



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Estudo do Nível de Campo Elétrico no Interior do Corpo Humano Para Atendimento das Restrições Básicas Sugeridas Pela Organização Mundial da Saúde em Subestações de 525 kV

**RAFAEL MARTINS(1); JEFERSON SHIMOMURA(1); ROGERIO BORBA(1); JOSEF HOFFMANN NETO(1);
CLAILTON L. DA SILVA(1); CRESENCIO S. S. SALAS(2); PATRICIO ENRIQUE MUNHOZ-ROJAS(2);
Copel GET(1);LACTEC(2);**

RESUMO

A Organização Mundial da Saúde sugere dois tipos de limites de exposição a campos elétricos e magnéticos, denominados Níveis de Referência e Restrições Básicas. As empresas de energia no Brasil que ultrapassam os Níveis de Referência devem realizar um estudo no interior do corpo humano, que é mais complexo, para verificar o atendimento às Restrições Básicas.

Esse trabalho apresenta uma metodologia para o estudo do nível de campo elétrico no interior do corpo humano, sem necessidade de ferramentas computacionais. A metodologia foi aplicada em uma subestação, na qual os Níveis de Referência foram ultrapassados, mas as Restrições Básicas foram atendidas.

PALAVRAS-CHAVE

Campo elétrico, Restrições básicas, Níveis de Referência, Subestações de energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

No Brasil o tema relacionado à exposição humana aos campos elétricos e magnéticos é tratada atualmente pela lei 11.934 de 5 de maio de 2009 [1]. Nela o governo brasileiro determina que se deva atender às recomendações da Organização Mundial da Saúde – OMS que, por sua vez, adota os limites sugeridos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante – ICNIRP [2, 3, 4]. Para regulamentar o procedimento que as empresas de energia elétrica devem seguir para apresentar a conformidade aos limites, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL publicou a resolução normativa 398/2010, que posteriormente foi alterada pela resolução normativa ANEEL 616/2014 [5, 6]. Seguindo a OMS, a ANEEL definiu dois tipos de limites: as Restrições Básicas e os Níveis de Referência.

As Restrições Básicas são os limites máximos de valores de campos elétrico e densidade de corrente induzidas dentro do corpo humano, baseados em efeitos reconhecidos à saúde, estabelecidos pela ICNIRP e recomendados pela Organização Mundial de Saúde – OMS, de modo a garantir que essas grandezas físicas não ultrapassem os limiares mínimos de interação biofísica com tecidos vivos, para não causar danos à saúde [5].

Os Níveis de referência são os níveis de campos elétrico e magnético externos, para avaliação prática e expedita da exposição humana, determinados a partir das Restrições Básicas, considerando fatores de segurança que asseguram o atendimento destas. Em resumo, são valores de campos elétrico e magnético que podem ser

medidos de forma mais simples, fora do corpo humano, e que, devido ao fator de segurança, garantem que os valores limites dentro do corpo humano não são ultrapassados (Restrições Básicas) [5].

Os Níveis de Referência foram concebidos para facilitar a comparação com valores medidos dos campos elétricos e magnéticos não perturbados pela presença do ser humano pois, com isso, é possível realizar as medições no meio ambiente, sem a necessidade de análise dentro do corpo humano. Isto torna o processo muito mais prático, pois é feito através de instrumentos de medição disponíveis no mercado. A lógica é que se uma instalação atender aos Níveis de Referência, então, devido ao fator de segurança, atenderia também às restrições básicas e, assim, não seria necessário calcular quais são os valores do campo elétrico e da densidade de corrente no interior do corpo humano, cujo procedimento é mais complexo. Com isso, as resoluções ANEEL 398 e 616 estabeleceram que deveriam ser realizados cálculos dos campos resultantes no meio ambiente, ou medições após energização da instalação. Caso os Níveis de Referência fossem ultrapassados, deveria-se então apresentar um Relatório de Conformidade realizado por entidade competente, que é um estudo no interior do corpo humano para verificação do atendimento às Restrições Básicas. Se as Restrições Básicas fossem atendidas, a instalação estaria em conformidade.

Nesse contexto, sabe-se através de medições realizadas pelas empresas, que é comum subestações de alta tensão, principalmente acima de 525 kV, possuírem valores de campo elétrico mais elevados que os limites dos Níveis de Referência. Isto ocorre porque o campo elétrico em 60 Hz depende diretamente da tensão, enquanto o campo magnético depende da corrente [7, 8, 9, 10]. Com isso, a experiência das empresas mostra que, para essas instalações de alta tensão, o maior problema para atendimento aos Níveis de Referência são os campos elétricos, não os campos magnéticos. Contudo, isso não é um problema, pois a ANEEL permite que os Níveis de Referência sejam ultrapassados, desde que as Restrições Básicas sejam atendidas. Para isso deve ser apresentado o Relatório de Conformidade. O problema para as empresas é que o estudo para verificação do atendimento às Restrições Básicas é complexo e ainda está no campo da pesquisa científica [11], as ferramentas computacionais para esse fim possuem custo elevado, exigem mão de obra especializada e, associado a isso, no Brasil há poucas instituições que podem prestar esse serviço. Ainda há o agravante de não existir procedimento normatizado para o desenvolvimento desse estudo. Nesse contexto a resolução ANEEL 398 estabeleceu que caso o agente opte por não realizar o Relatório de Conformidade, ou o seu resultado demonstre o não-atendimento às Restrições Básicas, deve ser apresentado o Plano de Adequação das instalações. Ressalta-se que a adequação dos projetos de subestações de alta tensão possuem um grande impacto econômico, muitas vezes inviável, pois, basicamente, tem-se que aumentar as distâncias entre as partes energizadas.

Essa situação foi uma das justificativas para o início de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento no âmbito do Programa de P&D da ANEEL, com parceria entre a Companhia Paranaense de Energia - COPEL e o LACTEC, no qual um dos objetivos era capacitar o LACTEC para elaborar Relatórios de Conformidade. Uma das etapas do projeto consistiu em avaliar o campo elétrico e a densidade de corrente induzidas no corpo humano e, para isso, foi adquirida uma ferramenta computacional capaz de simular um corpo humano em detalhes no interior de uma subestação. Também foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o tema e, nessa etapa, foi identificada uma possibilidade de um cálculo simplificado para estimar o nível de campo elétrico no interior do corpo humano, o qual as empresas do setor poderiam utilizar para, antes de contratar o estudo para fazer o Relatório de Conformidade, ter uma noção da possibilidade de que o resultado do Relatório de Conformidade demonstre o atendimento às Restrições Básicas.

Assim, o objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia para calcular o nível de campo elétrico no interior do corpo humano, baseada na norma internacional IEC 62226-3-1 [11], como uma alternativa para as empresas do setor, com foco no atendimento à legislação brasileira, ou seja, atendimento às Restrições Básicas. Ressalta-se que a IEC 62226-3-1 é um guia para estimar os valores de campo elétrico e de densidade de corrente induzidos no interior do corpo humano, por campos externos que possam ser considerados uniformes. Ela apresenta diversas formas de cálculo, através de métodos analíticos e métodos numéricos que são exequíveis através de ferramentas computacionais, que não são comuns às concessionárias de energia. Nesse trabalho é apresentada uma metodologia analítica, adaptada para o sistemas elétricos com frequência de 60 Hz, na qual são realizadas considerações conservadoras que possibilitam o desenvolvimento do estudo de forma mais simples, sem necessidade de ferramentas de cálculo. Será demonstrado que uma grandeza física importante a ser considerada é a condutividade elétrica dos tecidos do corpo humano e, durante a demonstração do método, sugestões serão realizadas para adoção de valores diferentes do utilizado pela norma IEC 62226-3-1. No final é

apresentada uma única equação com a qual é possível avaliar se a instalação tem boas possibilidades de atender às Restrições Básicas ainda que não atenda os Níveis de Referência. É importante observar que o campo magnético não será foco do presente trabalho, pois as medições realizadas demonstram que, para subestações de 525 kV, o atendimento à legislação brasileira é mais crítica para o campo elétrico no interior das instalações.

2.0 - MÉTODO

O método consistiu em desenvolver o cálculo de campo elétrico no interior do corpo humano baseando-se na IEC 62226-3-1. Foram realizadas considerações conservadoras nos cálculos e foi apresentada uma única equação que pode ser utilizada para verificação da possibilidade do atendimento às Restrições Básicas no Brasil. Após isso, a equação foi validada através da comparação dos resultados com aqueles obtidos em simulação com ferramenta computacional especializada, na qual um corpo humano foi estudado no interior de uma subestação real de 525 kV.

Os valores limites de campo elétrico no interior do corpo humano sugeridos pela OMS [2], estão descritos na Tabela 1. A legislação brasileira, seguindo a OMS, estabeleceu duas regiões para os limites de campos elétricos em subestações: o exterior e o interior da instalação. No interior, normalmente, somente os funcionários das empresas possuem acesso. Esse grupo de pessoas recebe a denominação de População Ocupacional. Vale ressaltar que normalmente é no interior das subestações que os Níveis de Referência são ultrapassados, portanto, o cálculo do nível de campo elétrico no interior do corpo humano, que será apresentado na sequência, será focado nessa região.

TABELA 1 – Restrições básicas para exposição humana a campos elétricos variáveis no tempo nos tecidos do Sistema Nervoso Central da cabeça, para população ocupacional [ICNIRP2010].

Faixa de frequência da fonte de energia elétrica	Campo Elétrico no interior do corpo (V/m)
1 Hz -10 Hz	0,5/f
10 Hz -25 Hz	0,05
25 Hz -400 Hz	⁽¹⁾ $2 \times 10^{-3} f$
400 Hz -3 kHz	0,8
3 kHz -10 MHz	⁽¹⁾ $2,7 \times 10^{-4} f$

⁽¹⁾ f é a frequência em Hz

Ao analisar a Tabela 1 verifica-se que, para 60 Hz, o limite do valor do campo elétrico é de 120 (mV/m) no interior do corpo humano.

2.1 Método analítico de cálculo do campo elétrico no interior do corpo humano

A seguir será exposto o método de cálculo para a obtenção do campo elétrico no interior do corpo humano. No corpo a densidade de corrente induzida e o campo elétrico induzido se relacionam segundo a equação 1.

$$J = \sigma \cdot E_i \quad (1)$$

Onde:

J é densidade de corrente induzida no interior do corpo (A/m²);

σ é a condutividade elétrica do tecido do corpo (S/m);

E_i é o campo elétrico induzido no interior do corpo (V/m).

No cálculo do campo elétrico no interior do corpo humano serão determinadas a densidade de corrente interna e a condutividade elétrica do corpo, para serem aplicadas na equação 1 e, assim, obter o campo elétrico interno. Deve-se observar que a densidade de corrente, por sua vez, é gerada pelo campo elétrico e pelo campo magnético externos. Teoricamente deveria-se calcular a densidade de corrente gerada por ambos e realizar a soma vetorial dos resultados, para posterior aplicação na equação 1. Contudo, a ICNIRP sugere que, devido às condições que ocorrem na realidade, para essa faixa de frequência os cálculos podem ser considerados separadamente, ou seja, quando os valores dos Níveis de Referência de campo elétrico forem ultrapassados, pode-se considerar nos cálculos apenas a componente de densidade de corrente gerada pelo campo elétrico [2]. O mesmo é válido para o campo magnético. Portanto, como o foco do trabalho é o campo elétrico, não será

considerada a componente produzida pelo campo magnético. Contudo, caso o nível de campo magnético ultrapasse os Níveis de Referência, é possível obter metodologias analíticas e numéricas para verificação do atendimento às Restrições Básicas devido ao campo magnético [12]. Nesse contexto, a seguir será exposto o método de cálculo considerando somente o campo elétrico externo.

Campos elétricos causam o deslocamento de cargas elétricas em objetos condutores, incluindo corpos humanos, e como esses campos são alternados, as cargas elétricas movem-se para frente e para trás [11]. O resultado é uma corrente alternada induzida dentro do objeto condutor, conforme ilustrado na Figura 1.

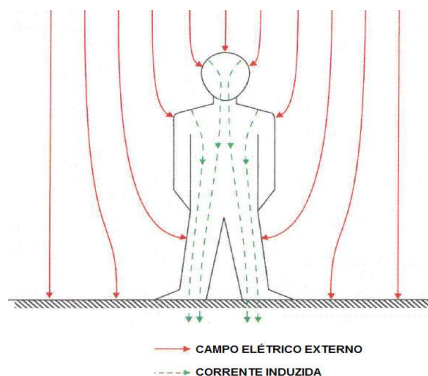


FIGURA 1 – Ilustração do fenômeno de correntes induzidas por um campo elétrico em um corpo humano. (IEC, 2016).

Para baixas frequências, que incluem 60 Hz, a densidade de corrente no interior do corpo e o campo elétrico externo são relacionados pela equação 2.

$$J = K_e \cdot f \cdot E_o \quad (2)$$

Onde:

K_e é denominado fator de forma (F/m);

f é a frequência (Hz);

E_o é o campo elétrico externo (V/m).

A unidade de K_e indica que a exposição ao campo elétrico corresponde fisicamente a um acoplamento capacitivo entre o campo fonte e o objeto condutor exposto ao campo; Com relação ao corpo humano, é possível tornar cálculos analíticos viáveis quando se utilizam modelos simples com parâmetros conservadores, como o modelo de um esferóide em um campo elétrico uniforme, mostrado na Figura 2.

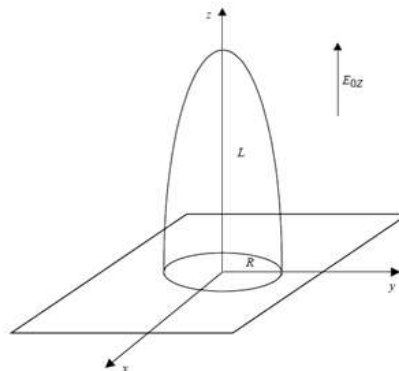


FIGURA 2: modelo semi-esferóide e suas dimensões. (IEC, 2016).

Para modelar o corpo esferoidal deve-se usar a área total de superfície de um corpo humano. O relatório do ICRP Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values [13], apresenta um algoritmo que fornece a área de superfície total de uma pessoa em função de sua altura e massa, conforme equação 3.

$$SB_T = 0,1644 \cdot m^{0,51456} \cdot L^{0,42246} \quad (3)$$

Onde:

SB_T é a superfície total do corpo (m^2);

m é a massa do corpo (kg);

L é a altura do corpo (m);

No caso de exposição a campos elétricos, apenas a superfície voltada para fora deve ser considerada, assim, tem-se que subtrair as áreas da sola dos pés, partes internas dos braços e pernas e palma das mãos. Para isso, com a equação 4, obtém-se a área do corpo reduzida SB_R [11].

$$SB_R = 0,82 \cdot SB_T \quad (4)$$

Para aplicar a modelagem semi-esferoidal em estudos de campos elétricos, determina-se que a área exposta do corpo humano é igual à área do semi-esferoide. Com isso, utilizando a equação para cálculo da área do semi-esferoide, é possível obter o raio R em função de L e SB_R , conforme a equação 5:

$$R = -0,738 \cdot L + (0,545L^2 + SB_R/\pi)^{0,5} \quad (5)$$

Utilizando os valores de massa e altura para uma mulher e um homem padronizados pela ICRP [13] obtém-se os valores da Tabela 2, obtidos a partir das equações 3, 4 e 5. Observa-se que a altura L do esferoide é considerada como sendo a altura do corpo humano.

TABELA 2: valores calculados para semi-esferoide equivalente ao corpo humano padronizado.

	m (kg)	L (m)	SB_T (m^2)	SB_R (m^2)	R esferoide (m)
Homem	73	1,76	1,899	1,557	0,179
Mulher	60	1,63	1,662	1,362	0,169

Para o cálculo da densidade de corrente no corpo humano em contato com o solo, utiliza-se o conceito de imagem de cargas, assim, tem-se o esferoide da Figura 3. O campo elétrico externo de interesse, E_0 , é aquele na direção longitudinal ao corpo humano (na direção de L), que será denominado nas equações como E_{0z} .

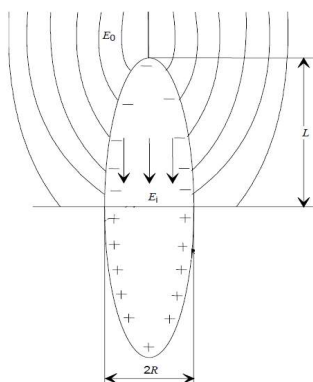


FIGURA 3: esferoide condutivo exposto a um campo elétrico.

As propriedades eletromagnéticas do esferoide são definidas pela constante dielétrica complexa, conforme a equação 6.

$$\epsilon_i = \epsilon_{ri} \cdot \epsilon_0 - j(\sigma/\omega) \quad (6)$$

Onde:

ϵ_i é constante complexa dielétrica do esferoide (F/m);

ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo (F/m);

ϵ_{ri} é a permissividade elétrica relativa do tecido do corpo humano (adimensional);

σ é a condutividade elétrica do tecido do corpo humano (S/m);

ω é a frequência angular do campo elétrico externo (rad/s).

Para o campo externo na direção Z, ou seja, E_{oz} , tem-se que quando L é menor que R (corpo humano), pode-se utilizar a equação 7 para o cálculo da densidade de corrente, obtendo-se a densidade na direção de Z, ou seja, J_z [14, 15].

$$J_z = \sigma \left(\frac{E_{oz}}{1 + \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_e} - 1 \right) (u_o^2 - 1) (u_o \coth^{-1}(u_o) - 1)} \right) \quad (7)$$

Onde:

ϵ_e a constante dielétrica complexa média externa ao esferoide;

u_o é dado pela equação 8:

$$u_o = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{L} \right)^2}} \quad (8)$$

Como o objetivo é o cálculo no interior do corpo humano, outras considerações podem ser feitas [11]. Para frequências até 100 kHz, para o corpo humano, tem-se que $\epsilon_{ri} \cdot \epsilon_0 \ll \frac{\sigma}{\omega}$. Assumindo também, aproximadamente, que $\epsilon_o = \epsilon_e$, e considerando que:

$$\coth^{-1}(u_o) = 0,5 \ln \left(\frac{u_o + 1}{u_o - 1} \right) \quad \text{para } |u_o| > 1 \quad (9)$$

então a equação 7 pode ser simplificada, resultando na equação 10.

$$J_z = \omega \epsilon_o E_{oz} \left[\frac{1}{(u_o^2 - 1) \left(u_o 0,5 \ln \left(\frac{u_o + 1}{u_o - 1} \right) - 1 \right)} \right] \quad (10)$$

Assim, substituindo os valores das constantes físicas e dos valores obtidos na Tabela 2 nas equações 8, 9 e 10, obtém-se as equação 11 para o padrão masculino, e a equação 12 para o padrão feminino, segundo parâmetros da ICRP.

$$J_{z-h} = 160,336 \cdot 10^{-9} E_{oz} \quad (11)$$

$$J_{z-m} = 155,781 \cdot 10^{-9} E_{oz} \quad (12)$$

Ainda deve-se realizar algumas correções, considerando que a densidade de corrente varia ao longo do esferoide e do corpo humano, devido, principalmente, à área da seção transversal de ambos. Sabe-se também

que varia devido à condutividade elétrica, mas isso será avaliado adiante. Assim para aplicação da presente metodologia, adotando valores conservadores, tem-se que investigar qual a região onde ocorre a maior densidade de corrente. Para uma avaliação qualitativa, na Figura 4 está ilustrada a variação da densidade de corrente no corpo humano, para o exemplo de um homem exposto a um campo externo de 1 kV/m (50 Hz) [11]. Na Figura 4, além do perfil humano, está também ilustrado o perfil do semi esferoide.

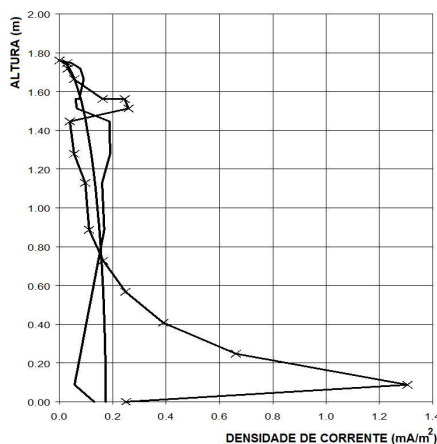


FIGURA 4: variação da densidade de corrente no corpo humano.

Verifica-se na Figura 4 que há dois máximos de corrente induzida: no tornozelo e na base do pescoço. Apesar do pescoço apresentar um valor menor que o tornozelo, sabe-se que os efeitos da corrente induzida é mais crítico nesta região, pois há uma forte proximidade com o tecido do sistema nervoso central, o que não ocorre no tornozelo. Com isso, o maior valor de densidade de corrente, e mais importante, é aquele situado no pescoço. Portanto, para calcular a corrente induzida no pescoço, é necessário fazer uma correção no valor de densidade de corrente, J_z , calculado para o esferoide. A norma IEC 62226-3-1 apresenta a metodologia para correção através das equações 13 e 14.

$$J_p = J_z \left(\frac{R_s}{R_p} \right)^2 \quad (13)$$

$$R_s = R \sqrt{1 - (h/L)^2} \quad (14)$$

Onde:

J_p é densidade de corrente no pescoço (A/m^2);

R_s é o raio da esferoide na altura do pescoço (m);

R_p é o raio do pescoço (m);

h é a altura do pescoço (m).

Os valores da altura e raio do pescoço para o homens e mulheres, padronizados pela ICRP estão expostos na Tabela 3.

TABELA 3: Valores de raio e altura da base do pescoço do corpo humano, segundo padrão ICRP.

Homem de referência		Mulher de referência	
Raio (m)	Altura (m)	Raio (m)	Altura (m)
0,0676	1,5130	0,0586	1,3972

Com a correção apresentada nas equações 13 e 14, tem-se as equações 15 e 16, para obtenção da densidade de corrente no pescoço, J_p , para homem e mulher, respectivamente.

$$J_{p-h} = 293,236 \cdot 10^{-9} E_{oz} \quad (15)$$

$$J_{p-m} = 343,487 \cdot 10^{-9} E_{oz} \quad (16)$$

Ao analisar a equação 1, percebe-se que o maior valor de campo elétrico no interior do corpo humano é obtido para os maiores valores de densidade de corrente. Assim, será aplicada a equação 16 na equação 1, pois isso resultará nos maiores valores. Então têm-se a equação 17.

$$E_i = \frac{343,487 \cdot 10^{-9} E_{oz}}{\sigma} \quad (17)$$

Com o método desenvolvido, ao inserir os parâmetros estabelecidos e padronizados pela ICRP, percebe-se que foi possível resumir o cálculo do campo elétrico interno na equação 17. Nesta equação o campo interno depende apenas da condutividade elétrica do corpo humano e do campo elétrico externo na direção Z. No contexto desse trabalho o campo elétrico externo é uma grandeza medida no ambiente da subestação, através de equipamentos e, portanto, o mesmo não seria estabelecido através de cálculo, mas sim medido. Com isso, resta apenas definir o valor da condutividade elétrica do corpo humano. A norma IEC 62226-3-1 utiliza o valor de 0,2 (S/m) nos cálculos desenvolvidos em seus métodos analíticos. É importante salientar que a condutividade elétrica varia no corpo dependendo principalmente do tipo de tecido estudado. Existem modelos de corpos humanos que reúnem propriedades físicas disponíveis na literatura para os tecidos biológicos. Um modelo desse tipo, denominado Phantom Duke, foi utilizado nas simulações que serão expostas adiante [16]. Nesse modelo os valores de condutividade elétrica dos tecidos do corpo humano são utilizados, baseados no banco de dados IT'IS LF [17]. Na Tabela 4 estão demonstrados alguns valores de condutividade elétrica para tecidos do sistema nervoso.

TABELA 4 – Condutividade elétrica de alguns tecidos do sistema nervoso, utilizado pelo modelo Phantom Duke.

Tipo de tecido	Média da condutividade elétrica (S/m)
Massa cinzenta	0,239
Massa branca	0,265
Cerebelo	0,660
Fluido cerebrospinal	1,780

Pode-se observar na equação 17 que quanto menor o valor da condutividade elétrica, maior será o resultado do valor do campo elétrico interno. Assim, como medida a favor da segurança, será adotado o valor de 0,1 (S/m). Esse valor corresponde 42 % do valor mais baixo entre os demonstrados na Tabela 4, ou seja, é menor que a metade deles. Também é a metade do valor utilizado pela IEC. Para utilizar a equação 17 em uma situação real, sugere-se utilizar o maior valor de campo elétrico externo medido inicialmente para atendimento aos Níveis de Referência. É importante observar que as medições fornecem os valores dos vetores de campo resultantes. Na equação 17, E_{oz} representa o campo elétrico externo na direção Z. Normalmente a resultante dessas medições não está exatamente na direção Z, com isso, há uma tendência da componente Z real (medida) ser menor. Assim, quando é utilizado o valor máximo medido, adota-se uma postura conservadora, pois o valor utilizado considera que todo o campo está na direção Z, o que aumenta o valor do resultado de E_i . Portanto, se for inserido o valor da condutividade elétrica de 0,1 (S/m), a equação final para cálculo do campo elétrico no interior do corpo humano, para 60 Hz, com parâmetros sugeridos pela ICNIRP, é dada na equação 18, adaptada para as unidades usuais das medições e da ICNIRP.

$$E_i = 3,435 E_{máx} \quad (18)$$

Onde:

$E_{máx}$ é o valor máximo de campo elétrico medido no meio ambiente da subestação (kV/m);

E_i é o campo elétrico medido no interior do corpo humano (mV/m).

2.2 Aplicação do método e resultados

A seguir será aplicada a equação 18 em uma subestação real, na qual os valores dos Níveis de Referência foram ultrapassados com relação ao campo elétrico. Serão avaliados os resultados e comparados com os valores obtidos através de simulação computacional, no qual é possível realizar um detalhamento muito maior do caso analisado.

As medições foram realizadas em uma subestação de 525 kV situada na região metropolitana de Curitiba. O maior valor de campo elétrico medido no interior da subestação, a um metro e meio do nível do solo, foi de 14,90 kV/m, acima, portanto, do valor limite estabelecido pela legislação brasileira para os Níveis de Referência, de 8,33 kV/m para a População Ocupacional. Ao aplicar a equação 18, tem-se que o campo elétrico máximo no interior do corpo humano, gerado pelo campo externo de 14,90 kV/m, é de 51,18 mV/m, ou seja, abaixo do limite estabelecido para as Restrições Básicas, que é de 120,00 mV/m. Nessa situação a subestação está em conformidade com a legislação brasileira. Para verificar a validade desses resultados foram realizadas simulações em ferramenta computacional. O software utilizado foi o *Sim4Life*. Essa plataforma possibilita a inserção de modelos biológicos do corpo humano, com detalhamento dos tecidos, em ambientes físicos com interação térmica, acústica e eletromagnética. A subestação foi modelada no software e o modelo foi validado através da comparação dos valores de campos elétricos medidos para os Níveis de Referência e os valores obtidos nas simulações. A Figura 5 mostra a subestação com a inserção de um corpo humano no local onde foi medido o maior campo elétrico, ou seja 14,9 kV/m. O valor máximo de campo elétrico obtido no interior do corpo nas simulações foi de 8,0 mV/m, e foi na região do pescoço. É importante notar na Figura 5 que na região da cabeça os maiores valores de intensidade de corrente estão no pescoço, assim como demonstrado no método analítico, na Figura 4, contudo, no calcanhar o campo é bem inferior. Uma explicação seria que no método analítico proposto é considerado um campo elétrico externo constante e na simulação com o *software* o campo externo varia, se aproximando mais da realidade. Os resultados obtidos através do método analítico e através das simulações é demonstrada na Tabela 5.

TABELA 5 – Comparação entre os resultados do método analítico simplificado e simulação computacional.

Campo elétrico externo máximo (kV/m)	Limite Campo elétrico externo (kV/m)	Campo elétrico interno máximo (mV/m)	Campo elétrico interno máximo (mV/m)	Limite Campo elétrico no interior do corpo humano (mV/m)
Medido em subestação de 525kV	Sugestão da OMS	Cálculo analítico simplificado	Simulação Computacional detalhada	Sugestão da OMS
14,9	8,33	51,2	8,0	120,0

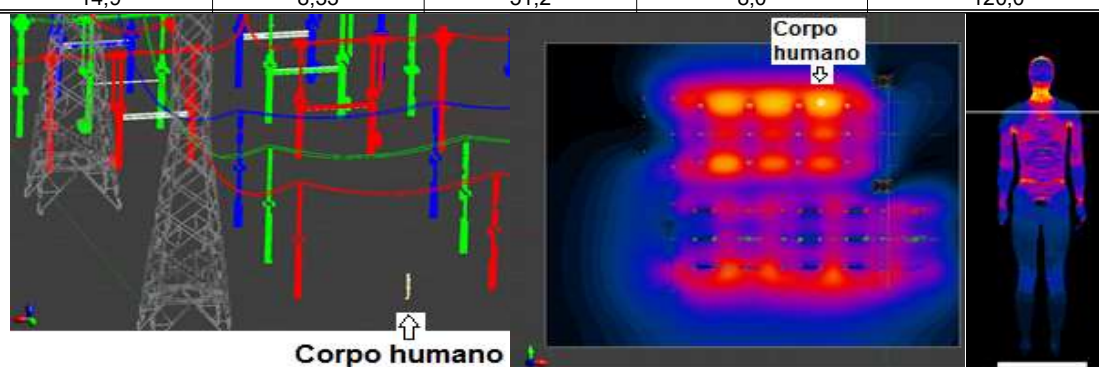


FIGURA 5: Subestação e corpo humano modelados no *software Sim4Life*.

3.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou um método analítico simplificado de cálculo do nível do campo elétrico no interior do corpo humano. O objetivo principal do método apresentado não foi obter valores precisos, mas garantir que os limites estabelecidos pela OMS fossem ultrapassados e, com isso, atestar a conformidade das instalações perante a legislação brasileira. Nesse contexto, foram realizadas simplificações que maximizam os resultados dos valores do campo interno, a favor da segurança. Ao final, os resultados apresentados na Tabela

5 demonstraram que o método é bastante conservador, pois resulta em valores quatro vezes superiores aos obtidos através de ferramenta computacional especializada, na qual acredita-se possuir resultados mais precisos, pois o corpo humano e seus tecidos são bastante detalhados, bem como a subestação e os campos elétricos gerados pela mesma. Uma constatação importante é que ambos os resultados estão bem abaixo do limite estabelecido pela OMS. Com isso, para as empresas que possuem instalações com valores de campo elétrico acima dos Níveis de Referência-recomenda-se uma avaliação com o método aqui proposto, resumido através da equação 18, para ter uma noção da possibilidade de que o resultado do Relatório de Conformidade demonstre o atendimento às Restrições Básicas. Caso os resultados da avaliação com o método simplificado aqui proposto indique que os limites não são atendidos, os resultados da simulação demonstram que há possibilidade ainda de atendimento à legislação, através de um estudo mais detalhado.

Por fim, o método proposto pode ser aplicado não apenas em subestações, mas para qualquer instalação do setor de energia elétrica, que preste serviços de geração, transmissão e distribuição, já que as resoluções 398 e 616 da ANEEL se aplicam a todos esses sistemas.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, Lei N° 11.934 de 5 de maio de 2009, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato20072010/2009/Lei/L11934.htm.

(2) ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz – 100 kHz)", Health Physics 99 (6) 818-836, 2010.

(3) IEEE 644/2004. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from Power Lines. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, 2004.

(4) WORLD HEALTH ORGANIZATION. Campos Eletromagnéticos e Saúde Pública. Fact sheet n° 322, junho de 2007.

(5) ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 398/2010. ANEEL: Brasília, 23 de março de 2010.

(6) ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 616/2014. ANEEL: Brasília, 1º de julho de 2014.

(7) HAYT, H. WILLIAM JR.; BUCK, JONH A. Eletromagnetismo. 6. Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

(8) CEPEL – Campos eletromagnéticos e a saúde. Disponível em: <http://www.cem.cepel.br/campos.htm>. Acesso em: 17 set. 2014.

(9) CEPEL Conceitos Básicos. Disponível em: <http://www.cem.cepel.br/conceitos.htm>. Acesso em: 17 set. 2014.

(1) CEPEL. Fontes de campos eletromagnéticos. Disponível em: <http://www.cem.cepel.br/fontes.htm>. Acesso em: 17 set. 2014.

(10) IEC 62226-3-1, Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 3-1: Exposure to electric fields – Analytical and 2D numerical models, Edition 1.1, 2016.

(11) IEC 62226-2-1, Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range – Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body – Part 2-1: Exposure to magnetic fields – 2D models, Edition 1, 2004.

(12) ICRP, Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values, ICRP Publication 2002, Pergamon.

- (13) A. Stratton, Electromagnetic Theory, New York, McGraw-Hill, 1941.
- (14) W. R. Smythe, Static and Dynamic Electricity, New York, McGraw-Hill, 1939.
- (15) Sim4Life Application and Support Team, Sim4Life Reference Guide, Release 4.4, nov. 2018
- (16) Hasgall PA, Di Gennaro F, Baumgartner C, Neufeld E, Gosselin MC, Payne D, Klingenberg A, Kuster N "IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues," Version 3.0, September 01st, 2015, DOI: 10.13099/VIP21000-03-0

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael Martins possui Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná - UFPR e Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais pela UFPR. Trabalhou como Pesquisador de Sistemas Elétricos no Instituto LACTEC e atualmente trabalha como Engenheiro de Subestações na Companhia Paranaense de Energia Elétrica, Geração e Transmissão – Copel GET.



Jeferson Shimomura é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2005). Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em projetos elétricos e equipamentos de subestações de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Atualmente é gerente do Departamento de Engenharia de Subestações na Copel GET.



Rogerio Borba possui graduação em Engenharia Elétrica (1989), graduação em Ciências Contábeis, pós-graduação em Operação e Gestão Técnica de Concessionárias de Energia e pós-graduação em Planejamento, Operação e Comercialização na Indústria de Energia Elétrica, todos pela UFPR, e pós-graduação em Proteção de Sistemas Elétricos-UNIFEI/ITAJUBÁ. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em proteção, projetos elétricos e equipamentos de subestações. Atualmente é gerente da Divisão de Projetos de Subestações da Copel GET.



Josef Hoffmann Neto possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFPR (1985), pós-graduação em Gestão de Empresas pela Fundação Getúlio Vargas - FGV (2002), Mestrado pela UFPR (2008) em Sistemas de Energia. Possui experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em projetos elétricos de montagem e equipamentos de subestações de Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica. Atualmente é engenheiro de projetos elétricos da Copel GET.



Clailton Leopoldo da Silva possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFPR, pós-graduação em Engenharia de Confiabilidade pela UTFPR e pós-graduação em Instrumentação Eletrônica pela UFPR. Possui experiência como Engenheiro de Construção de Subestações na CEEE Distribuição e como Engenheiro de Manutenção de Subestações da Copel Distribuição. Atualmente trabalha como engenheiro de projetos elétricos na Copel GET.



Cresencio Silvio Segura Salas. Nascido em 1976 no Peru. Engenheiro Mecânico Eletricista pela Universidade Nacional de Ingeniería (UNI) - Lima em 2001, mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) em 2007 e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2010. É pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC e professor do Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia do LACTEC.



Patrício E. Munhoz-Rojas graduou-se em Engenharia Elétrica em 1965 e Engenheiro Civil Eletricista em 1968. Atua como professor na graduação desde 1966 e na pós-graduação desde 1969. Possui experiência nas áreas de: Projetos de subestações, ensaios de Alta Tensão, ensaios de Compatibilidade Eletromagnética e proteção contra descargas atmosféricas. É membro ativo do CIGRE nessas áreas desde 1984. É Consultor no LACTEC e Coordenador do WG C4.28 no CIGRE.