



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/22
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO –VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

Influência dos Campos Elétrico e Magnético no Projeto Eletromecânico de Subestações de Energia Elétrica

Livia Maria Alburguetti(*)
UNIFEI / TSE

Rogério Regis da Silva
UNIFEI / TSE

Manuel Luís Barreira Martinez
UNIFEI

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a influência dos campos elétrico e magnético no projeto eletromecânico de subestações, visando atender aos limites de exposição humana especificados na Resolução ANEEL nº398. Um arranjo típico de subestação da rede básica do sistema elétrico brasileiro foi utilizado para o cálculo dos níveis de campos elétrico e magnético através do software CEMIEE. Com base nos resultados obtidos foram apresentadas restrições e recomendações na disposição dos equipamentos e barramentos da subestação a fim de que os limites permitidos não sejam violados e/ou regiões de elevado nível de campos elétrico e magnético sejam evitadas.

PALAVRAS-CHAVE

Campo elétrico, Campo magnético, Projeto Eletromecânico, Subestação, Resolução nº398/2010.

1.0 - INTRODUÇÃO

As subestações de energia elétrica são destinadas a realizar a interligação de circuitos de transmissão bem como a conexão, através de transformadores, de sistemas em diferentes níveis de tensão. Dessa forma, uma subestação é geralmente composta por transformadores, chaves seccionadoras, disjuntores, equipamentos de medição, proteção e controle. Eventualmente, quando aplicável, as subestações podem possuir reatores, compensadores síncronos e estáticos, banco de capacitores etc [1].

O aumento da demanda (crescimento da carga) de uma região e a necessidade de assegurar a estabilidade eletromecânica e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo acarretam na necessidade de construção de novas subestações, a fim de possibilitar seccionamentos para os sistemas de distribuição, bem como conexão de novos consumidores e geradores. Em síntese, uma subestação deve ser projetada, construída e operada para suprir as necessidades do sistema com o menor custo e alta qualidade de serviço.

Segundo [2], as subestações podem ser classificadas quanto a sua aplicação em abrigadas ("indoor substation") ou externas ("outdoor substation"). Quanto ao meio de isolamento, estas são divididas em convencionais isoladas a ar ou blindadas, isoladas a gás SF6. Finalmente, podem ser classificadas quanto ao nível de tensão, em subestações de corrente alternada em Extra-Alta Tensão (EAT), Alta Tensão (AT), Média Tensão (MT) ou subestações de corrente contínua [3].

Após a verificação da necessidade de construção de uma subestação, firmada através da definição dos principais de fatores, tais como tensão de operação, capacidade nominal, número de alimentadores, etc, o seu projeto se inicia no levantamento das possíveis opções de localização do terreno. Os custos relacionados ao terreno são altamente influenciados pelo tamanho e localização deste, o que deve ser cuidadosamente analisado. Nesta etapa, as licenças ambientais para a subestação e para os acessos são identificadas e obtidas [2].

Definida a localização do terreno, inicia-se o projeto básico, no qual consta o arranjo dos equipamentos e o tipo de subestação a ser construída. Nesta etapa, todos os materiais e equipamentos são encomendados, sempre contemplando futuras expansões. São elaborados também todas as documentações necessárias como o projeto civil e eletromecânico da subestação. Além disso, estudos elétricos como coordenação de isolamento, estabilidade transitória, curto-circuito e fluxo de potência devem ser realizados.

(*) Laboratório de Alta Tensão - Universidade Federal de Itajubá - Rua Coronel Rennó, 7 - CEP 37.500-050 - Itajubá, MG - Brasil
Tel: (+55 35) 3622-3546 – Fax: (+55 35) 3622-3546 – Email: livia_alburguetti@yahoo.com.br

Observa-se que, as etapas do projeto de uma subestação, conforme citadas acima, não consideram a limitação da exposição humana a campos elétrico e magnético, sendo esta a motivação para este informe técnico. Portanto, este informe técnico consiste em analisar a influência dos campos elétrico e magnético no projeto eletromecânico de subestações de energia elétrica, a fim de que os limites de exposição humana especificados na Resolução ANEEL nº 398/2010 sejam garantidos. Além disso, restrições e recomendações na disposição dos equipamentos e barramentos da subestação são apresentadas, a fim de que os limites permitidos não sejam violados e/ou regiões de alto nível de campos elétrico e magnético sejam evitadas.

2.0 - CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO

O software desenvolvido para o cálculo dos campos elétrico e magnético é chamado de CEMIEE, implementado em plataforma Matlab® e ainda não disponível comercialmente. Para o campo magnético este software utiliza a Lei de Biot-Savart aplicada a um condutor finito no espaço. O sistema elétrico é considerado equilibrado, ou seja, são desconsideradas as parcelas referentes às correntes de retorno por cabos pára-raios, sistemas de aterramento e correntes induzidas em estruturas [9]. Para a frequência industrial e um solo típico, normalmente encontrado nestas instalações, a influência da imagem pode ser desconsiderada nos cálculos de campo magnético e a superfície da terra é considerada plana e perfeitamente condutora [7].

Para o campo elétrico é utilizado o Método de Simulação de Cargas (MSC), uma metodologia já consagrada pelo seu extenso uso e cujo princípio está baseado na utilização cargas fictícias como soluções particulares das equações de Laplace e Poisson utilizando pontos de contorno na superfície dos condutores [10]. O software CEMIEE utiliza o MSC de forma tridimensional e, os condutores são tratados como cilindros perfeitos, para os quais as cargas superficiais são substituídas por segmentos fictícios de cargas localizados no seu centro.

3.0 - LIMITES DE EXPOSIÇÃO HUMANA A CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO

À frequência industrial, as componentes do campo elétrico e magnético comportam-se de forma independente e interagem de forma diferente com o corpo humano. Os campos elétricos de baixa frequência não penetram no corpo de forma significativa, mas acumulam carga na sua superfície. Como resultado, as correntes elétricas fluem desde a sua superfície até ao solo (terra). Os campos magnéticos podem facilmente penetrar no corpo provocando a circulação de correntes. Estas correntes não escoam necessariamente para a terra e, no caso de serem suficientemente intensas, podem estimular os nervos e os músculos, bem como afetar outros processos biológicos [6].

Os estudos relacionados à saúde humana realizados até então, têm sido inconclusivos, sem a constatação de uma evidência direta entre a exposição aos CEMs (campos eletromagnéticos) e os efeitos prejudiciais à saúde. Grupos científicos reconhecidos internacionalmente acreditam que as informações não são suficientes para concluir que os campos elétrico e magnético na frequência de 60 [Hz] possam causar câncer, anomalias reprodutivas ou de desenvolvimento. Até o presente momento, não existem populações expostas tempo suficiente, que permita obter conclusões definitivas. No entanto, com base nos conhecimentos científicos atuais, a ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) [12] definiu um conjunto de **Restrições Básicas** de exposição aos CEMs, tanto para a população em geral como para os trabalhadores que atuam no sistema elétrico [12]. Baseada nestes limites a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), promulgou a Resolução Normativa nº 398, de 23 de março de 2010 [11].

De acordo com esta resolução [11] as **Restrições Básicas** são os limites máximos de exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variantes no tempo baseados em efeitos reconhecidos à saúde, estabelecidos pela ICNIRP [12] e recomendados pela OMS (Organização Mundial da Saúde). Estes limites estabelecidos tem o objetivo de garantir que as grandezas físicas não ultrapassem os limiares mínimos de interação biofísica com tecidos vivos, de modo a não causar danos à saúde.

Segundo [12], a **Restrição Básica** de densidade de corrente para a população ocupacional é 10 mA/m² e, para a população em geral é de 2 mA/m², os quais são válidos para a cabeça e o tronco, sendo estes os limites que a instalação deve atender. A densidade de corrente total interna do corpo humano é o resultado da indução dos campos elétrico e magnético, as quais são determinadas separadamente: densidade de corrente induzida pelo campo elétrico e, densidade de corrente induzida pelo campo magnético.

Dessa forma, a partir das **Restrições Básicas**, considerando fatores de segurança que asseguram o atendimento destas restrições, a Resolução Normativa ANEEL nº 398/2010 estabeleceu os **Níveis de Referência** (Tabela 1), os quais representam os níveis de campo elétrico e magnético variáveis no tempo, para avaliação prática e expedita da exposição humana.

Tabela 1 – Níveis de referência segundo a Resolução ANEEL nº 398 de 23 de março de 2010 [11].

	Campo Elétrico kV/m	Campo Magnético μ T
Público em Geral	4,17	83,33
População Ocupacional	8,33	416,67

Caso os valores calculados excedam estes **Níveis de Referência**, deve-se elaborar o **Relatório de Conformidade** para avaliar se os valores calculados atendem as **Restrições Básicas**. Vale ressaltar que os campos elétricos e magnéticos, em qualquer nível de tensão, devem atender as **Restrições Básicas**.

4.0 - ANÁLISE DOS CAMPOS ELÉTRICO E MAGNÉTICO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

O estudo de caso contempla a análise do pátio de 440 kV de uma subestação com arranjo barra dupla a um disjuntor e meio. Esta subestação possui dois bays de entrada de linha de transmissão (LT1 e LT2) e dois bays de transformadores (TR1 e TR2), conforme a planta e corte apresentadas nas Figuras 1 e 2.

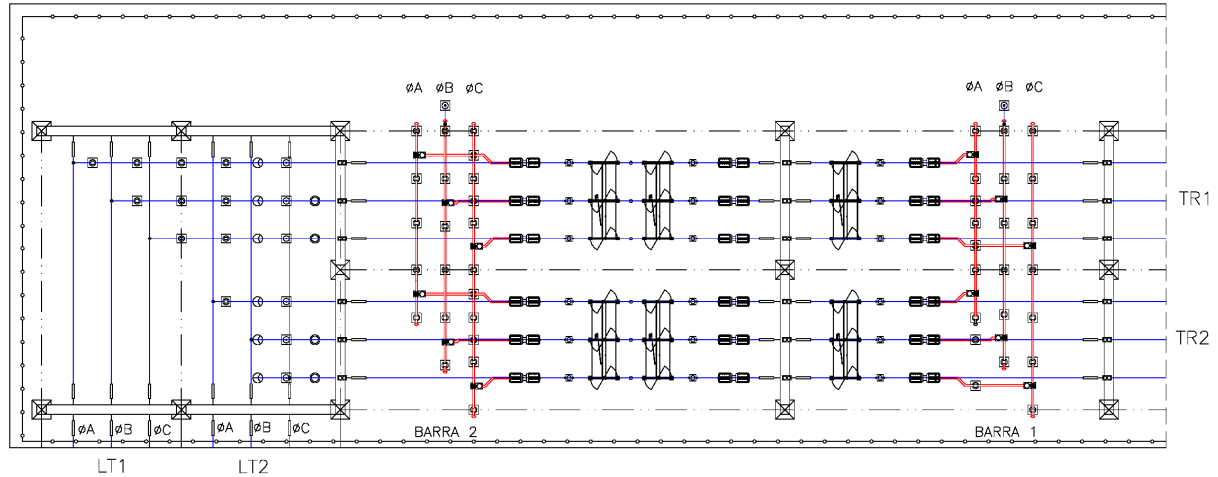


Figura 1 – Planta da subestação em análise.

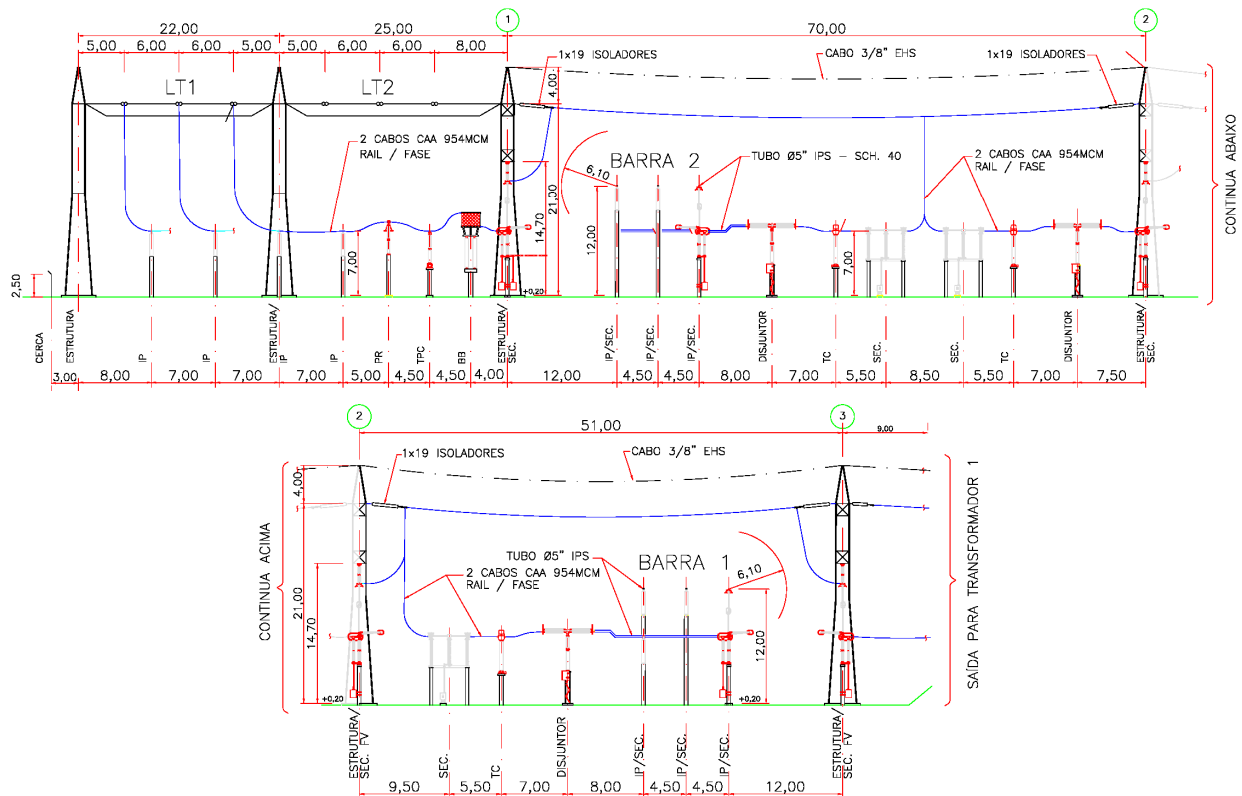


Figura 2 – Corte da subestação em análise (cotas em m).

As principais dimensões são:

- Espaçamento entre fases (barramentos flexíveis): 6 m;
- Espaçamento entre fases nas barras rígidas 1 e 2: 4,5 m;
- Altura dos equipamentos (seccionadoras, disjuntores, TC's, TP's) e IP's: 7 m;
- Altura das barras rígidas 1 e 2: 12 m;
- Altura dos barramentos flexíveis: 21 m;
- Altura dos cabos para-raios: 25 m.

4.1 Campo Elétrico

Para esta configuração calculou-se o campo elétrico no interior e no perímetro da subestação. As Figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente, o mapeamento 3D e as curvas de nível do campo elétrico. Nesta simulação foram representados todos os condutores e as estruturas metálicas aterradas (de barramentos, equipamentos e pórticos).

A partir de uma análise detalhada dos resultados obtidos, observa-se que o valor máximo do campo elétrico encontrado foi de $E_{\max} = 8,86 \text{ kV/m}$: em torno das coordenadas $(x,y) = (156,8)$, em metros. Este ponto corresponde à região do término da fase B da Barra 1. Ao comparar estes resultados com os limites estabelecidos pela Resolução ANEEL n° 398/2010, conforme Tabela 1, observa-se que os níveis de campo elétrico calculados ultrapassam o limite em algumas regiões, portanto, oferecendo riscos a população ocupacional. Neste caso, o nível aceitável para a população em geral não é ultrapassado.

4.2 Campo Magnético

Para esta configuração calculou-se o campo magnético no interior e no perímetro da subestação, considerando a capacidade operativa de curta duração das linhas de transmissão de 1900 A e a potência dos transformadores 200MVA. As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, o mapeamento 3D e as curvas de nível do campo magnético.

A partir de uma análise detalhada dos resultados obtidos, observa-se que o valor máximo do campo magnético encontrado foi de $B_{\max} = 66,4 \text{ } \mu\text{T}$: em torno das coordenadas $(x,y) = (31,39)$, em metros. Este ponto corresponde à entrada da LT1 (fase B). Ao comparar estes resultados com os limites estabelecidos pela Resolução ANEEL n° 398/2010, conforme Tabela 1, observa-se que os níveis de campo magnético calculados se apresentam abaixo dos limites. Portanto, conclui-se que não oferece riscos ao público em geral e população ocupacional.

5.0 - ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM NO NÍVEL DE CAMPO ELÉTRICO

A partir da análise dos níveis de campo elétrico na subestação 440 kV apresentada no item anterior, observa-se que este ultrapassa os limites estabelecidos pela Resolução ANEEL n°398/2010. Dessa forma, algumas mudanças no layout da subestação foram implementadas a fim de avaliar suas respectivas influências no nível de campo elétrico. Nota-se que o campo magnético calculado satisfaz os limites estabelecidos e, portanto, não foi objeto de exploração detalhada.

Os casos analisados são apresentados na Tabela 2, com seus respectivos valores máximos de campo elétrico. Estes valores devem ser comparados ao CASO BASE (Figuras 3 e 4). Estes casos envolvem alterações na sequência de fases, layout da subestação e altura de barramentos e equipamentos.

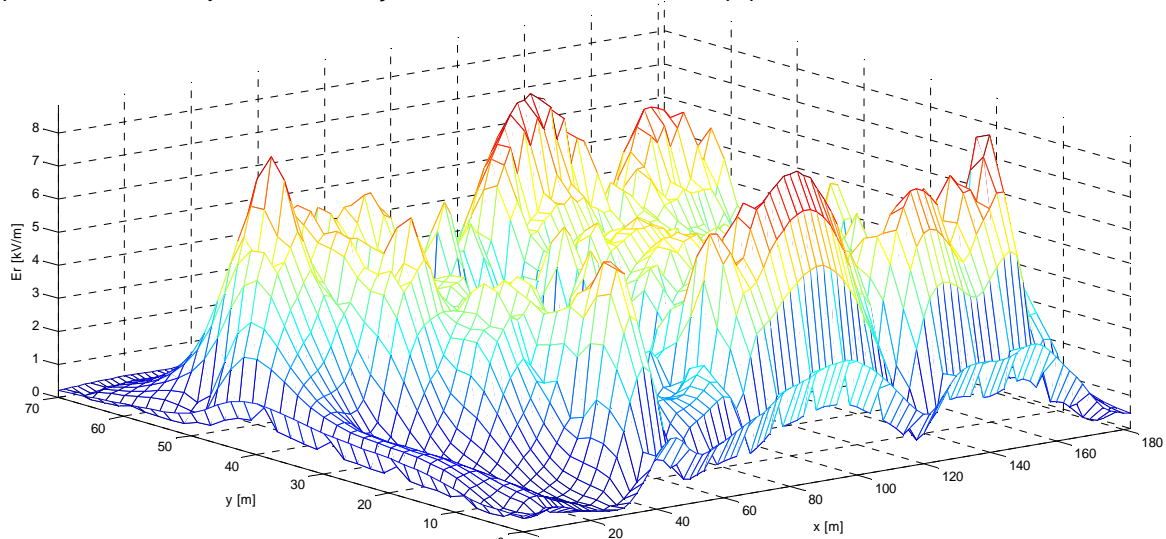


Figura 3 – CASO BASE: Intensidade de campo elétrico E em kV/m rms.

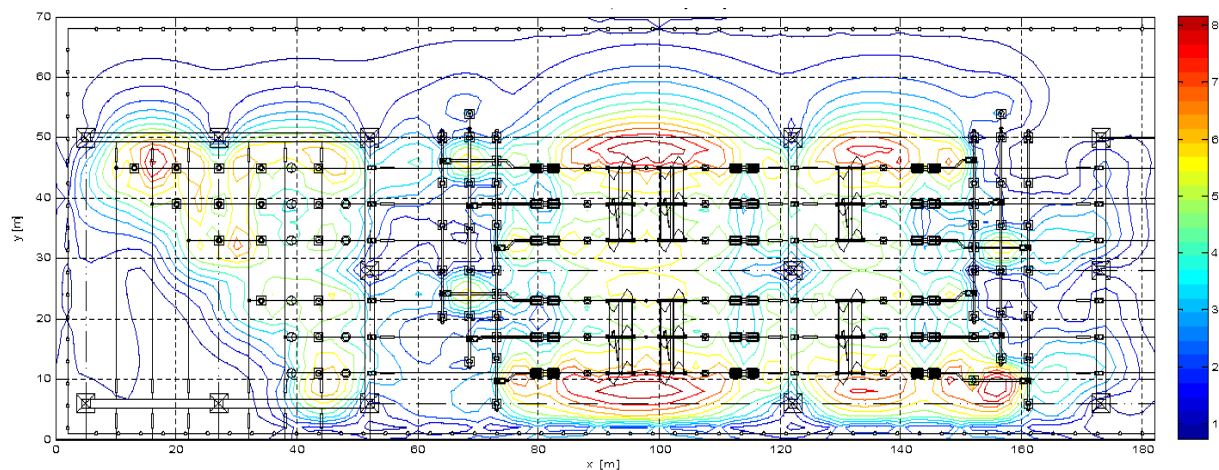


Figura 4 – CASO BASE: Intensidade de campo elétrico E em kV/m rms - Curvas de Nível.

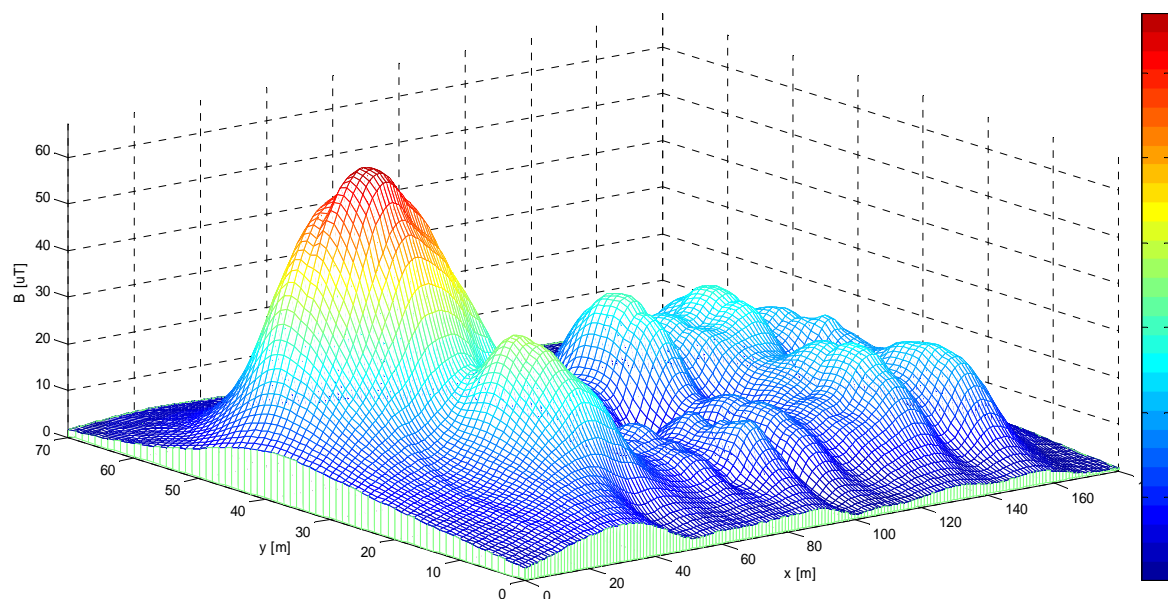


Figura 5 – CASO BASE: Intensidade de campo magnético B em μT rms.

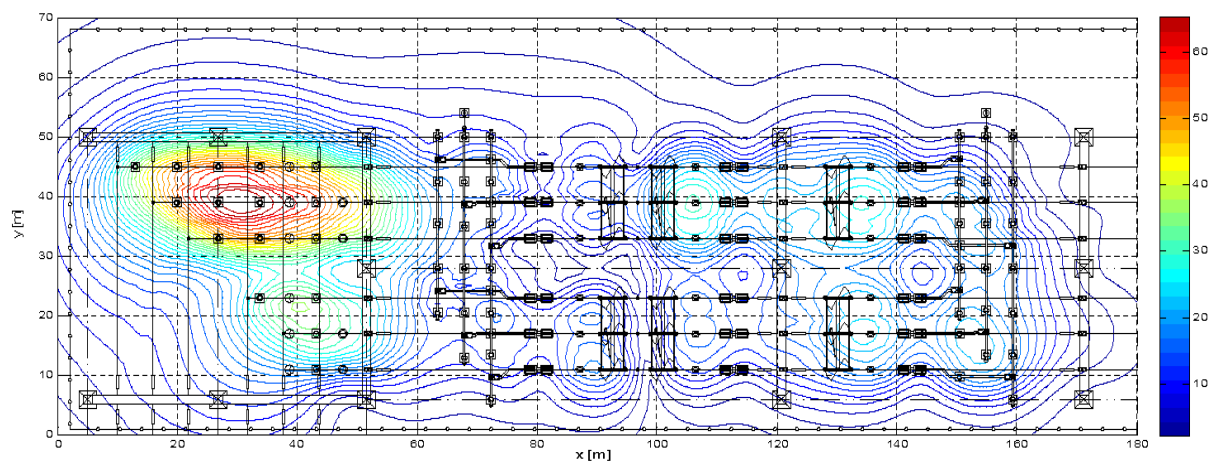


Figura 6 – CASO BASE: Intensidade de campo magnético B em μT rms – Curvas de Nível.

Tabela 2 – Casos avaliados para o campo elétrico da subestação de 440 kV sob análise.

CASO	Descrição	Campo Elétrico		
		E	X	Y
		kV/m rms	m	m
1	Mudança da sequência de fases dos condutores flexíveis referentes aos bays da linha LT2 e transformador TR2	10,08	98	28
2	Espaçamento entre as fases nas Barras rígidas 1 e 2 de 6 m	9,96	160	8
3	Todos os equipamentos e barramentos elevados em 1 m	6,63	98	48
4	Barras rígidas 1 e 2 extendidas de $y = 6$ m até $y = 50$ m	8,79	98	48
5	Mudança da sequência de fases da Barra 1 para CBA	8,79	98	48
			98	8

Analisando o resultado obtido para CASO 1, observa-se que a região onde se encontra o valor máximo se alterou em comparação com o CASO BASE, devido à mudança de sequência de fases dos condutores flexíveis referentes aos bays da linha LT2 e transformador TR2. Além disso, o valor máximo encontrado aumentou de 8,86 [kV/m] (CASO BASE) para 10,08 [kV/m], ou seja, um aumento de 13,8%. Portanto, esta alteração no layout da subestação provocou uma mudança na distribuição dos níveis de campo elétrico, sendo que o ponto onde ocorreu o valor máximo no CASO BASE agora apresenta 3,41 [kV/m].

Para o CASO 2, tem-se que ao aumentar apenas o espaçamento entre as fases das Barras rígidas 1 e 2 de 4,5 m para 6 m, observa-se um aumento do valor máximo de campo elétrico de 8,86 kV/m (CASO BASE) para 9,96 kV/m, ou seja, um aumento de 12,4%. A região onde ocorreu este valor máximo se manteve em torno no ponto $(x,y) = (160,8)$, em metros. Dessa forma, esta alteração no layout da subestação não trouxe mudanças positivas quanto à redução dos níveis de campo elétrico.

O CASO 3, no qual se elevou todos os condutores, barramentos e equipamentos em 1 m, as medidas passaram a ser: altura dos equipamentos: 8 m; altura das barras rígidas 1 e 2: 13 m; altura dos barramentos flexíveis: 22 m; altura dos cabos para-raios: 26 m. Dessa forma, ocorreu uma diminuição significativa do valor máximo de campo elétrico encontrado de 8,86 kV/m (CASO BASE) para 6,63 kV/m, ou seja, um decréscimo de 25,2%. Quanto à localização do ponto de valor máximo, este se deslocou para $(x,y) = (98,48)$, em metros. Além disso, na região próxima ao ponto $(156,8)$ metros onde ocorreu o valor máximo do CASO BASE, o campo elétrico passou a ser 6,37 [kV/m] uma redução de 28,1%.

Os CASOS 4 e 5 apresentaram uma redução no valor máximo de 8,86 kV/m (CASO BASE) para 8,79 kV/m, ou seja, uma redução de 0,8%. Quanto à localização do valor máximo este se manteve na mesma região para os dois casos analisados, em torno do ponto $(x,y) = (98,48)$, em metros. Porém, este ponto difere da região do CASO BASE que é em torno de $(x,y) = (156,8)$, em metros. Nota-se, também que para o ponto $(156,8)$ metros onde ocorreu o valor máximo do CASO BASE, esta alteração no layout da subestação acarretou uma redução no campo para 7,49 kV/m no CASO 4, e 4,69 kV/m no CASO 5.

A Tabela 3 apresenta as diferenças percentuais, para os valores máximos encontrados, entre os 05 casos simulados e o CASO BASE.

Assim, dentre os casos analisados pode-se identificar que a mudança mais efetiva em termos da redução do nível de campo elétrico, no interior da subestação, consiste na elevação da altura dos barramentos e equipamentos da subestação. Esta conclusão evidencia a necessidade de uma análise específica do projeto de toda subestação. As demais alternativas avaliadas provocam uma alteração nas regiões de ocorrência dos valores máximos, contudo, considerando a área interna da subestação simulada, a diminuição dos níveis de campo elétrico não foi suficiente a ponto de garantir que estes estejam abaixo dos limites estabelecidos.

Tabela 3 – Diferença percentual para os valores máximos encontrados de campo elétrico entre os casos simulados.

	CASO BASE	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
CASO BASE	0,0					
CASO 1	13,8	0,0				
CASO 2	12,4	-1,2	0,0			
CASO 3	-25,2	-34,2	-33,4	0,0		
CASO 4	-0,8	-12,8	-11,7	32,6	0,0	
CASO 5	-0,8	-12,8	-11,7	32,6	0,0	0,0

6.0 - ANÁLISE DAS FORMAS DE MITIGAÇÃO PARA REDUÇÃO DO NÍVEL DE CAMPO ELÉTRICO

No item 5.0 foram analisadas as variáveis que podem ser manipuladas a fim de garantir que os limites estabelecidos pela Resolução ANEEL nº 398 sejam atendidos, ainda em fase do projeto do layout da subestação. Porém, se a subestação já estiver construída ou mesmo em fase de projeto de layout, após o cálculo do campo elétrico este estiver acima dos limites estabelecidos, existem medidas mitigadoras de fácil implementação que podem ser utilizadas a fim de reduzir os níveis em pontos específicos.

A solução empregada neste informe técnico consiste em instalar cabos de aço flexíveis ligando as bases dos equipamentos e/ou barramentos a uma altura segura do solo. Nas análises elaboradas neste trabalho foram utilizados cabos de aço com bitola de 3/8", aplicados no CASO BASE.

Os casos de mitigação analisados e seus respectivos valores de campos elétricos calculados estão apresentados na Tabela 4, os quais devem ser comparados ao CASO BASE (Figuras 3 e 4).

Tabela 4 – Casos de mitigação analisados para o campo elétrico da subestação de 440 kV sob análise.

CASO	Descrição	Campo Elétrico		
		E	X	Y
		[kV/m] rms	[m]	[m]
1	Instalação de cabos de aço aterrados interligando as bases dos equipamentos da Barra 1, posicionados a 4[m] de altura, paralelamente à Barra 1 nas fases A, B e C	8,57	156	8
		8,79	98	48
2	Instalação de cabos de aço aterrados na base dos equipamentos a 4[m] de altura, nas regiões aonde se identificou níveis elevados de campo elétrico: 1) Desde o disjuntor do bay do transformador TR2 até o ponto de subida para a Barra 1. 2) Fase A do bay da linha LT1 e do transformador TR1. 3) Fase C do bay da linha LT2 e do transformador TR2.	8,16	156	8
		8,39	16	46
3	Instalação de cabos de aço aterrados na base dos equipamentos a 4[m] de altura, nas regiões aonde se identificou picos elevados de campo elétrico: 1) Desde o disjuntor do bay do transformador TR2 até o ponto de subida para a Barra 1. 2) Fase A do bay da linha LT1 e do transformador TR1. 3) Fase C do bay da linha LT2 e do transformador TR2. 4) Base dos 3 isoladores de pedestal de x=13 até x=27.	8,16	156	8
		8,14	98	48
		6,74	16	46

Ao observar o resultado obtido para o CASO MITIGAÇÃO 1 constata-se que a instalação de cabos de aço paralelamente a Barra 1 não foi efetivo na redução do nível de campo elétrico. A redução do valor máximo encontrado foi de 8,86 [kV/m] no CASO BASE para 8,79 kV/m, ou seja, decréscimo de 0,8%. Além disso, o local de ocorrência do valor máximo se deslocou para o ponto (x,y) = (98,48), em metros. A redução do nível de campo elétrico para o ponto (x,y) = (156,8) metros, onde ocorreu o valor máximo no CASO BASE, foi de 3,3%.

Para o CASO MITIGAÇÃO 2, identificadas as regiões com picos elevados de campo elétrico e realizada a instalação do cabo de aço nestas regiões específicas, a redução no valor máximo encontrado foi de 8,86 kV/m no CASO BASE para 8,39 kV/m, ou seja, decréscimo de 5,3%. Além disso, o local de ocorrência do valor máximo se deslocou para o ponto (x,y) = (16,46), em metros. A redução do nível de campo elétrico para o ponto (x,y) = (156,8) metros, onde ocorreu o valor máximo no CASO BASE, foi de 7,9%. Porém, estas medidas ainda não foram suficientes para trazer todas as regiões com campo elétrico acima de 8,33 kV/m para dentro dos limites aceitáveis.

O CASO MITIGAÇÃO 3 consiste no caso anterior acrescido da instalação de cabo de aço na região em torno do ponto (x,y) = (16,46), em metros, a fim de reduzir o nível de campo elétrico para os limites estabelecidos. A redução do valor máximo encontrado foi de 8,86 kV/m no CASO BASE para 8,16 kV/m, ou seja, decréscimo de 7,9%. Além disso, o local de ocorrência do valor máximo permaneceu em torno do ponto (x,y) = (156,8) metros, assim como no CASO BASE. A redução do nível de campo elétrico para o ponto x = 16 m e y = 46 m (CASO 2) foi de 19,7%.

A Tabela 5 apresenta as diferenças percentuais, para os valores máximos encontrados, entre os 3 casos de mitigação simulados e o CASO BASE.

Tabela 5 – Diferença percentual para os valores máximos encontrados entre os casos de mitigação simulados.

	CASO BASE	CASO 1	CASO 2	CASO 3
CASO BASE	0,0			
CASO 1	-0,8	0,0		
CASO 2	-5,3	-4,6	0,0	
CASO 3	-7,9	-7,2	-2,7	0,0

Portanto, a partir da identificação das regiões de campo elétrico acima dos limites estabelecidos e implementação da alternativa de instalação de cabos de aço conectando as bases de equipamentos e/ou barramentos, mostrou-se eficaz na redução dos níveis de campo elétrico.

7.0 - CONCLUSÃO

Considerando a crescente preocupação quanto a exposição humana a campos elétrico e magnético e, que o procedimento atual para elaboração do projeto eletromecânico de subestações de energia elétrica não leva em consideração a análise dos níveis de campos elétrico e magnético, este trabalho apresentou a análise de fatores que influenciam os níveis de campo tais como espaçamento entre fases, sequência de fases e altura dos

barramentos e equipamentos, através do estudo de caso da subestação típica de 440kV do sistema elétrico brasileiro.

Dessa forma, constatou-se que a altura dos barramentos e equipamentos é a grandeza com maior eficácia na redução dos valores máximos de campo elétrico, uma vez que o campo magnético geralmente encontra-se bem abaixo dos limites estabelecidos. Vale ressaltar que os demais fatores analisados acarretam mudanças na distribuição dos níveis de campo elétrico, porém não significativas a ponto de assegurar o cumprimento dos limites estabelecidos.

Além disso, verificou-se alternativas de mitigação dos níveis de campo elétrico a partir da instalação de cabos de aço aterrados, interligando as bases de equipamentos e barramentos. Esta solução apresenta resultados significativos na redução do campo elétrico em regiões específicas, controlando os níveis de campo elétrico e garantido que estes permaneçam dentro dos limites estabelecidos.

Dentre as alternativas avaliadas para a redução do nível de campo elétrico, a elevação dos equipamentos e barramento pode se tornar inviável em alguns casos devido aos custos envolvidos. E neste aspecto a instalação de cabos de aço interligando as bases de equipamentos e barramentos mostra-se atrativa.

Portanto, tem-se que cada projeto de subestação deve também ser analisado sob o aspecto dos níveis de campos elétricos e magnéticos, a fim do dimensionamento adequado do layout da subestação.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIGRÉ "General Guidelines for the Design of Outdoor AC Substations", Working Group 23.03, August 2000.
- (2) GRIGSBY, L. L., "Electric Power Substations Engineering", CRC Press, 2003.
- (3) S. RAO, "Electrical Substation – Engineering & Practice – EHV-AC, HVDC & SF6 GIS", Khanna Publishers, Third Edition, 1999.
- (4) Submódulo 2.3 – Requisitos mínimos para transformadores e para subestações e seus equipamentos, ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), Revisão 2.0, Vigência 11/11/2011.
- (5) HAYASHI, N., ISAKA, N., YOKOI, Y., "Analysis of 60-Hz Magnetic Fields near Ground Level in 187-kV Switchyard", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 No. 1, January 1992.
- (6) CASACA, J. F. G., "Cálculo do Campo Eletromagnético originado por Linhas Aéreas de Transmissão de Energia", Universidade Federal de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Dissertação de Mestrado, 2007.
- (7) MARUVADA, P. S., "Calculation of Ground-level Electric and Magnetic Fields", IREQ, Quebec – Canadá.
- (8) SEMLYEN, A., Shirmohammadi, D., "Calculation of Induction and Magnetic Field Effects of Three Phase Overhead Lines above Homogeneous Earth", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PASS-101, No 8, August 1982.
- (9) "Transmission Line Reference Book, 345kV and Above", Electric Power Research Institute, Second Edition, 1982.
- (10) SINGER, H., STEINBIGLER, H., WEISS, P. "A charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE Trans on PAS, Vol 93, pp 1660-1668, 1974;
- (11) Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. "Resolução Normativa ANEEL nº 398, de 23 de março de 2010".
- (12) ICNIRP, International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300Ghz)", Health Phys., vol.74, no.4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- (14) ALBURGUETTI, L.M, SILVA, R.R., MARTINEZ, M.L.B., "Influência dos Campos Elétrico e Magnético no Projeto Eletromecânico de Subestações de Energia Elétrica", Dissertação apresentada na UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá, 2013.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Livia Maria Alburguetti

Nasceu em Campinas (SP), em 1986. Graduada pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2009, tendo recebido o título de Engenheira Eletricista. Mestre pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2013, em estudos de campos elétricos e magnéticos em subestações. Atualmente trabalha na TSE – Tecnologia em Sistemas Elétricos, na área de sistemas elétricos de potência.



Rogério Regis da Silva

Nasceu em Juruaia (MG), em 1984. Graduado pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2009, tendo recebido o título de Engenheiro Eletricista. Mestre pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá) em 2013, em estudos de campos elétricos e magnéticos em subestações. Atualmente trabalha na TSE – Tecnologia em Sistemas Elétricos, na área de sistemas elétricos de potência.



Manuel Luis Barreira Martinez

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1993), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2000). Aperfeiçoamento em Pequenas Centrais Hidrelétricas, Sistemas Elétricos de Potência, Equipamentos de Manobra, Descargas Atmosféricas em Linhas e Subestações, Para-raios de Resistor Não Linear para Sistemas de Potência, Técnicas de Alta Tensão, entre outros. Possui experiência no projeto e construção de equipamentos, componentes e sistemas de ensaios em Alta Tensão. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal de Itajubá e Coordenador do Laboratório de Alta Tensão – LAT-EFEI. É autor e co-autor de aproximadamente 270 artigos divididos entre seminários nacionais, internacionais e periódicos.