



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

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ANÁLISE DO IMPACTO DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL 398/2010 SOBRE AS INSTALAÇÕES
EXISTENTES DO SIN**

Delmo de Macedo Correia (*)
ONS

Carlos Campinho
ONS

Antônio Carlos C. de Carvalho
ONS

RESUMO

De acordo com resolução da ANEEL, a exposição de seres humanos a campos elétrico e magnético deve estar limitada aos valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde – OMS, que endossa as recomendações do ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. Os guias do ICNIRP, com base no cálculo por simulação de grandezas elétricas induzidas no interior do corpo humano imerso em campos eletromagnéticos, estabelecem limiares seguros denominados de restrições básicas. Por facilidade de uso, desacoplam o elemento agressor (instalação elétrica) e a vítima (corpo humano) e recomendam a utilização de níveis de referência.

A resolução estabelece que os agentes detentores de concessões de empreendimentos de transmissão devem apresentar memorial de cálculo ou relatório das medições dos campos elétrico e magnético. Caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos níveis de referência, o agente pode apresentar um relatório de conformidade que comprove o atendimento às restrições básicas. Tal relatório apresenta o cálculo de grandezas elétricas induzidas no interior do corpo humano imerso em campos eletromagnéticos feito por simulação tridimensional.

O cálculo dos campos elétrico e magnético feito com a combinação de premissas críticas tais como altura mínima do condutor ao solo e corrente de curta duração pode acarretar que os níveis de referência não sejam atendidos em um conjunto considerável de linhas de transmissão nos níveis de tensão mais elevados. Nesses casos, será necessária a apresentação do relatório de conformidade antes que medidas de alteamento da linha sejam consideradas. A consequência da afirmativa anterior leva à seguinte constatação: caso não seja apresentado relatório de conformidade para as situações em os níveis de referência não tenham sido atendidos, haverá aumento de custo das instalações decorrente do aumento da altura das estruturas.

Desde sua criação, o ONS tem acompanhado a análise da conformidade dos projetos básicos em relação aos requisitos constantes nos anexos técnicos dos editais de leilão de transmissão da ANEEL de mais de trezentas linhas de transmissão. Com base em uma análise estatística de uma amostragem desses projetos, o artigo tem o objetivo de discutir o impacto da resolução em questão sobre a operação do sistema de transmissão brasileiro, levando em conta os seguintes aspectos:

- critérios de projeto das linhas do sistema de transmissão praticados antes e depois da publicação da resolução em foco;
- eventual necessidade de alteamento de linhas de transmissão em operação;
- necessidade de emissão de relatório de conformidade.

PALAVRAS-CHAVE

Campo elétrico, Campo magnético, Linha de transmissão, Subestação

(*) Rua da Quitanda, 196 – 20091-005 Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Tel: (+55 21) 2203-9690 – Fax: (+55 21) 2203-9420 – Email: delmocorreia@ons.org.br

1.0 - INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

As primeiras preocupações do setor elétrico brasileiro com questões relativas a campos elétricos ocorreram na década de 70, motivadas pelo projeto das linhas de 765 kV de Itaipu (1). A partir da década de 80, a tratativa do tema no Brasil se consolidou e empreendimentos de 500 kV começaram a ser feitos com base em brochuras da Cigré (2). Por sua vez, a questão relativa a campos magnéticos só começou a ser levada em conta no Brasil no final da década de 90, vindo a se tornar mais estruturada no início do novo século.

Desde sua emissão, as recomendações do ICNIRP foram encampadas pelo setor, no que se refere ao projeto de linhas de transmissão. Embora o pátio interno de 765 kV de Itaipu tenha considerado critérios relativos a campo elétrico 0(1), essa não era uma prática corriqueira no Brasil.

De acordo com a Resolução Normativa da ANEEL (REN) 398 de 23 de março de 2010 (3), revisada pela REN 413 de 3 de novembro de 2010 (4), que regulamentam a Lei nº 11.934 de 5 de maio de 2009, no que se refere a instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica na frequência de 60 Hz, a exposição de seres humanos a campos elétrico e magnético deve estar limitada aos valores recomendados pela Organização Mundial de Saúde – OMS.

A OMS endossa as recomendações do ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, cujo objetivo é limitar a exposição a campos eletromagnéticos capazes de causar efeitos adversos à saúde. Tais recomendações foram publicadas em 1998 no *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)* (5) e tiveram as recomendações referentes a baixas frequências revisadas posteriormente em 2010 no *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)* (6).

1.2 Recomendações do ICNIRP

Os guias do ICNIRP calculam por simulação grandezas elétricas induzidas no interior do corpo humano imerso em campos eletromagnéticos e estabelecem limiares seguros denominados de restrições básicas. Por facilidade de uso, desacoplam o elemento agressor (instalação elétrica) e a vítima (corpo humano) e recomendam a utilização de níveis de referência para os campos elétrico e magnético produzidos pelo elemento agressor, calculados com a utilização de fatores de segurança bastante robustos.

No guia publicado em 1998, válido para frequências até 300 GHz, as restrições básicas na faixa de frequência em questão têm o objetivo de limitar a densidade de corrente capaz de provocar efeitos adversos em funções do sistema nervoso. Por sua vez, no guia publicado em 2010, que revisa as recomendações do guia anterior para a faixa de frequência de 1 Hz a 100 kHz, as grandezas físicas utilizadas para especificar as restrições básicas na caracterização à exposição a campos eletromagnéticos é o campo elétrico interno, já que é essa grandeza que afeta células nervosas e outras células eletricamente sensíveis. Um resumo das restrições básicas e níveis de referência é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Restrições básicas e níveis de referência em função do guia do ICNIRP

Guia ICNIRP	Tipo de exposição	Grandeza em valor eficaz	Público em geral	Exposição ocupacional
1998	Restrição básica	Densidade de corrente na cabeça e tronco (mA.m^{-2})	2	10
	Nível referência	Intensidade de campo elétrico (kV/m)	4,17	8,33
		Intensidade de campo magnético (A/m)	66,67	333,33
		Densidade de fluxo magnético (μT)	83,33	416,67
2010	Restrição básica	Campo elétrico interno (mV.m^{-1})	24	120
	Nível referência	Intensidade de campo elétrico (kV/m)	4,17	8,33
		Intensidade de campo magnético (A/m)	160	800
		Densidade de fluxo magnético (μT)	200	1000

Os guias do ICNIRP estabelecem critérios diferentes para dois tipos de exposição, definidos nos próprios guias e denominados de exposição ocupacional e exposição do público em geral. Exposição ocupacional se refere a adultos expostos a campos elétrico e magnético de 1 Hz a 10 MHz em seus locais de trabalho, geralmente sob condições conhecidas, e como resultado da execução de suas atividades de trabalho regulares. Já o termo público em geral se refere a indivíduos de todas as idades e diferentes estados de saúde, o que pode aumentar a variabilidade das susceptibilidades individuais. Em muitos casos, membros do público em geral não estão cientes de sua exposição a campos. Tais considerações embasam o fato de o ICNIRP ter adotado restrições mais rigorosas à exposição para o público em geral do que para trabalhadores expostos ocupacionalmente. Tal diferenciação de critérios vale tanto para as restrições básicas quanto para os níveis de referência.

Os guias do ICNIRP não foram elaborados especificamente para sistemas de transmissão e distribuição. Têm metas muito mais abrangentes e cobrem o espectro de frequência de 1 Hz até 300 GHz, como o próprio título esclarece e até mesmo a aplicação de equipamentos biomédicos, por exemplo. A utilização e adequação desses guias para o universo dos sistemas elétricos de potência foi um dos objetivos da REN 398.

1.3 REN 398/2010, revisada pela REN 413/2010

A REN 398 foi elaborada com base no guia do ICNIRP publicado em 1998 (5). Embora possa se prever que os valores regulados venham a ser atualizados segundo o guia publicado em 2010 (6), todas as avaliações feitas no presente artigo levaram em conta os limites estabelecidos na resolução vigente.

A REN 398 estabelece procedimentos específicos para novos empreendimentos de transmissão e para os existentes. Os agentes detentores de concessões dos novos empreendimentos de transmissão devem, até o final da fase de comissionamento, adicionar à documentação exigida pela ANEEL o memorial de cálculo ou o relatório das medições dos campos elétrico e magnético. Caso os valores calculados ou medidos sejam superiores aos níveis de referência, o agente pode apresentar um relatório de conformidade. Se o agente optar por não apresentar o relatório de conformidade ou se o resultado desse demonstrar o não atendimento às restrições básicas, deve ser apresentado um plano de adequação das instalações.

Já no caso dos empreendimentos existentes, o agente deve apresentar o memorial de cálculo dos campos elétrico e magnético. Caso os valores calculados sejam iguais ou superiores aos níveis de referência, devem ser realizadas medições, cujos resultados podem levar a duas situações. Caso os valores medidos sejam superiores aos níveis de referência, o agente deve: apresentar um relatório de conformidade, se os resultados demonstrarem o atendimento às restrições básicas; ou apresentar um relatório de conformidade e um plano de adequação das instalações, se os resultados demonstrarem o não atendimento às restrições básicas.

O cálculo dos níveis de referência feito com a combinação de premissas críticas, tais como altura mínima do condutor ao solo (condições climáticas mais desfavoráveis) e corrente de curta duração, podem acarretar que os níveis de referência não sejam atendidos em um conjunto considerável de linhas de transmissão nos níveis de tensão mais elevados (500 kV, por exemplo) e no interior da faixa. No caso de subestações, essa avaliação deverá ser feita nas áreas interna e externa à mesma. Em não atendendo, a providência inicial deverá ser a apresentação do relatório de conformidade, antes que medidas de alteamento da linha venham a ser cotejadas. Tal afirmação vale tanto para as linhas existentes quanto para as linhas em projeto.

2.0 - BASE DE DADOS

2.1 Empreendimentos do sistema de transmissão

A Tabela 2 apresenta o comprimento total por nível de tensão das linhas do sistema de transmissão brasileiro (instalações com tensão maior ou igual a 230 kV mais os ativos de conexão de usinas e interligações internacionais) em operação em 2009.

Tabela 2 – Comprimento total por nível de tensão das linhas do sistema de transmissão brasileiro

Tensão nominal (kV)	Comprimento total (km)	Percentual
230	41.504	43,48%
345	9.784	10,25%
440	6.671	6,99%
500 e 525	33.212	34,79%
600 CC	1.612	1,69%
765	2.683	2,81%
Total	95.465	100,00%

2.2 Projetos básicos

O ONS, agente responsável por executar as atividades de coordenação e controle da operação da geração e da transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional – SIN, tem a atribuição de zelar pelo adequado desempenho da rede básica e das Demais Instalações de Transmissão (DIT).

O agente de transmissão, após a assinatura do contrato de concessão, tem prazo nele definido para a entrega do projeto básico à ANEEL, o qual deve ser elaborado com base no anexo técnico do edital de leilão e nos requisitos mínimos estabelecidos nos Procedimentos de Rede (7). A ANEEL encaminha o projeto básico do empreendimento de transmissão ao ONS, que o analisa e emite Parecer Técnico de Análise da Conformidade do Projeto Básico. Não tendo sido verificadas não conformidades, a ANEEL, baseada no mencionado parecer e em suas próprias análises, aprova a conformidade do projeto básico. Se tiverem sido constatadas não conformidades, a ANEEL encaminha ao agente de transmissão solicitação para adequação do projeto básico do empreendimento.

Desde sua criação, o ONS tem acompanhado a análise da conformidade do projeto básico em relação aos requisitos do anexo técnico de mais de trezentas linhas de transmissão.

2.3 Amostragem dos projetos básicos

Para a análise apresentada neste artigo, foram selecionados, dentre os leilões de transmissão da ANEEL mais recentes, 40 projetos básicos de linhas de transmissão com tensão nominal entre 230 kV e 500 kV, circuito simples ou duplo, totalizando 11.500 km de extensão. Desse universo, 28 projetos são de linhas de até 345 kV e 12 são de 440 kV ou 500 kV. Do nível de 500 kV, constam projetos de linhas convencionais e compactas.

2.4 Metodologia adotada antes da REN 398

Nos projetos básicos dos empreendimentos licitados até 2009, os anexos técnicos determinam que os níveis de campo elétrico e magnético sejam avaliados apenas no limite da faixa de segurança. Determinam ainda que o campo elétrico seja calculado para a tensão máxima operativa e que o campo magnético seja calculado para a corrente de curta duração da linha. Como a norma NBR 5422/1985, os anexos técnicos e o Submódulo 2.4 dos Procedimentos de Rede não determinam a altura dos cabos condutor e pararraios, ao longo do vão médio da linha, para a qual devem ser avaliados os campos elétrico e magnético, fica por conta da agente de transmissão a escolha desse parâmetro.

Nos projetos básicos avaliados, o cálculo dos campos elétrico e magnético é feito para a configuração de cabos da estrutura e vão típicos, posicionados no meio do vão. Na grande maioria dos casos, a altura da fase mais baixa corresponde à distância de segurança em condições normais de operação, para locais onde circulam máquinas agrícolas, calculada conforme item 10.3 da NBR 5422/1985 (8). As condições normais de operação correspondem ao regime de longa duração da linha conforme definido no Artigo 2º da REN 191/2005 (9). Esse foi o critério adotado nas avaliações feitas para este artigo. Em uma pequena quantidade de projetos básicos, a altura da fase mais baixa é igual à distância condutor-solo da catenária para a condição típica de operação (carga média).

2.5 Metodologia adotada segundo a REN 398

A REN 398, no seu Artigo 6º, diz que, nos cálculos dos campos, devem ser consideradas as seguintes premissas: tensão nominal; temperatura máxima admissível de projeto; carregamento máximo do condutor para os regimes de operação e emergência; distância mínima do condutor ao solo; configuração típica dos circuitos e sequência de fases associadas; e 1,5 m de altura do nível do solo.

Para as linhas de transmissão que compuseram o estudo, foram avaliados os campos elétrico e magnético no limite e no interior da faixa de segurança, considerando a silhueta da estrutura e vão típicos e demais condições estabelecidas na REN. Para a altura da fase mais baixa, adotou-se o maior valor dentre as duas distâncias condutor ao solo a seguir descritas: distância de segurança para locais onde circulam máquinas agrícolas em regime de emergência ou de curta duração; ou menor distância do condutor ao solo, no meio do vão, para o cabo condutor na temperatura de projeto correspondente à condição de curta duração. Na avaliação do campo elétrico, adotou-se a tensão nominal, enquanto na avaliação do campo magnético adotou-se a corrente de curta duração da linha, de acordo com as determinações da REN.

A Tabela 3 apresenta o valor médio da altura da fase mais baixa em relação ao solo por nível de tensão, para as linhas que compuseram o estudo. Para efeito de comparação, a tabela mostra os valores praticados antes e segundo a REN 398

Tabela 3 – Alturas condutor-solo por classe de tensão da linha

Tensão nominal da linha de transmissão (kV)	Média das alturas para o solo da fase mais baixa no meio do vão (m)	
	Antes da REN	Segundo a REN
230	7,5	7,2
345	8,6	8,0
440	9,5	8,9
500 ou 525 - convencional	9,8	9,2
500 ou 525 - compacta	9,5	9,1

3.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Linhas de transmissão

3.1.1 Campo magnético

Em todos os casos analisados, os níveis de campo magnético são inferiores aos níveis de referência estabelecidos na REN 398. Constata-se que o campo magnético no interior da faixa de segurança é inferior até mesmo ao limite estabelecido para público em geral.

3.1.2 Campo elétrico

A Tabela 4 sintetiza os valores de campo elétrico calculados no limite da faixa de segurança e máximos no interior desta, quando se aplicam os métodos descritos nos itens 2.4 e 2.5 no conjunto de linhas que compuseram o estudo. Para efeito de comparação, a tabela mostra também valores percentuais em relação ao nível de referência.

Tabela 4 – Valores de campo elétrico no limite e no interior da faixa por nível de tensão das linhas

Tensão nominal da linha de transmissão (kV)	Metodologia anterior à REN 398				Metodologia segundo a REN 398			
	Valor médio no limite da faixa		Valor médio do máximo no interior da faixa		Valor médio no limite da faixa		Valor médio do máximo no interior da faixa	
	(kV/m)	(%)	(kV/m)	(%)	(kV/m)	(%)	(kV/m)	(%)
230	0,6	15	4,6	55	0,6	15	5,0	60
345	0,6	15	7,1	85	0,6	15	7,5	90
440, 500 e 525 - convencional	1,2	30	11,7	140	1,0	25	12,5	150
500 e 525 - compacta	0,6	15	7,9	95	0,6	15	8,4	101

Com base nos resultados da Tabela 4, pode-se observar que, no limite da faixa de segurança em todos os níveis de tensão, há folga considerável nos valores de campo elétrico em relação ao nível de referência (de 15 a 30%) para o público em geral, independente da metodologia aplicada.

No interior da faixa de segurança, para os níveis de tensão de 440 kV a 525 kV convencional, há violação significativa do nível de referência para população ocupacional (no entorno de 150%), enquanto que, para linhas de 500 e 525 kV compactas, os valores são marginais ao nível de referência (no entorno de 100%).

3.2 Subestações

Nos projetos básicos que compuseram o presente estudo, não há avaliação de campos elétrico e magnético em subestações. Foi feita apenas uma avaliação expedita do campo elétrico para arranjos de barramento e altura típicos de subestações de 500 kV, considerando a modelagem de um vão de linha. O campo elétrico por nível de tensão de subestações é superior ao de linhas.

4.0 - CONCLUSÕES

Os valores de campo magnético produzidos por linhas de transmissão no interior e no limite da faixa de segurança são inferiores aos níveis de referência. Não se identificou nenhuma situação em que pudessem ser superiores e, portanto, a consideração de critérios relativos a campo magnético não gera impacto às linhas do sistema de transmissão. Tal constatação já era válida mesmo antes da publicação da REN 398.

Embora os projetos ainda não avaliem o campo em subestações, espera-se que a aplicação de critérios relativos a campo magnético não gere impacto às subestações do sistema de transmissão.

As conclusões relativas a campo elétrico dependem da classe de tensão, do tipo de instalação e do tipo de exposição. No caso de linhas de transmissão, o campo elétrico só poderia, a princípio, vir a representar um problema em instalações de tensão igual ou superior a 440 kV. Como a faixa de segurança de linhas de transmissão para esse nível de tensão é normalmente definida pelo critério de radiointerferência, o valor de campo elétrico no limite da faixa é sempre inferior ao nível de referência. O mesmo não se pode dizer do interior da faixa: para que o campo elétrico nessa região seja inferior ao nível de referência, a altura das estruturas de linhas de transmissão convencionais de 440 kV a 525 kV teria que ser aumentada no entorno de 2,8 m. Linhas de transmissão compactas de 500 ou 525 kV teriam que ser alteadas no entorno de 0,5 m. Para que tal solução não tenha que ser implementada de forma indiscriminada, há ainda o recurso da elaboração de simulação detalhada (relatório de conformidade). Até o momento, ainda não houve nenhum empreendimento que tenha lançado mão desse recurso. Não se pode afirmar que seja a solução para todo tipo de instalação.

Cabe ressaltar que o alteamento de linhas de transmissão é uma prática de difícil implementação.

O campo elétrico no ambiente interno a subestações é mais crítico que no meio da faixa de linhas de transmissão, devido, não só à maior concentração de barramentos, mas também a sua menor altura. Não se pode afirmar de antemão que apenas os níveis de 440, 500 e 525 kV possam vir a representar algum problema e deve-se estudar

caso a caso, para descartar a necessidade de alteamento. Da mesma forma, deve-se estudar o perímetro de cada subestação caso a caso, para descartar a necessidade de aumento da área útil da subestação. Da mesma forma que para linhas de transmissão, poderá ser necessária a elaboração de simulação detalhada (relatório de conformidade), de forma a verificar se as medidas corretivas citadas (alteamento e aumento da área) podem ser dispensadas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brasil, D.O.C., Jardini, J.A.; Vian, A., Fernandes, C.; "Investigação sobre os efeitos do campo eletrostático das linhas de 800 kV de Itaipu"; IV SNPTEE, Rio de Janeiro, 1977, Artigo RJ/GLT/37
- (2) Cigré Working Group 01 (Interference and Fields) of Study Committee 36 (Interference); "Electric and magnetic fields produced by transmission systems"; Brochure 21, 1980
- (3) ANEEL; Resolução Normativa N° 398; 23 de março de 2010
- (4) ANEEL; Resolução Normativa N° 413; 3 de novembro de 2010
- (5) ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)"; ICNIRP Guidelines, Manuscript accepted 17 November 1997
- (6) ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)"; ICNIRP Guidelines, Manuscript accepted 15 June 2010
- (7) ONS; Procedimentos de Rede, Módulo 2, Rev. 1.1; homologação pela ANEEL em 15 de setembro de 2010
- (8) ABNT; Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica – Procedimento; NBR 5422 de fevereiro de 1985
- (9) ANEEL; Resolução Normativa N° 191; 12 de dezembro de 2005

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Delmo de Macedo Correia é engenheiro eletricitista pela UFF em 1975, mestre em sistemas de potência pela UFPE em 1992 e doutor em eletrotécnica teórica pela Universidade Técnica de Hamburg em 1998. Membro do CIGRÉ e do IEEE, suas áreas de interesse são qualidade de energia e engenharia de equipamentos. Trabalhou em estudos de engenharia na IESA, Themag e projetos de P&D na UFPE na USP. Trabalha atualmente no ONS.



Carlos Campinho é engenheiro eletricitista formado pela UCP em 1985. Trabalhou como projetista de linhas de transmissão para empresas de consultoria e de construção de linhas de transmissão e como consultor para o PNUD dentro do Projeto de Eficiência Energética da Eletrobras. Trabalha atualmente no ONS em assuntos relacionados a linhas de transmissão.



Antônio Carlos C. de Carvalho é engenheiro formado em 1978 na UFRJ e mestre em sistemas de potência pela COPPE/UFRJ (1984). É membro do CIGRE e é especializado na interação equipamentos-rede. Trabalhou com P&D no CEPEL e em desenvolvimento de equipamentos na ABB. Atualmente ocupa a Gerência de Padrões de Desempenho e Requisitos mínimos da Rede Básica no ONS.