluxo de campo magnético resultante é de 0,936 μT .

O comportamento do campo magnético para esta configuração é demonstrado a seguir no Gráfico A.

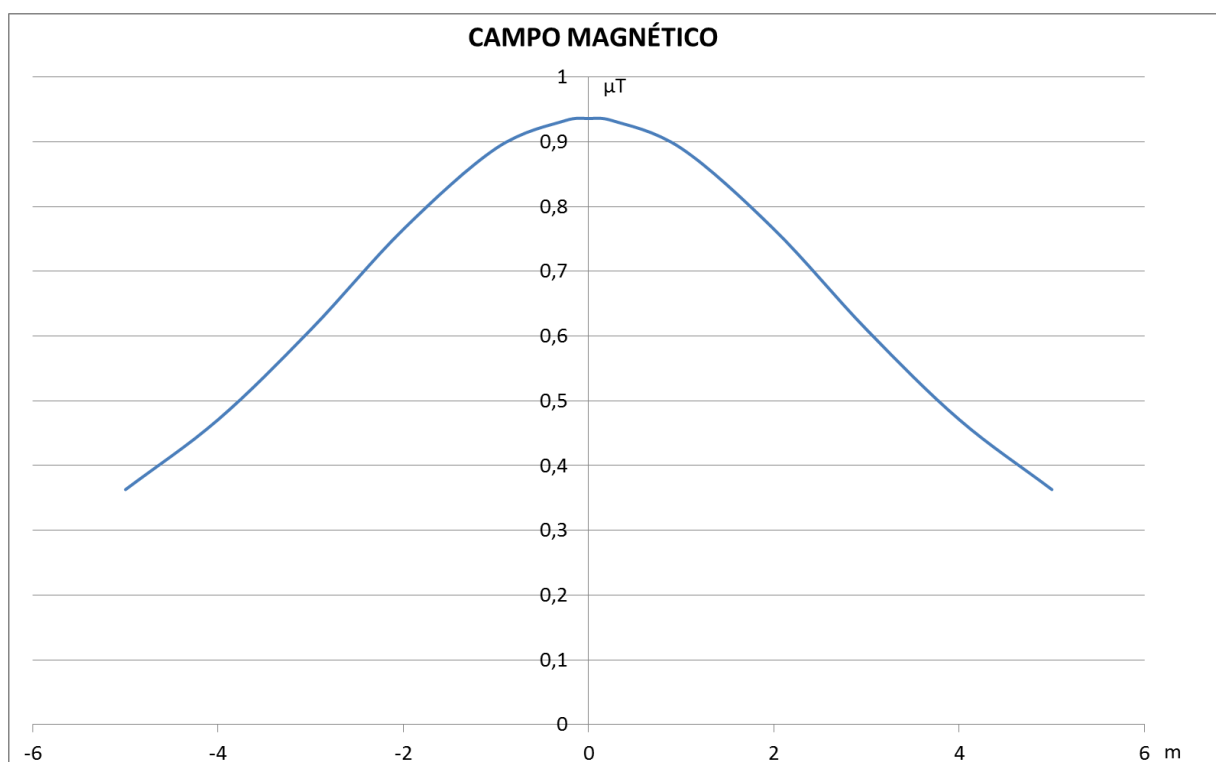




Gráfico A: Comportamento do Campo Magnético para o Caso 1.

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

10.2 CASO 2

Banco de dutos com apenas 1 circuito operando com 100% da carga nominal.

A máxima densidade de fluxo de campo magnético resultante é de 2,567 μT .

O comportamento do campo magnético para esta configuração é demonstrado a seguir no Gráfico B.

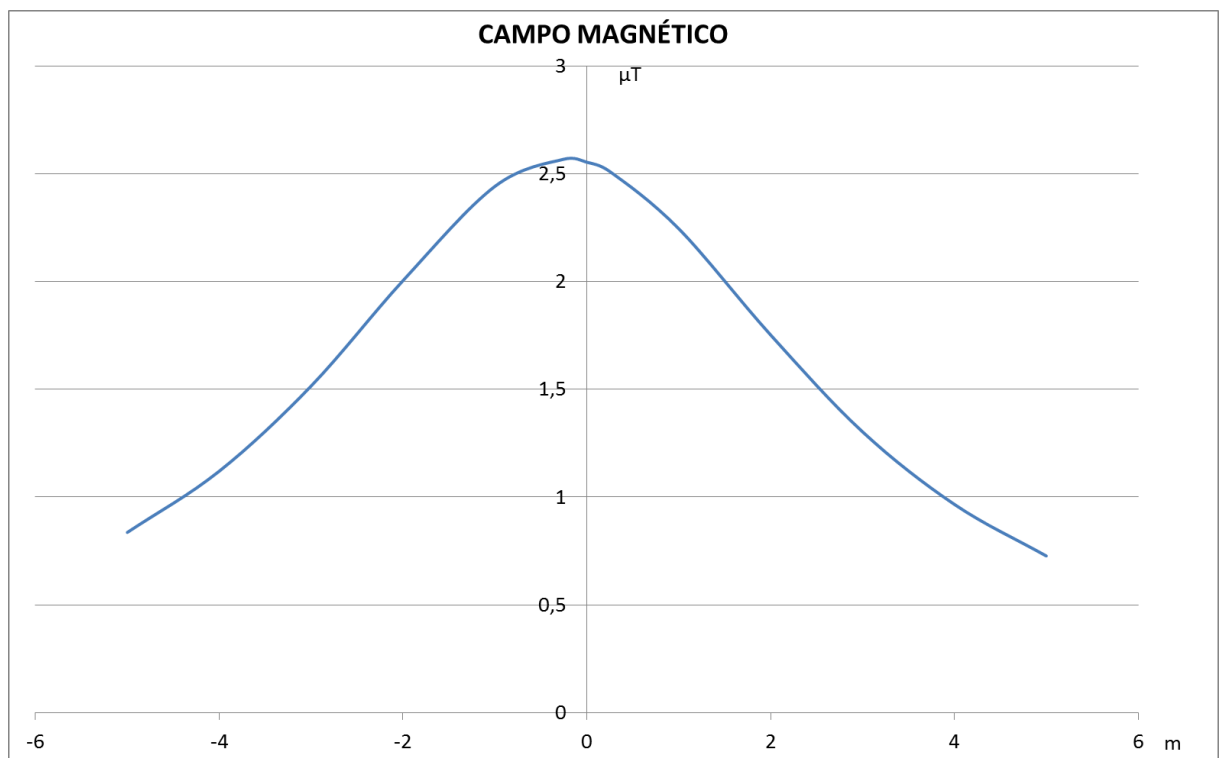




Gráfico B: Comportamento do Campo Magnético para o Caso 2.

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

10.3 CASO 3

MND a 3 metros de profundidade com apenas 1 circuito operando com 100% da carga nominal.

A máxima densidade de fluxo de campo magnético resultante é de 0,514 μT .

O comportamento do campo magnético para esta configuração é demonstrado a seguir no Gráfico C.

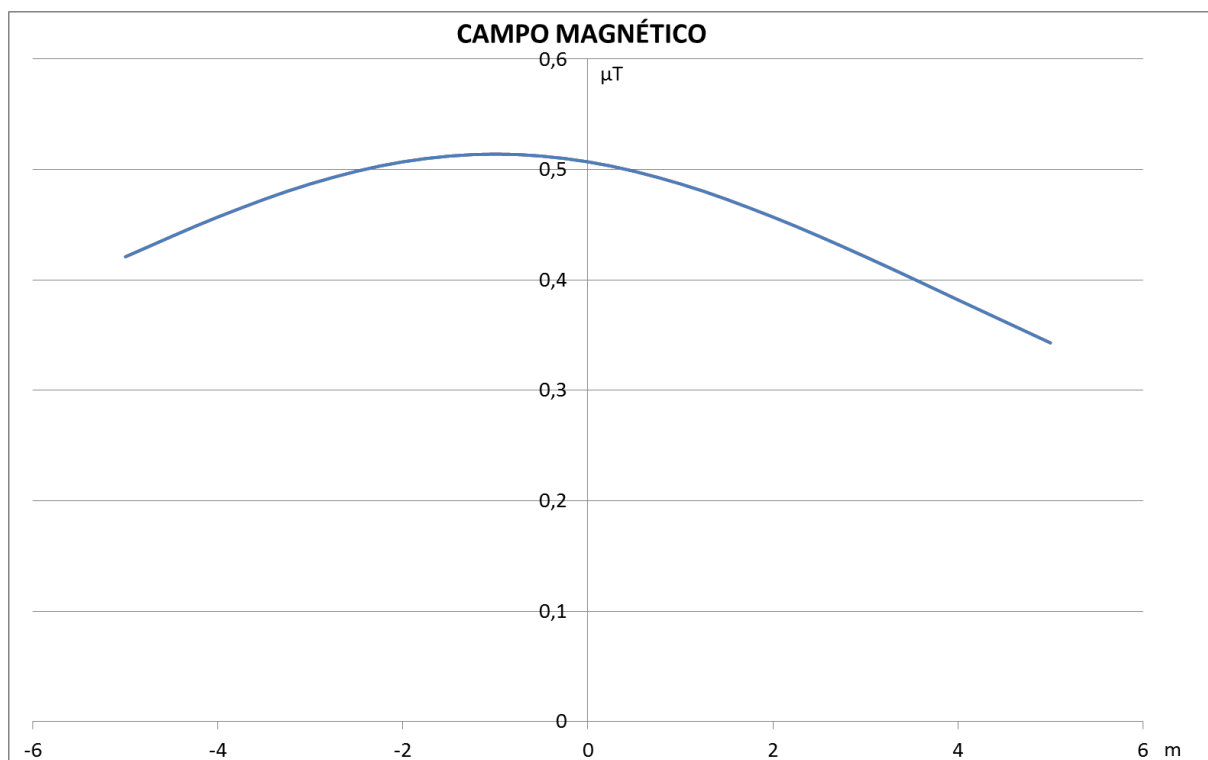




Gráfico C: Comportamento do Campo Magnético para o Caso 3.

11. CONCLUSÃO

Observando os gráficos de “A” a “C” e a tabela 2 apresentados acima fica explícito que o item 8.2 da portaria nº 80/SVMA/2005 da Prefeitura da Cidade de São Paulo é completamente atendido, e da mesma forma atende os níveis máximos de exposição apresentados na Resolução normativa Nº 616 de 01/07/2014 da ANEEL e da norma ABNT NBR 15415.

A máxima emissão de campo magnético será de **2,567 μT** , que corresponde a 1,3% do limite estabelecido pela ANEEL, valor que somente será alcançado durante os períodos de pico de carga (valor momentâneo) quando estiver operando com apenas um circuito.

Em relação ao MND, como os cabos estão instalados na formação dutos em trifólio e na profundidade de 7 metros, a emissão de campo magnético sempre será muito pequena, conforme foi mostrado no pior caso previsto no gráfico C.

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

ANEXO 1 – CÁLCULO CASO I

Dados:

Corrente nominal de operação:

Circuito 1: **Ic1 = 394 A**

Circuito 2: **Ic2 = 394 A**

Corrente nominal na Fase A1: **IcA1 = Ic1 = 394 A**

Corrente nominal na Fase B1:

$$\mathbf{IcB1} = -0.5 * \mathbf{Ic1} + \frac{\sqrt{3} * \mathbf{Ic1i}}{2} = -197 + 341.214i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C1:

$$\mathbf{IcC1} = -0.5 * \mathbf{Ic1} - \frac{\sqrt{3} * \mathbf{Ic1i}}{2} = -197 - 341.214i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase A2: **IcA2 = Ic2 = 394 A**

Corrente nominal na Fase B2:

$$\mathbf{IcB2} = -0.5 * \mathbf{Ic2} + \frac{\sqrt{3} * \mathbf{Ic2i}}{2} = -197 + 341.214i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C2:

$$\mathbf{IcC2} = -0.5 * \mathbf{Ic2} - \frac{\sqrt{3} * \mathbf{Ic2i}}{2} = -197 - 341.214i \text{ A}$$

Coordenada horizontal do cabo A1: **XA1 = -0.34 m**

Coordenada horizontal do cabo B1: **XB1 = -0.16 m**

Coordenada horizontal do cabo C1: **XC1 = -0.25 m**

Coordenada horizontal do cabo A2: **XA2 = 0.25 m**

Coordenada horizontal do cabo B2: **XB2 = 0.16 m**

Coordenada horizontal do cabo C2: **XC2 = 0.34 m**

Coordenada vertical do cabo A1: **YA1 = 1.86 m**

Coordenada vertical do cabo B1: **YB1 = 1.86 m**

Coordenada vertical do cabo C1: **YC1 = 1.69 m**



Coordenada vertical do cabo A2: **YA2 = 1.69 m**

Coordenada vertical do cabo B2: **YB2 = 1.86 m**

Coordenada vertical do cabo C2: **YC2 = 1.86 m**

Distância do ponto de interesse em relação à superfície: **y = 1.50 m**

Distância do ponto de interesse em relação ao eixo y: **x = 0 m**

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
<p style="text-align: center;">LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV)</p> <p style="text-align: center;">MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO</p>		

Cálculo dos vetores complexos associados ao campo magnético nos eixos “x” e “y”:

Cabo A1:

$$BA1x = \frac{-[0.2 * IcA1 * (y + YA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -23.215 \mu T$$

$$BA1y = \frac{[0.2 * IcA1 * (x - XA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = 2.349 \mu T$$

Cabo B1:

$$BB1x = \frac{-[0.2 * IcB1 * (y + YB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 11.7 - 20.264i \mu T$$

$$BB1y = \frac{[0.2 * IcB1 * (x - XB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = -0.557 + 0.965i \mu T$$

Cabo C1:

$$BC1x = \frac{-[0.2 * IcC1 * (y + YC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 12.276 + 21.262i \mu T$$

$$BC1y = \frac{[0.2 * IcC1 * (x - XC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = -0.962 - 1.666i \mu T$$

Cabo A2:

$$BA2x = \frac{-[0.2 * IcA2 * (y + YA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = -24.551 \mu T$$

$$BA2y = \frac{[0.2 * IcA2 * (x - XA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = -1.924 \mu T$$

Cabo B2:

$$BB2x = \frac{-[0.2 * IcB2 * (y + YB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 11.7 - 20.264i \mu T$$

$$BB2y = \frac{[0.2 * IcB2 * (x - XB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 0.557 - 0.965i \mu T$$

Cabo C2:

$$BC2x = \frac{-[0.2 * IcC2 * (y + YC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 11.607 + 20.104i \mu T$$

$$BC2y = \frac{[0.2 * IcC2 * (x - XC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 1.175 + 2.034i \mu T$$

Cálculo dos vetores complexos associados à resultante do campo magnético nos eixos “x” e “y”:



$$Bx = BA1x + BB1x + BC1x + BA2x + BB2x + BC2x = -0.484 + 0.838i \mu T$$

$$By = BA1y + BB1y + BC1y + BA2y + BB2y + BC2y = 0.638 + 0.368i \mu T$$

Valores das componentes reais de Bx e BY:

$$Bxr = -0.484 \mu T$$

$$Byr = 0.638 \mu T$$

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

Valores das componentes imaginárias de Bx e BY:

$$B_{xi} = 0.838 \mu T$$

$$B_{yi} = 0.368 \mu T$$

Coeficiente para cálculo de ωt :

$$M = \frac{(B_{xr})^2 - (B_{xi})^2 + (B_{yr})^2 - (B_{yi})^2}{B_{xr} * B_{xi} + B_{yr} * B_{yi}} = 1.155$$

Velocidade angular máxima:

$$\omega t_{max} = \text{atan} \left[\frac{M}{2} + \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \right] = 1.047 \text{ Rad/s}$$

Velocidade angular mínima:

$$\omega t_{min} = \text{atan} \left[\frac{M}{2} - \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \right] = -0.524 \text{ Rad/s}$$

Valor mínimo do campo magnético:

$$B_{min} = \sqrt{(B_{xr} * \cos(\omega t_{max}) - B_{xi} * \sin(\omega t_{max}))^2 + (B_{yr} * \cos(\omega t_{max}) - B_{yi} * \sin(\omega t_{max}))^2} = 0.967 \mu T$$

Valor máximo do campo magnético:



$$B_{max} = \sqrt{(B_{xr} * \cos(\omega t_{min}) - B_{xi} * \sin(\omega t_{min}))^2 + (B_{yr} * \cos(\omega t_{min}) - B_{yi} * \sin(\omega t_{min}))^2} = 0.736 \mu T$$

Valor do campo magnético eficaz:

$$B_{ef} = \sqrt{B_{max}^2 + B_{min}^2} = 1.216 \mu T$$

Valor do campo magnético eficaz considerando fator de carga de 77%:

$$B_{ef77\%} = B_{ef} * 0.77 = 0.936 \mu T$$

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

ANEXO 2 – CÁLCULO CASO 2

Dados:

Corrente nominal de operação:

Circuito 1: **Ic1 = 787 A**

Circuito 2: **Ic2 = 0 A**

Corrente nominal na Fase A1: **IcA1 = Ic1 = 787 A**

Corrente nominal na Fase B1:

$$IcB1 = -0.5 * Ic1 + \frac{\sqrt{3} * Ic1i}{2} = -393.5 + 681.562i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C1:

$$IcC1 = -0.5 * Ic1 - \frac{\sqrt{3} * Ic1i}{2} = -393.5 - 681.562i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase A2: **IcA2 = Ic2 = 0 A**

Corrente nominal na Fase B2:

$$IcB2 = -0.5 * Ic2 + \frac{\sqrt{3} * Ic2i}{2} = 0 \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C2:

$$IcC2 = -0.5 * Ic2 - \frac{\sqrt{3} * Ic2i}{2} = 0 \text{ A}$$

Coordenada horizontal do cabo A1: **XA1 = -0.34 m**
Coordenada horizontal do cabo B1: **XB1 = -0.16 m**
Coordenada horizontal do cabo C1: **XC1 = -0.25 m**


Coordenada horizontal do cabo A2: **XA2 = 0.25 m**
Coordenada horizontal do cabo B2: **XB2 = 0.16 m**
Coordenada horizontal do cabo C2: **XC2 = 0.34 m**

Coordenada vertical do cabo A1: **YA1 = 1.86 m**
Coordenada vertical do cabo B1: **YB1 = 1.86 m**
Coordenada vertical do cabo C1: **YC1 = 1.69 m**

Coordenada vertical do cabo A2: **YA2 = 1.69 m**
Coordenada vertical do cabo B2: **YB2 = 1.86 m**
Coordenada vertical do cabo C2: **YC2 = 1.86 m**

Distância do ponto de interesse em relação à superfície: **y = 1.50 m**

Distância do ponto de interesse em relação ao eixo y: **x = -0.25 m**

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

Cálculo dos vetores complexos associados ao campo magnético nos eixos “x” e “y”:

Cabo A1:

$$BA1x = \frac{-[0.2 * IcA1 * (y + YA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -46.812 \mu T$$

$$BA1y = \frac{[0.2 * IcA1 * (x - XA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = 1.254 \mu T$$

Cabo B1:

$$BB1x = \frac{-[0.2 * IcB1 * (y + YB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 23.406 - 40.54i \mu T$$

$$BB1y = \frac{[0.2 * IcB1 * (x - XB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 0.627 - 1.086i \mu T$$

Cabo C1:

$$BC1x = \frac{-[0.2 * IcC1 * (y + YC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 24.671 + 42.731i \mu T$$

$$BC1y = \frac{[0.2 * IcC1 * (x - XC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 0 \mu T$$

Cabo A2:

$$BA2x = \frac{-[0.2 * IcA2 * (y + YA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = 0 \mu T$$

$$BA2y = \frac{[0.2 * IcA2 * (x - XA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = 0 \mu T$$

Cabo B2:

$$BB2x = \frac{-[0.2 * IcB2 * (y + YB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 0 \mu T$$

$$BB2y = \frac{[0.2 * IcB2 * (x - XB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 0 \mu T$$

Cabo C2:

$$BC2x = \frac{-[0.2 * IcC2 * (y + YC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 0 \mu T$$

$$BC2y = \frac{[0.2 * IcC2 * (x - XC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 0 \mu T$$

Cálculo dos vetores complexos associados à resultante do campo magnético nos eixos “x” e “y”:



$$Bx = BA1x + BB1x + BC1x + BA2x + BB2x + BC2x = 1.265 + 2.191i \mu T$$

$$By = BA1y + BB1y + BC1y + BA2y + BB2y + BC2y = 1.881 - 1.086 \mu T$$

Valores das componentes reais de Bx e BY:

$$Bxr = 1.265 \mu T$$

$$Byr = 1.881 \mu T$$

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

Valores das componentes imaginárias de Bx e BY:

$$\begin{aligned} \mathbf{B_{xi}} &= 2.191 \mu\text{T} \\ \mathbf{B_{yi}} &= -1.086 \mu\text{T} \end{aligned}$$

Coeficiente para cálculo de ωt :

$$\mathbf{M} = \frac{(\mathbf{B_{xr}})^2 - (\mathbf{B_{xi}})^2 + (\mathbf{B_{yr}})^2 - (\mathbf{B_{yi}})^2}{\mathbf{B_{xr}} * \mathbf{B_{xi}} + \mathbf{B_{yr}} * \mathbf{B_{yi}}} = -1.155$$

Velocidade angular máxima:

$$\omega t_{\max} = \text{atan} \left[\frac{\mathbf{M}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\mathbf{M}}{2}\right)^2 + 1} \right] = 0.524 \text{ Rad/s}$$

Velocidade angular mínima:

$$\omega t_{\min} = \text{atan} \left[\frac{\mathbf{M}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\mathbf{M}}{2}\right)^2 + 1} \right] = -1.047 \text{ Rad/s}$$

Valor mínimo do campo magnético:

$$\mathbf{B_{min}} = \sqrt{(\mathbf{B_{xr}} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B_{xi}} * \sin(\omega t_{\max}))^2 + (\mathbf{B_{yr}} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B_{yi}} * \sin(\omega t_{\max}))^2} = 2.172 \mu\text{T}$$

Valor máximo do campo magnético:



$$\mathbf{B_{max}} = \sqrt{(\mathbf{B_{xr}} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B_{xi}} * \sin(\omega t_{\min}))^2 + (\mathbf{B_{yr}} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B_{yi}} * \sin(\omega t_{\min}))^2} = 2.53 \mu\text{T}$$

Valor do campo magnético eficaz:

$$\mathbf{B_{ef}} = \sqrt{\mathbf{B_{max}}^2 + \mathbf{B_{min}}^2} = 3.334 \mu\text{T}$$

Valor do campo magnético eficaz considerando fator de carga de 77%:

$$\mathbf{B_{ef77\%}} = \mathbf{B_{ef}} * 0.77 = 2.567 \mu\text{T}$$

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

ANEXO 3 – CÁLCULO CASO 3

Dados:

Corrente nominal de operação:

Circuito 1: **Ic1 = 787 A**

Circuito 2: **Ic2 = 0 A**

Corrente nominal na Fase A1: **IcA1 = Ic1 = 787 A**

Corrente nominal na Fase B1:

$$IcB1 = -0.5 * Ic1 + \frac{\sqrt{3} * Ic1i}{2} = -393.5 + 681.562i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C1:

$$IcC1 = -0.5 * Ic1 - \frac{\sqrt{3} * Ic1i}{2} = -393.5 - 681.562i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase A2: **IcA2 = Ic2 = 0 A**

Corrente nominal na Fase B2:

$$IcB2 = -0.5 * Ic2 + \frac{\sqrt{3} * Ic2i}{2} = 0 \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C2:

$$IcC2 = -0.5 * Ic2 - \frac{\sqrt{3} * Ic2i}{2} = 0 \text{ A}$$

Coordenada horizontal do cabo A1: **XA1 = -1.10 m**

Coordenada horizontal do cabo B1: **XB1 = -0.90 m**

Coordenada horizontal do cabo C1: **XC1 = -1.00 m**

Coordenada horizontal do cabo A2: **XA2 = 1.00 m**

Coordenada horizontal do cabo B2: **XB2 = 0.90 m**

Coordenada horizontal do cabo C2: **XC2 = 1.10 m**

Coordenada vertical do cabo A1: **YA1 = 7.05 m**

Coordenada vertical do cabo B1: **YB1 = 7.05 m**

Coordenada vertical do cabo C1: **YC1 = 6.89 m**

Coordenada vertical do cabo A2: **YA2 = 6.89 m**

Coordenada vertical do cabo B2: **YB2 = 7.05 m**

Coordenada vertical do cabo C2: **YC2 = 7.05 m**

Distância do ponto de interesse em relação à superfície: **y = 1.50 m**

Distância do ponto de interesse em relação ao eixo y: **x = -1.0 m**

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

Cálculo dos vetores complexos associados ao campo magnético nos eixos “x” e “y”:

Cabo A1:

$$BA1x = \frac{-[0.2 * IcA1 * (y + YA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -18.407 \mu T$$

$$BA1y = \frac{[0.2 * IcA1 * (x - XA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = 0.215 \mu T$$

Cabo B1:

$$BB1x = \frac{-[0.2 * IcB1 * (y + YB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 9.203 - 15.941i \mu T$$

$$BB1y = \frac{[0.2 * IcB1 * (x - XB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 0.108 - 0.186i \mu T$$

Cabo C1:

$$BC1x = \frac{-[0.2 * IcC1 * (y + YC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 9.38 + 16.247i \mu T$$

$$BC1y = \frac{[0.2 * IcC1 * (x - XC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 0 \mu T$$

Cabo A2:

$$BA2x = \frac{-[0.2 * IcA2 * (y + YA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = 0 \mu T$$

$$BA2y = \frac{[0.2 * IcA2 * (x - XA2)]}{(y + YA2)^2 + (x - XA2)^2} = 0 \mu T$$

Cabo B2:

$$BB2x = \frac{-[0.2 * IcB2 * (y + YB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 0 \mu T$$

$$BB2y = \frac{[0.2 * IcB2 * (x - XB2)]}{(y + YB2)^2 + (x - XB2)^2} = 0 \mu T$$

Cabo C2:

$$BC2x = \frac{-[0.2 * IcC2 * (y + YC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 0 \mu T$$

$$BC2y = \frac{[0.2 * IcC2 * (x - XC2)]}{(y + YC2)^2 + (x - XC2)^2} = 0 \mu T$$

Cálculo dos vetores complexos associados à resultante do campo magnético nos eixos “x” e “y”:



$$Bx = BA1x + BB1x + BC1x + BA2x + BB2x + BC2x = 0.177 + 0.306i \mu T$$

$$By = BA1y + BB1y + BC1y + BA2y + BB2y + BC2y = 0.323 - 0.186i \mu T$$

Valores das componentes reais de Bx e BY:

$$Bxr = 0.177 \mu T$$

$$Byr = 0.323 \mu T$$

Contratada 	Cliente 	SEL/16.00010-XXX Rev 0 25/08/16
LTS ETR ETD VILA FORMOSA 1-2 (88/138KV) MEMÓRIA DE CÁLCULO CAMPO MAGNÉTICO		

Valores das componentes imaginárias de Bx e BY:

$$\begin{aligned} \mathbf{B_{xi}} &= \mathbf{0.306 \mu T} \\ \mathbf{B_{yi}} &= \mathbf{-0.186 \mu T} \end{aligned}$$

Coeficiente para cálculo de ωt :

$$\mathbf{M = \frac{(B_{xr})^2 - (B_{xi})^2 + (B_{yr})^2 - (B_{yi})^2}{B_{xr} * B_{xi} + B_{yr} * B_{yi}} = -1.155}$$

Velocidade angular máxima:

$$\omega t_{\max} = \operatorname{atan} \left[\frac{M}{2} + \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \right] = \mathbf{0.524 \text{ Rad/s}}$$

Velocidade angular mínima:

$$\omega t_{\min} = \operatorname{atan} \left[\frac{M}{2} - \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \right] = \mathbf{-1.047 \text{ Rad/s}}$$

Valor mínimo do campo magnético:

$$\mathbf{B_{\min} = \sqrt{(B_{xr} * \cos(\omega t_{\max}) - B_{xi} * \sin(\omega t_{\max}))^2 + (B_{yr} * \cos(\omega t_{\max}) - B_{yi} * \sin(\omega t_{\max}))^2} = \mathbf{0.373 \mu T}}$$

Valor máximo do campo magnético:

$$\mathbf{B_{\max} = \sqrt{(B_{xr} * \cos(\omega t_{\min}) - B_{xi} * \sin(\omega t_{\min}))^2 + (B_{yr} * \cos(\omega t_{\min}) - B_{yi} * \sin(\omega t_{\min}))^2} = \mathbf{0.354 \mu T}}$$

Valor do campo magnético eficaz:

$$\mathbf{B_{ef} = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2} = \mathbf{0.514 \mu T}}$$