

0	EMISSÃO INICIAL	VSL	RDTJ	EKF	06/03/17		
Nº	DESCRIÇÃO	FEITO	VISTO	APROV.	DATA	APROV.	DATA
		PROJETISTA				CLIENTE	

REVISÕES



PROJ.	LTS CENTRO – AUGUSTA 1 (88/138kV)				VERIF.	
DES.					VISTO	
VERIF.	CAMPO MAGNÉTICO				APROV.	
VISTO					DATA 06/03/17	
APROV.	ESC.	NºCLIENTE	SEL/16.00009-085		FL.	REV.
DATA	-	NºPROJETISTA	EDS-544/085		1/11	0

ÍNDICE

1.	OBJETIVO	3
2.	DADOS ELÉTRICOS DO SISTEMA.....	3
3.	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	3
4.	CARACTERÍSTICAS DOS CABOS CONDUTORES	3
5.	CAMPO ELÉTRICO.....	3
6.	CARREGAMENTO NOS CIRCUITOS DA LTS.....	4
7.	METODOLOGIA APLICADA	4
7.1	PREMISSAS DE CÁLCULO	4
8.	LIMITES DE EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS.....	4
9.	SIMULAÇÕES DE EMISSÃO DE CAMPO MAGNÉTICO	4
9.1	CASO 1	6
9.2	CASO 2	7
10.	CONCLUSÃO	7
	ANEXO I – CÁLCULO CASO 1	8
	ANEXO II – CÁLCULO CASO 2	10

1. OBJETIVO

Apresentar os cálculos realizados para determinar os níveis de emissão de campo magnético da futura LTS Centro – Augusta 1 (88/138kV).

2. DADOS ELÉTRICOS DO SISTEMA

- Tensão nominal do sistema: 145 kV
- Tensão de operação: 88 kV (futuro 138 kV)
- Nível básico de isolamento: 650 kV
- Potência nominal em regime permanente: 160 MVA em 88 kV | 251 MVA em 138 kV
- Corrente de curto circuito trifásica: 40 kA
- Corrente de curto circuito fase-terra: 21 kA
- Tempo de duração do curto circuito para dimensionamento do cabo: 60 ciclos (1s)
- Frequência do sistema: 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 condutor de fase de alumínio segmentado de seção 1400mm², isolamento a base de XLPE, blindagem metálica a fios de cobre e cobertura HDPE.

5. 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 Cross Bonding.

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 da LTS Centro – Augusta 1.

6. CARREGAMENTO NOS CIRCUITOS DA LTS

As simulações de emissão de campo magnético foram realizadas levando em consideração o carregamento para o circuito conforme tabela abaixo.

Caso	Tipo de Instalação	Carregamento
01	Banco de dutos	100%
02	MND	100%

Tabela 1: Carregamento da linha de transmissão subterrânea

7. 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.

7.1 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 "Cross Bonding", as correntes induzidas nas blindagens/capas metálicas dos cabos são consideradas nulas.

8. 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 N° 616 de 1 de julho de 2014, são mostrados na tabela abaixo:

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

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

A portaria n° 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.

9. SIMULAÇÕES DE EMISSÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

Com base nos estudos apresentados nos documentos de referência (Item 3), foram calculados os comportamentos do campo magnético para as duas configurações de funcionamento da LTS apresentadas na Tabela 1, Item 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 do circuito tanto no banco de dutos como no MND.

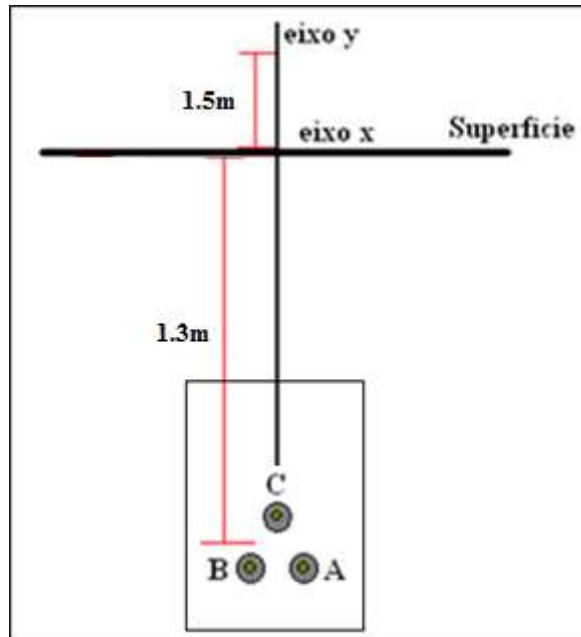


Figura 1: Banco de dutos.

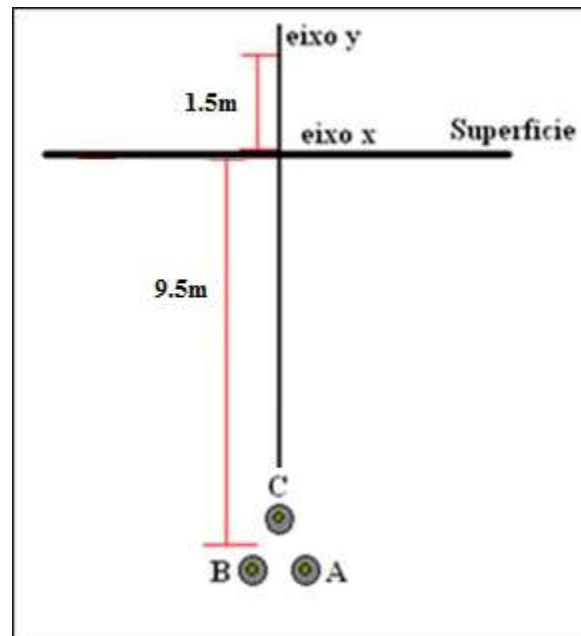


Figura 2: MND

9.1 CASO 1

Banco de dutos com circuito operando com 100% de potência. Nesta condição, a máxima densidade de fluxo de campo magnético resultante é de 4,827 μT . O comportamento do campo magnético para esta configuração é demonstrado a seguir no Gráfico A.

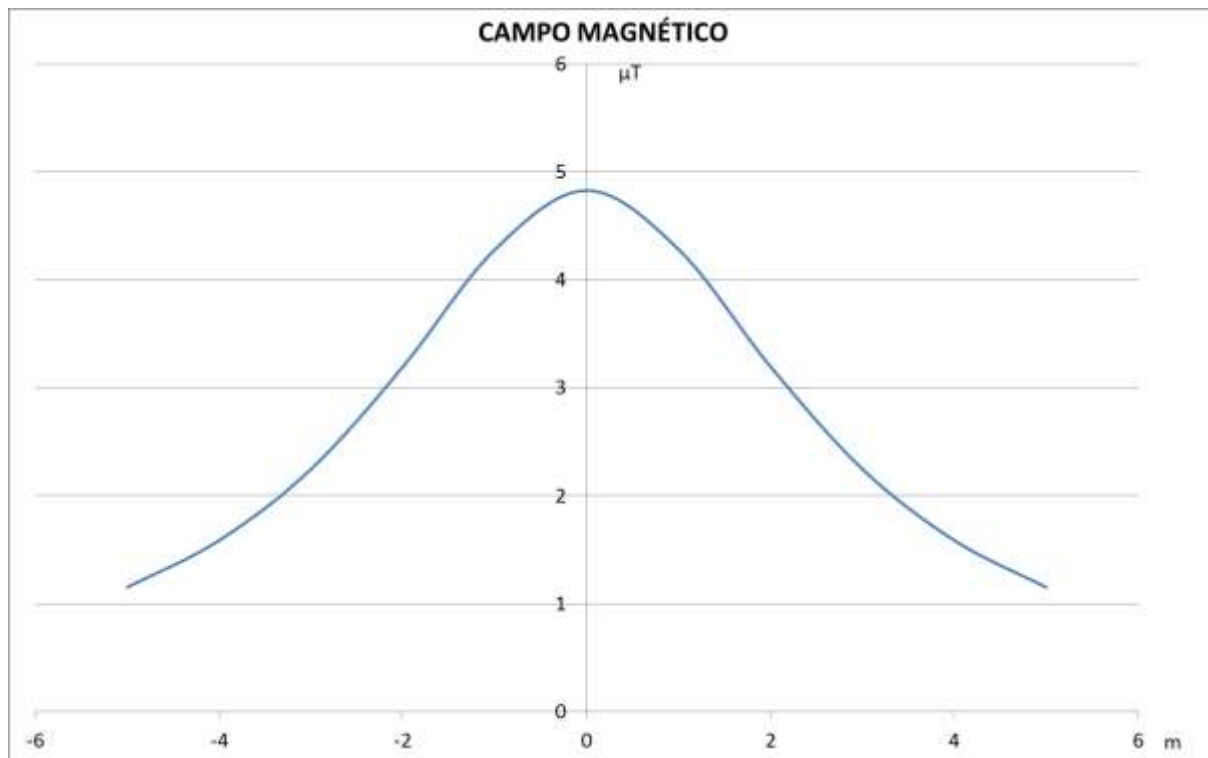


Gráfico A: Comportamento do Campo Magnético para o Caso 1.

9.2 CASO 2

MND a 9,5m de profundidade, com circuito operando com 100% de potência. Nesta condição, a máxima densidade de fluxo de campo magnético resultante é de 0,311 μT . O comportamento do campo magnético para esta configuração é demonstrado a seguir no Gráfico B.

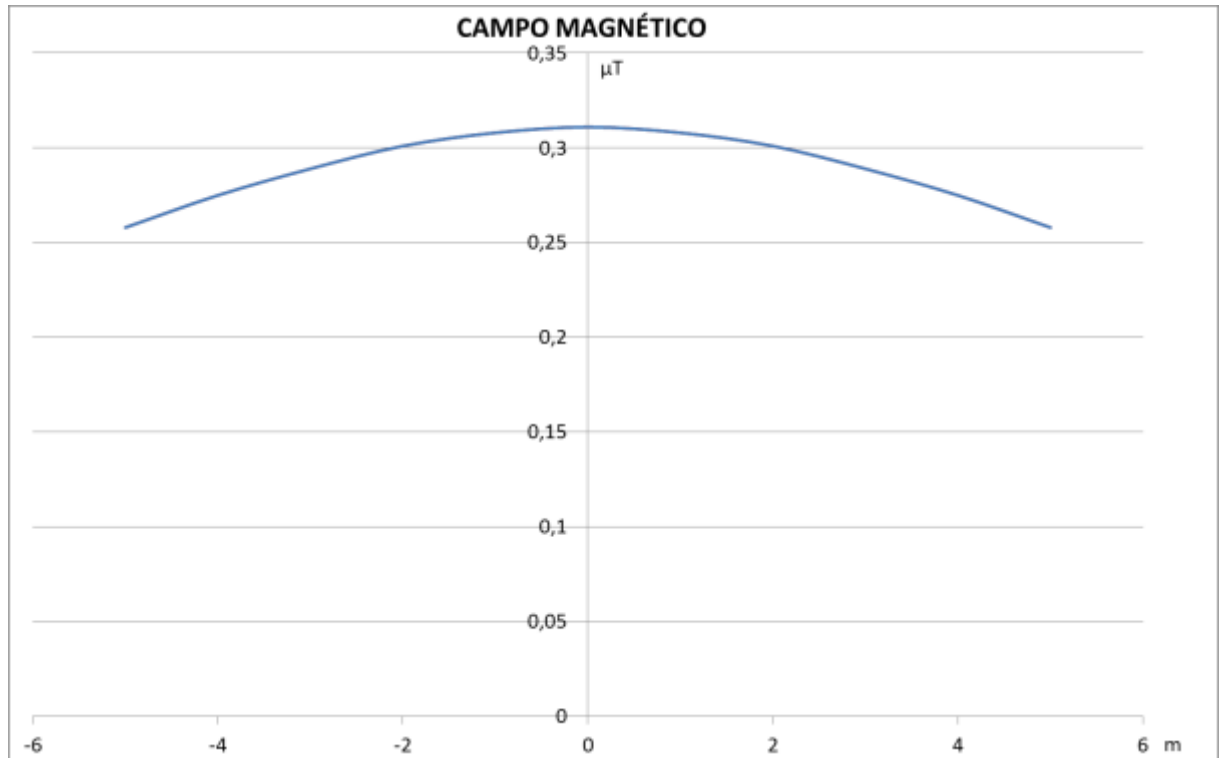


Gráfico B: Comportamento do Campo Magnético para o Caso 2.

10. CONCLUSÃO

Observando os gráficos "A" E "B" e a tabela 2 apresentados acima fica explícito que atende os níveis máximos de exposição apresentados na Resolução normativa N° 616 de 01/07/2014 da ANEEL e da norma ABNT NBR 15415, pois a máxima emissão de campo magnético será de 4,827 μT , que corresponde a 2,4% do limite estabelecido pela ANEEL, valor que somente será alcançado durante os períodos de pico de carga (valor momentâneo).

Em relação ao MND, como os cabos estão instalados na formação dutos em trifólio e na profundidade de 9,5 metros, a emissão de campo magnético sempre será muito pequena, conforme foi mostrado no pior caso previsto no gráfico B.

Para atender os requisitos do item 8.2 da portaria nº 80/SVMA/2005 da Prefeitura da Cidade de São Paulo, no caso do banco de dutos, o eixo central da futura LTS Centro – Augusta 1 deverá estar no mínimo a 2,20 metros de distância da divisa das edificações vizinhas, o que garantirá a emissão de campo magnético inferior a 3 μT com o circuito operando em plena carga.

ANEXO I – CÁLCULO CASO 1

Dados:

Corrente nominal de operação:

Circuito 1: $I_{c1} = 1050 \text{ A}$

Corrente nominal na Fase A1: $I_{cA1} = I_{c1} = 1050 \text{ A}$

Corrente nominal na Fase B1:

$$I_{cB1} = -0.5 * I_{c1} + \frac{\sqrt{3} * I_{c1}i}{2} = -525 + 909.327i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C1:

$$I_{cC1} = -0.5 * I_{c1} - \frac{\sqrt{3} * I_{c1}i}{2} = -525 - 909.327i \text{ A}$$

Coordenada horizontal do cabo A1: $XA1 = 0.095 \text{ m}$
 Coordenada horizontal do cabo B1: $XB1 = -0.095 \text{ m}$
 Coordenada horizontal do cabo C1: $XC1 = 0 \text{ m}$

Coordenada vertical do cabo A1: $YA1 = 1.355 \text{ m}$
 Coordenada vertical do cabo B1: $YB1 = 1.355 \text{ m}$
 Coordenada vertical do cabo C1: $YC1 = 1.189 \text{ m}$

Distância do ponto de interesse em relação à superfície: $y = 1.50 \text{ m}$

Distância do ponto de interesse em relação ao eixo x : $x = 0 \text{ m}$

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

Cabo A1:

$$BA1x = \frac{-[0.2 * I_{cA1} * (y + YA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -73.474 \mu\text{T}$$

$$BA1y = \frac{[0.2 * I_{cA1} * (x - XA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -2.445 \mu\text{T}$$

Cabo B1:

$$BB1x = \frac{-[0.2 * I_{cB1} * (y + YB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 36.737 - 63.63i \mu\text{T}$$

$$BB1y = \frac{[0.2 * I_{cB1} * (x - XB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = -1.222 + 2.117i \mu\text{T}$$

Cabo C1:

$$BC1x = \frac{-[0.2 * I_{cC1} * (y + YC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 39.048 + 67.633i \mu\text{T}$$

$$BC1y = \frac{[0.2 * I_{cC1} * (x - XC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 0 \mu\text{T}$$

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

$$\mathbf{B}_x = \mathbf{BA1}_x + \mathbf{BB1}_x + \mathbf{BC1}_x = 2.311 + 4.003i \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_y = \mathbf{BA1}_y + \mathbf{BB1}_y + \mathbf{BC1}_y = -3.667 + 2.117i \mu\text{T}$$

Valores das componentes reais de B_x e B_y :

$$\mathbf{B}_{xr} = 2.311 \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_{yr} = -3.667 \mu\text{T}$$

Valores das componentes imaginárias de B_x e B_y :

$$\mathbf{B}_{xi} = 4.003 \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_{yi} = 2.117 \mu\text{T}$$

Coefficiente 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:

$$\mathbf{B}_{\min} = \sqrt{(\mathbf{B}_{xr} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B}_{xi} * \sin(\omega t_{\max}))^2 + (\mathbf{B}_{yr} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B}_{yi} * \sin(\omega t_{\max}))^2} = 4.235 \mu\text{T}$$

Valor máximo do campo magnético:

$$\mathbf{B}_{\max} = \sqrt{(\mathbf{B}_{xr} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B}_{xi} * \sin(\omega t_{\min}))^2 + (\mathbf{B}_{yr} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B}_{yi} * \sin(\omega t_{\min}))^2} = 4.622 \mu\text{T}$$

Valor do campo magnético eficaz:

$$\mathbf{B}_{\text{ef}} = \sqrt{\mathbf{B}_{\max}^2 + \mathbf{B}_{\min}^2} = 6.269 \mu\text{T}$$

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

$$\mathbf{B}_{\text{ef}77\%} = \mathbf{B}_{\text{ef}} * 0.77 = 4.827 \mu\text{T}$$

ANEXO II – CÁLCULO CASO 2

Dados:

Corrente nominal de operação:

Circuito 1: $I_{c1} = 1050 \text{ A}$

Corrente nominal na Fase A1: $I_{cA1} = I_{c1} = 1050 \text{ A}$

Corrente nominal na Fase B1:

$$I_{cB1} = -0.5 * I_{c1} + \frac{\sqrt{3} * I_{c1}i}{2} = -525 + 909.327i \text{ A}$$

Corrente nominal na Fase C1:

$$I_{cC1} = -0.5 * I_{c1} - \frac{\sqrt{3} * I_{c1}i}{2} = -525 - 909.327i \text{ A}$$

Coordenada horizontal do cabo A1: $XA1 = 0.095 \text{ m}$
 Coordenada horizontal do cabo B1: $XB1 = -0.095 \text{ m}$
 Coordenada horizontal do cabo C1: $XC1 = 0 \text{ m}$

Coordenada vertical do cabo A1: $YA1 = 9.547 \text{ m}$
 Coordenada vertical do cabo B1: $YB1 = 9.547 \text{ m}$
 Coordenada vertical do cabo C1: $YC1 = 9.383 \text{ m}$

Distância do ponto de interesse em relação à superfície: $y = 1.50 \text{ m}$

Distância do ponto de interesse em relação ao eixo x : $x = 0 \text{ m}$

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

Cabo A1:

$$BA1x = \frac{-[0.2 * I_{cA1} * (y + YA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -19.008 \mu\text{T}$$

$$BA1y = \frac{[0.2 * I_{cA1} * (x - XA1)]}{(y + YA1)^2 + (x - XA1)^2} = -0.163 \mu\text{T}$$

Cabo B1:

$$BB1x = \frac{-[0.2 * I_{cB1} * (y + YB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = 9.504 - 16.462i \mu\text{T}$$

$$BB1y = \frac{[0.2 * I_{cB1} * (x - XB1)]}{(y + YB1)^2 + (x - XB1)^2} = -0.082 + 0.142i \mu\text{T}$$

Cabo C1:

$$BC1x = \frac{-[0.2 * I_{cC1} * (y + YC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 9.648 + 16.711i \mu\text{T}$$

$$BC1y = \frac{[0.2 * I_{cC1} * (x - XC1)]}{(y + YC1)^2 + (x - XC1)^2} = 0 \mu\text{T}$$

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

$$\mathbf{B}_x = \mathbf{BA1}_x + \mathbf{BB1}_x + \mathbf{BC1}_x = 0.144 + 0.249i \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_y = \mathbf{BA1}_y + \mathbf{BB1}_y + \mathbf{BC1}_y = -0.245 + 0.142i \mu\text{T}$$

Valores das componentes reais de Bx e BY:

$$\mathbf{B}_{xr} = 0.144 \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_{yr} = -0.245 \mu\text{T}$$

Valores das componentes imaginárias de Bx e BY:

$$\mathbf{B}_{xi} = 0.249 \mu\text{T}$$

$$\mathbf{B}_{yi} = 0.142 \mu\text{T}$$

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:

$$\mathbf{B}_{\min} = \sqrt{(\mathbf{B}_{xr} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B}_{xi} * \sin(\omega t_{\max}))^2 + (\mathbf{B}_{yr} * \cos(\omega t_{\max}) - \mathbf{B}_{yi} * \sin(\omega t_{\max}))^2} = 0.283 \mu\text{T}$$

Valor máximo do campo magnético:

$$\mathbf{B}_{\max} = \sqrt{(\mathbf{B}_{xr} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B}_{xi} * \sin(\omega t_{\min}))^2 + (\mathbf{B}_{yr} * \cos(\omega t_{\min}) - \mathbf{B}_{yi} * \sin(\omega t_{\min}))^2} = 0.288 \mu\text{T}$$

Valor do campo magnético eficaz:

$$\mathbf{B}_{\text{ef}} = \sqrt{\mathbf{B}_{\max}^2 + \mathbf{B}_{\min}^2} = 0.404 \mu\text{T}$$

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

$$\mathbf{B}_{\text{ef}77\%} = \mathbf{B}_{\text{ef}} * 0.77 = 0.311 \mu\text{T}$$