



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GDS/32

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO -10**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GDS**

**RECOMENDAÇÕES PARA A VERIFICAÇÃO DO ATENDIMENTO À REGULAMENTAÇÃO NACIONAL  
REFERENTE À EXPOSIÇÃO HUMANA AOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA**

**Patricio Munhoz-Rojas(\*)  
Institutos LACTEC**

**Rafael Martins  
COPEL G&T**

**Cresencio S. Segura Salas  
Institutos LACTEC**

**Joseff Hofmann Neto  
COPEL G&T**

**Alexandre Albarello Costa  
Institutos LACTEC**

**RESUMO**

Este trabalho reporta alguns dos resultados obtidos num projeto de P&D ANEEL, realizado pela COPEL e o LACTEC, sobre a interação dos campos eletromagnéticos e os seres humanos nos ambientes de sistemas elétricos de potência, na frequência correspondente à geração e transmissão de energia elétrica. Mais especificamente, reporta resultados sobre o processo de verificação do atendimento às restrições básicas, previstas nas recomendações da ICNIRP 2010.

No setor elétrico brasileiro é reconhecido que este processo de verificação das restrições básicas carece de uma base metodológica de aplicação prática e que o conhecimento de suas restrições e considerações não é do entendimento pleno dos envolvidos. O termo restrições básicas, conforme ICNIRP 2010, se refere a valores de máximos da intensidade do campo elétrico induzido no interior do corpo humano, tal que os seus efeitos imediatos no sistema nervoso, tecidos musculares e a indução de fosfenos nas retinas sejam evitados.

Segundo a resolução normativa ANEEL 616 de 2014, a verificação do atendimento às restrições básicas é o último recurso que as concessionárias têm, no caso que as instalações que elas operam não atendam os Níveis de Referência. Os níveis de referência são os valores máximos de campo elétrico e magnético, supostamente uniformes, tal que as restrições básicas sejam atendidas com segurança.

No início do projeto, foram analisados e comparados os diversos métodos existentes para calcular o campo elétrico no interior do ser humano. Assim, após fazer uma avaliação dos diferentes softwares existentes no mercado, optou-se por utilizar a ferramenta de simulação numérica Sim4Life. Esta ferramenta é reconhecida na comunidade científica por ser a plataforma multifísica de simulação que suporta nativamente modelos anatômicos virtuais, desenvolvidos para estudos referentes à saúde e segurança com respeito à radiação eletromagnética, em seres humanos e animais. Para simulações de baixa frequência Sim4Life utiliza modelos quase estáticos.

Como exemplo dos resultados obtíveis com esta ferramenta, mostraremos os resultados de uma simulação realizada com o modelo "phantom" Duke, um homem de 37 anos, 72 kg, 1,77 metros de altura, em pé embaixo de uma linha de transmissão.

O resultado prático deste trabalho, ao mostrar as limitações e aproximações embutidas nos diferentes métodos de cálculo do campo elétrico no interior do ser humano, é, além de desmistificar este tipo de cálculos, desenvolver recomendações para a interpretação posterior dos resultados dos mencionados cálculos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Campos elétricos e magnéticos, Restrições básicas, indução de campo elétrico, métodos numéricos.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

É um fato bem estabelecido que a exposição de um ser humano a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência resulta na indução de um campo elétrico no seu interior e que, quando a intensidade deste campo elétrico no interior atinge certos níveis, ele provoca efeitos agudos ou de curto prazo, como a estimulação de tecido nervoso, principalmente no Sistema Nervoso Central, e também a indução de fosfenos na retina [1].

Existe também a preocupação de que eles possam provocar efeitos crônicos ou de longo prazo, particularmente efeitos cancerígenos, porém, até o presente momento, não há sido possível identificar nenhum mecanismo biológico que possa explicar a relação causal destes efeitos crônicos [2].

Todavia, a moderna citologia molecular alerta e sugere que a interação entre complexos seres vivos, como os seres humanos, e os campos eletromagnéticos de baixa frequência depende de demasiadas variáveis e, possivelmente, não possa ser definida por relações causais simples [3].

Perante estes fatos e preocupações, os diferentes países têm emitido legislações específicas visando proteger a saúde de sua população. A maioria dos países, entre eles o Brasil, tem optado por proteger a população contra os efeitos de curto prazo, os quais estão bem estabelecidos.

Assim, a Lei 11.934 [4], promulgada em maio de 2009, estabeleceu que deveriam ser respeitados os limites estabelecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS), os quais até o presente momento, visam somente prevenir a ocorrência de efeitos agudos ou de curto prazo.

A Lei 11.934 tem sido regulamentada, pela ANEEL, mediante as Resoluções Normativas números 398, 413 e 616 [5-7].

Efeitos do impacto destas Resoluções Normativas no projeto e operação das instalações do Setor Elétrico têm sido reportados em SNPTEEs anteriores [8,9]; sendo que estes trabalhos mostram algumas das dificuldades que as concessionárias de energia têm tido na interpretação e/ou na implementação das providências necessárias ao atendimento à regulamentação nacional.

Os limites recomendados pela OMS estão estabelecidos no guia emitido pela International Commission on Non-Ionising Radiation Protection (ICNIRP) [1]. O guia da ICNIRP estabelece duas classes de limites:

- **Restrições Básicas** que são os limites de exposição em termos de quantidades físicas diretamente relacionadas com os efeitos à saúde devidamente estabelecidos. Na versão atual do guia da ICNIRP, a quantidade utilizada para especificar as restrições básicas é o valor do campo elétrico no interior do ser humano;

- **Níveis de Referência** que são valores dos campos não perturbados elétrico e magnético, supostamente uniformes na região onde estará o ser humano, obtidos, a partir das restrições básicas, usando modelos matemáticos e considerando fatores de segurança que asseguram o atendimento das restrições básicas, mesmo nos casos mais desfavoráveis de exposição.

O atendimento aos Níveis de Referência pode ser facilmente verificado por meio de medições, para as quais existem procedimentos normatizados para sua adequada realização [10-12]; ou ainda por meio de cálculos, para os quais também existe metodologia consagrada facilmente acessível.

Já a verificação do atendimento às Restrições Básicas é muito mais difícil. Na prática, existem poucas instituições que dispõem dos recursos de modelagem necessários.

Considerando os fatores de segurança embutidos nos níveis de referência, o guia ICNIRP estabelece, e a legislação e suas respectivas regulamentações tem acatado, o preceito de que o fato de os níveis de referência ser excedidos não necessariamente significa que as restrições básicas foram excedidas. Por isso, a regulamentação nacional prevê que, na eventualidade dos Níveis de Referência não serem atendidos, a concessionária possa ainda apresentar um Relatório de Conformidade que demonstre o atendimento às Restrições Básicas.

Este trabalho reporta alguns dos resultados obtidos num projeto de P&D ANEEL, para estudar a interação dos campos eletromagnéticos e os seres humanos nos ambientes de sistemas elétricos de potência e , destinado a capacitar o LACTEC e a COPEL para participar do processo de aprimoramento da regulamentação nacional e a implantar o processo de verificação de atendimento às restrições básicas.

## 2.0 - CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA

Os campos eletromagnéticos de baixa frequência (1 Hz – 100 kHz) podem ser descritos mediante as equações de Maxwell com uma aproximação introduzida para levar em conta que se trata de campos lentamente variáveis no tempo. A aproximação consiste em desprezar a contribuição das correntes de deslocamento na produção de campo magnético em situações, como a dos sistemas elétricos, onde existe corrente em meios que são bons condutores e também em meios predominantemente condutores

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{\mathbf{E}} &= -\frac{\partial \bar{\mathbf{B}}}{\partial t} & \nabla \times \bar{\mathbf{H}} &= \bar{\mathbf{j}} + \frac{\partial \bar{\mathbf{D}}}{\partial t} \approx \bar{\mathbf{j}} \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{D}} &= \rho & \nabla \cdot \bar{\mathbf{B}} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Vemos que para campos magnéticos de baixa frequência as equações são aproximadamente as mesmas que as do caso magneto-estático.

Normalmente, para linhas de transmissão de energia elétrica, se faz a aproximação de supor que os condutores somente se estendem unicamente na direção de transmissão, que aqui chamaremos de eixo z. Neste caso, aproximadamente o campo magnético é somente transversal e, portanto:

$$\begin{aligned} (\nabla \times \bar{E}_t)_z &\approx \bar{0} & \nabla \times \bar{H}_t &\approx j\hat{a}_z \\ \nabla \cdot \bar{D} &= \rho & \nabla \cdot \bar{B}_t &\approx 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Nas equações (2) vemos também que, neste caso, os campos elétricos transversais de baixa frequência cumprem equações que são aproximadamente as mesmas que as do caso eletrostático. Logo, o campo elétrico transversal é determinado somente pelo gradiente do potencial.

Também normalmente, para linhas de transmissão de energia elétrica, como os condutores da linha são bons condutores, se faz a aproximação de supor que o campo elétrico na direção de transmissão é muito pequeno e, portanto aproximadamente, o campo elétrico é somente transversal. O conjunto destas aproximações é conhecido como “aproximação quase estática”.

É por isto que normalmente é dito que, para os campos eletromagnéticos de baixa frequência, o campo elétrico e o campo magnético são praticamente desacoplados. Frase que significa que o campo elétrico depende basicamente da carga elétrica na superfície dos condutores e que o campo magnético depende basicamente da corrente elétrica percorrendo os condutores.

Por isso, o campo elétrico produzido por sistemas elétricos de potência é principalmente dependente da tensão de operação do sistema e o campo magnético produzido é principalmente dependente do estado de carregamento do sistema.

### 3.0 - INTERAÇÃO ENTRE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE BAIXA FREQUÊNCIA E OS SERES HUMANOS

Para efeito da interação dos campos eletromagnéticos de baixa frequência (1 Hz – 100 kHz) com os seres humanos num nível macro (i.e. não no nível celular), os seres humanos são considerados como meios predominantemente condutores [1].

Portanto, no nível macro, a interação dos campos eletromagnéticos com os seres humanos pode ser descrita através de:

- a) As equações de Maxwell, as quais escritas no domínio da frequência e supondo uma dependência temporal da forma  $\exp(i\omega t)$ , ficam como:

$$\begin{aligned} \nabla \times \bar{E} &= -i\omega\bar{B} & \nabla \times \bar{H} &= \bar{j} + i\omega\bar{D} \\ \nabla \cdot \bar{D} &= \rho & \nabla \cdot \bar{B} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

- b) Suplementadas pelas equações constitutivas da material biológico:

$$\bar{j} = \bar{j}_0 + \sigma\bar{E} \quad \bar{D} = \epsilon\bar{E} \quad \bar{B} = \mu_0\bar{H} \quad (4)$$

Onde “ $j_0$ ” é a densidade de corrente injetada externamente.

Nas equações (4) vemos que o material biológico, ou neste caso o ser humano, é considerado como não magnético.

Existem diferentes maneiras de calcular numericamente campos eletromagnéticos. Para ter uma ideia dos diferentes métodos e suas possibilidades o leitor pode consultar a Brochura Técnica do CIGRE No. 543, de 2013 [13].

Também existem diferentes maneiras de calcular numericamente o campo elétrico no interior de um ser humano, assim, depois de avaliar os diferentes softwares existentes no mercado, optou-se pela ferramenta de simulação numérica Sim4Life, especificamente seus “low-frequency solvers”, que apresenta como diferencial a capacidade de suportar nativamente modelos anatômicos virtuais de seres humanos, desenvolvidos para o estudo de problemas de saúde e segurança de seres humanos, na interação com campos eletromagnéticos.

De fato, o Sim4Life resolve as equações (3) + (4) colocadas em termos do potencial vetorial “A” e do potencial escalar “ $\phi$ ”:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\bar{E} + i\omega\bar{A}) &= \bar{0} & \nabla \times \left( \nabla \times \frac{\bar{A}}{\mu_0} \right) &= \bar{j}_0 - (\sigma + i\omega\varepsilon)(\nabla\varphi + i\omega\bar{A}) \\ \nabla \cdot \left( (\sigma + i\omega\varepsilon)(\nabla\varphi + i\omega\bar{A}) \right) &= \nabla \cdot \bar{j}_0 & \bar{B} &= \nabla \times \bar{A} \end{aligned} \quad (5)$$

A aplicação da aproximação quase estática às equações (5) gera os “low-frequency solvers” do Sim4Life, que operam no domínio da frequência.

Os “low-frequency solvers” do Sim4Life basicamente resolvem a equação (6):

$$\nabla \cdot \left( (\sigma + i\omega\varepsilon)(\nabla\varphi + i\omega\bar{A}_0) \right) = 0 \quad (6)$$

Onde  $\bar{A}_0$  é a solução de:

$$\nabla^2 \left( \frac{\bar{A}_0}{\mu_0} \right) = \bar{j}_0 \quad (7)$$

Ou seja, o potencial magnético e o campo magnético são calculados usando a Lei de Biot-Savart.

Nos “Low-frequency solvers” do Sim4Life, a discretização espacial é realizada usando elementos finitos (FEM) e o método se denomina “Scalar Potential Finite Element (SPFE) method”; porém, o Sim4Life utiliza grades retilíneas para poder discretizar melhor os complexos modelos anatômicos.

É importante enfatizar que este tipo de cálculo dos efeitos do campo eletromagnético de baixa frequência com os seres humanos, no nível macro, ainda que muito útil para calcular valores do campo elétrico interno ao ser humano; não pode explicar um dos fatos mais intrigantes deste tipo de interação, que é o fato de que a interação só produz efeitos fisiológicos numa janela paramétrica do campo eletromagnético: frequências entre 8 e 60 Hz e campos magnéticos menores que 100  $\mu\text{T}$  [3].

#### 4.0 - EXEMPLO DE CÁLCULO DO CAMPO ELÉTRICO DE BAIXA FREQUÊNCIA E DE DENSIDADE DE CORRENTE INDUZIDA NO INTERIOR DE SERES HUMANOS

##### 4.1 Modelos Virtuais

Os modelos virtuais de seres humanos considerados neste trabalho estão baseados em dados obtidos através imagens de ressonância magnética do corpo humano completo e estão disponíveis em formato CAD. Os modelos consideram aproximadamente 200 órgãos e 80 tipos de tecidos de alta resolução. Estes modelos foram concebidos para serem integrados com solvers de análises físicos como eletromagnetismo, térmico, acústico e da física dos fluidos. Os valores de condutividade e permissividade dos tecidos são um ponto que requer muito cuidado, pois na literatura podem ser encontrados valores em amplas faixas, o que gera incertezas nos resultados [14]. Neste estudo esses valores foram obtidos junto com o fornecedor dos modelos anatômicos.

Para as análises aqui realizadas considera-se o modelo de um homem denominado de Duke de 37 anos, 72 kg, 1,77 metros de altura.

##### 4.2 Análise do Campo Elétrico

Como exemplo dos resultados obtíveis com esta ferramenta, mostraremos aqui os resultados do caso de exposição ao campo elétrico e magnético apresentado em [15], deixando para a ocasião da apresentação do IT outros resultados obtidos no projeto. No trabalho da referência [15], um barramento de 110 kV de uma subestação, de um sistema operando em 50 Hz, está posicionado a 5 metros acima do modelo Duke. A corrente no barramento é de 600 A, e a postura do modelo é em pé, com o braço direito estendido, conforme Figura 1 (a).

A resolução do reticulado que é utilizado na configuração do solver é de 2 mm, para todo o corpo humano.

As Figuras 1 (b) e 1 (c) mostram os resultados para o campo elétrico externo e para a densidade de corrente induzida no corpo humano pelo campo elétrico externo, respectivamente.

Para a condição de tensão de 110 kV no barramento, o campo elétrico induzido no cérebro é de 2,9 mV/m, no coração é de 3,8 mV/m e, na medula espinhal é de 4,7 mV/m; valores bastante inferiores ao limite estabelecido, para exposição do público em geral, pela ICNIRP para uma frequência de 50 Hz, que é de 20 mV/m para tecidos do sistema nervoso central da cabeça e de 400 mV/m para todos os outros tecidos da cabeça e do corpo.

Todavia, na Figura 1 (b) podemos perceber como o campo elétrico externo, que é perturbado pela presença do ser humano, depende da posição do mesmo. E na Figura 1 (c) podemos ver como esta dependência da posição influencia o campo elétrico interno.

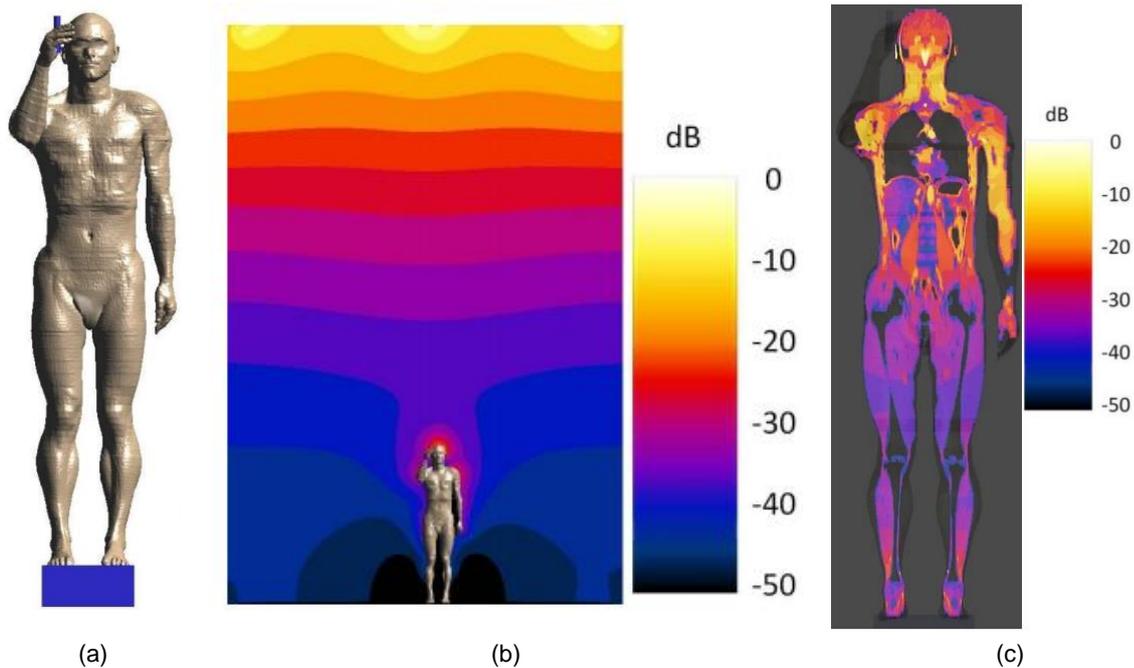


FIGURA 1 – Exposição ao campo elétrico produzido por um barramento de distribuição de 110 kV. (a) Posição do corpo humano. (b) Campo elétrico externo. (c) Densidade de corrente Induzida pelo de campo elétrico [15]

## 5.0 - CONCLUSÃO

Ainda que a finalidade última do projeto de P&D ANEEL, realizado pela COPEL e o LACTEC, seja um avanço no entendimento dos mecanismos de interação dos campos eletromagnéticos de baixa frequência e os seres humanos, ponto do qual estamos muito longe; este trabalho mostra que como subproduto deste projeto se obterá a capacitação necessária para verificar o atendimento às Restrições Básicas, além de capacitar o LACTEC e a COPEL para participar do processo de aprimoramento da regulamentação nacional.

Quanto às recomendações para verificar o atendimento à regulamentação nacional, reconhecendo:

- o fato de que a regulamentação brasileira, referente à exposição humana aos campos elétricos e magnéticos de baixa frequência, se limita à prevenção de efeitos agudos ou de curto prazo à saúde humana, e que;
- os modelos disponíveis para o cálculo do campo interno ao corpo humano estão ainda em fase de desenvolvimento e seus resultados são muito dependentes de dados de condutividade, os quais atualmente estão longe de ser bem estabelecidos;

nossa recomendação seria que, na eventualidade dos Níveis de Referência não serem atendidos mas o estudo demonstrar o atendimento às Restrições Básicas:

- 1) A concessionária deveria, para atender os requisitos da ANEEL, apresentar um Relatório de Conformidade demonstrando o atendimento às Restrições Básicas;
- 2) Ainda que não seja obrigada por lei, particularmente se o problema for relacionado aos limites para o campo magnético, a concessionária deveria elaborar um Plano de Adequação e, no mínimo, implementá-lo em suas novas instalações.

Até por que, a regulamentação brasileira certamente será aprimorada no futuro, para considerar as situações de exposição existentes em sistemas de potência modernos, caracterizados por distorções harmônicas e desbalanços que podem ser consideráveis. Também deve-se considerar que, na situação atual, nos requisitos de atendimento aos Níveis de Referência ainda existem elementos que precisarão ser mais bem definidos, como por exemplo: Para fins de extrapolação das medições de campo magnético, o que se entende exatamente por carga pesada?

Por outro lado, a disponibilidade de softwares como o Sim4Life permitirá a avaliação do campo elétrico interno ao ser humano em condições de exposição a campos elétricos e magnéticos mais reais, como os existentes nos sistemas de potência modernos, e não somente a exposição a campos uniformes e monocromáticos. Isto pode ser muito útil, por exemplo, para avaliação de situações de exposição para trabalhadores de linha viva.

Outra linha de trabalho que se abre seria tentar incluir a anisotropia da condutividade de alguns tecidos, que reconhecidamente são anisotrópicos nas frequências industriais.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection) – “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic fields (1Hz – 100 kHz)”, Health Physics 99(6), pp. 818-836, 2010.
- (2) WG C3.01 Report –“50-60 Hz magnetic fields and cancer, forty years of research: it is time to reassure”, Electra 287 (August 2016), 38-40, 2016.
- (3) R.H.W. Funk, T. Monsees & N. Ozkucur,” Electromagnetic effects – From cell biology to medicine”, Progress in Histochemistry and Cytochemistry 43, pp. 177-264, 2009.
- (4) Lei 11.934, de 05 de maio de 2009.
- (5) Resolução Normativa ANEEL Nº 380, de 23 de março de 2010.
- (6) Resolução Normativa ANEEL Nº 413, de 3 de novembro de 2010.
- (7) Resolução Normativa ANEEL Nº 616, de 1º de julho de 2014.
- (8) A.C.P. Sartin, P.C. de O. Teixeira & F.A.M. Pioto, “Avaliação de campos elétricos e magnéticos nas instalações da CTEEP para o atendimento da Resolução Normativa 0398/2010 da ANEEL”, XXIII SNPTEE –GDS/28, 2015.
- (9) L.A.M.C. Domingues, C.R.N. Barbosa & A. Mpalantinos Neto, “Análise das implicações da Resolução Normativa ANEEL 616 no projeto e operação das instalações do Setor Elétrico”, XXIII SNPTEE –GLT/24, 2015
- (10) IEC Standard 61786 - Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 1: Requirements for measuring instruments.
- (11) IEC Standard 61786 - Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings – Part 2: Basic standard for measurements.
- (12) NBR 25415 - Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz.
- (13) Brochura Técnica CIGRE No.543 (2013), Guideline for Numerical Electromagnetic Analysis Method and its Application to Surge Phenomena, WG C4-501, www.e-cigre.org.
- (14) F Bakker, M M Paulides, E Neufeld, A Christ, X L Chen, N Kuster and G C van Rhoon, “Children and adults exposed to low-frequency magnetic fields at the ICNIRP reference levels: theoretical assessment of the induced electric fields”, Physics in Medicine and Biology 57(7), pp. 1815- 1829, 2012.
- (15) X. L. Chen, S. Benkler, C. H. Li, N. Chavannes and N. Kuster, "Low frequency electromagnetic field exposure study with posable human body model," 2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale, FL, pp. 702-705, 2010.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Patrício E. Munhoz-Rojas

Recebeu o BSc. em Engenharia Elétrica e o grau de Engenheiro Eletricista da Universidad de Chile, em 1965 e 1968, respectivamente. Trabalhou na COPEL desde 1975, tendo atingido o nível de Engenheiro Consultor em 1995. Trabalhou também na UTFPR, entre 1981 e 2013, como Professor de Eletromagnetismo. Atualmente trabalha nos Institutos Lactec, como Pesquisador e Consultor Científico.

Tem participado em diversos Grupos de Trabalho internacionais do CIGRÉ desde 1984, sendo atualmente Coordenador do WG C4.28.