



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ÁREA: GESTÃO DA PRODUÇÃO
LINHA DE PESQUISA: ERGONOMIA, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE

ANDREZZA ARAÚJO RODRIGUES DA SILVA

**MODELAGEM HIERÁRQUICA DE REGRESSÃO NA ANÁLISE DE RADIAÇÃO
NÃO IONIZANTE DE EXTREMA BAIXA FREQUÊNCIA EM RESIDÊNCIAS
VERTICAIS**

JOÃO PESSOA – PB

2019

ANDREZZA ARAÚJO RODRIGUES DA SILVA

**MODELAGEM HIERÁRQUICA DE REGRESSÃO NA ANÁLISE DE RADIAÇÃO
NÃO IONIZANTE DE EXTREMA BAIXA FREQUÊNCIA EM RESIDÊNCIAS
VERTICAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Higiene e Segurança Ocupacional

Orientador: Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva

JOÃO PESSOA – PB

2019

S586m Silva, Andrezza Araujo Rodrigues da.

Modelagem hierárquica de regressão na análise de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em residências verticais / Andrezza Araujo Rodrigues da Silva. - João Pessoa, 2019.

171 f.

Orientação: Luiz Bueno da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Modelo Hierárquico de Regressão. 2. Campo Magnético de Extrema Baixa Frequência. 3. Estação de Transformadores Interna. I. da Silva, Luiz Bueno. II. Título.

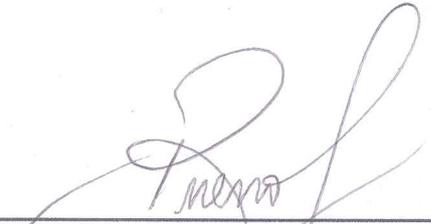
UFPB/BC

ANDREZZA ARAÚJO RODRIGUES DA SILVA

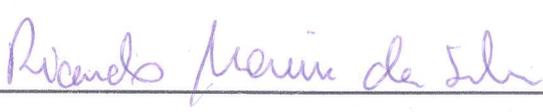
MODELAGEM HIERÁRQUICA DE REGRESSÃO NA ANÁLISE DE RADIAÇÃO
NÃO IONIZANTE DE EXTREMA BAIXA FREQUÊNCIA EM RESIDÊNCIAS
VERTICAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva
Universidade Federal da Paraíba
– Orientador –



Prof. Dr. Ricardo Moreira da Silva
Universidade Federal da Paraíba
– Examinador interno –

Prof. Dr. João Agnaldo do Nascimento (Departamento de Estatística – UFPB)
– Examinador externo –

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ser a minha fortaleza, lâmpada para os meus pés ao longo de toda a trajetória que trilhei até aqui. Agradeço a minha mãe, Francileide, pelo amor incondicional dedicado a mim durante os meus 25 anos de vida e por ser o meu maior exemplo de força, determinação e coragem. Sou imensamente grata ao meu noivo, Pedro, por ser o meu companheiro de vida, dedicando todo o seu cuidado e atenção para comigo todos os dias.

Sou grata ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, por ter me proporcionado o acesso a esta oportunidade de crescimento pessoal e profissional. Meus sinceros agradecimentos ao meu professor e orientador Luiz Bueno da Silva, por ter acreditado no meu potencial desde o dia em que o conheci, por todas as horas dedicadas a minha orientação durante os últimos dois anos e por me incentivar diariamente a ir cada vez mais longe.

Sinto profunda gratidão pela paciência, pelos valiosos ensinamentos em estatísticas e por ter oferecido um suporte ilimitado para o desenvolvimento desta dissertação a Erivaldo Lopes. Em especial, agradeço a minha amiga e grande parceira de trabalho, que contribuiu de forma crucial para o meu desenvolvimento acadêmico: Alinny Avelino. Sou grata a todos os amigos, membros, frequentadores e agregados do Laboratório de Análise do Trabalho, por contribuírem de forma direta ou indireta para o meu crescimento pessoal e profissional: Rodrigo Dias, Sonaly Lima, Ravenna Leite, Thainá Santiago, Nelí Rabello, Wilza Leite, Ruan Eduardo, Sawana Araújo, Girlene Alencar, Henrique Vilar, Roberta Santos, Felipe Tomé, Sosthemis Manaces, Thereza Cunha.

Gratidão a todos os professores, alunos, funcionários e demais colaboradores de diferentes universidades federais do Brasil e também aos colegas do professor Luiz Bueno da Silva que muito gentilmente, cederam o espaço e a convivência no interior de suas residências, para que fossem realizadas as medições de campo magnético de extrema baixa frequência e a mensuração das demais variáveis tratadas nesta dissertação.

‘Preste atenção,
Não abra mão dos próprios sonhos...
Não tem perdão, não...
Não deixe de sonhar,
Não deixe de sorrir,
Pois não vai encontrar
Quem vá sorrir por ti ...”

(Não Deixe de Sonhar - Chimarruts)

SILVA, A. A. R. da. **Modelagem hierárquica de regressão na análise de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em residências verticais**. 171 p. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.

RESUMO

Introdução: Campos eletromagnéticos sempre ocorreram na natureza, mas, nas últimas décadas, a exposição produzida por fontes artificiais aumentaram consideravelmente devido ao crescimento da demanda por energia elétrica. Os dispositivos eletroeletrônicos, no geral, embora emitam altos níveis de campos magnético, têm seu uso comumente restrito a curtos períodos de tempo. Por isso, é necessário levar em consideração outras importantes fontes emissoras de campo magnético de extrema baixa frequência (ELF MF), tais como as estações de transformadores internos de edificações verticais. **Objetivo:** Construir modelos hierárquicos de regressão para análise de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em edificações verticais. **Metodologia:** Foram avaliadas 37 ambientes de 17 apartamentos localizados em 14 edificações verticais, no interior dos quais foram realizadas medições de campo magnético na frequência de 60 Hz. Também foram mensuradas outras variáveis associadas ao ambiente, ao apartamento e a edificação. De posse desses dados, construiu-se modelos multiníveis de regressão envolvendo quatro níveis hierárquicos: “medições” de intensidade de ELF MF (1º nível), as quais são realizadas com auxílio de um dispositivo analisador de espectro magnético; no interior de “ambientes” da residência (2º nível), que podem ser do tipo quarto, cozinha, sala, sala-cozinha; os quais estão agrupados em “apartamentos” (3º nível); que constituem as unidades de edifícios (4º nível). **Resultados e Discussão:** (1) *Modelos com erros aleatórios em dois níveis hierárquicos*. Dentre os três modelos hierárquicos de regressão selecionados, contendo o termo de erro aleatório em dois níveis (nº 1, nº 2 e nº3 transformados), o modelo nº3, que apresenta erro aleatório nos níveis medições e ambiente foi o que apresentou o melhor ajuste para os critérios AIC e logaritmo da função de verossimilhança (logLik). Para esse modelo, independentemente das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,11 μT . Esse valor supera em 0,71 μT o valor de ELF MF de 0,4 μT , acima do qual Longyo *et al.* (2014) encontraram uma significativa associação estatística com

a leucemia infantil. (2) *Modelos com erros aleatórios em três níveis hierárquicos*. Para os mesmos critérios de ajuste, dentre os três modelos hierárquicos de regressão selecionados, contendo o termo de erro aleatório em três níveis (nº 4, nº 5 e nº6 transformados), o modelo nº5, que apresenta erro aleatório nos níveis medições, ambiente e apartamento, foi o que apresentou o melhor ajuste. Nesse modelo, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,1294 μ T. A variável adjacência remanescente no modelo indica que apartamentos adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores de ELF MF 39,10% maiores que apartamentos não adjacentes. Quanto aos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo, 78,04% são explicados pelo nível medições, 1,83% pelo nível ambiente e 20,13% pelo nível apartamento.

Conclusão: Comparando os modelos nº3 e nº5, com o modelo nº7 transformado (único modelo que obteve-se com erro nos quatro níveis hierárquicos), o modelo nº 5 foi o que apresentou o melhor ajuste. Esse modelo evidencia que 20,13% dos efeitos aleatórios deverem-se a fatores associados aos apartamentos que não estão sendo levados em consideração pelo modelo, demonstrando que os residentes de habitações dotadas de transformadores internos, por estarem constantemente expostos a campos magnéticos de extrema baixa frequência em níveis acima de 0,4 μ T, estão mais propensos a desenvolver efeitos negativos à saúde de curto e longo prazo.

Palavras-chave: Modelo Hierárquico de Regressão, Campo Magnético de Extrema Baixa Frequência, Estação de Transformadores Interna.

SILVA, A.A. R. da. **Hierarchical regression modeling in the analysis of extreme low frequency non-ionizing radiation in vertical residences**. 171 p. 2019. Dissertation (Master in Production Engineering) - Postgraduate Program in Production Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa - PB.

ABSTRACT

Introduction: Electromagnetic fields have occurred in nature since always, but in the last decades, exposure produced by artificial sources has increased considerably due to the growth in demand for electricity. Although electronic devices, in general, emit high levels of magnetic fields, they use to have their use restricted to short periods of time. Therefore, it is necessary to take into account other significant sources of extremely low-frequency magnetic field (ELF MF), such as the internal transformer stations, present in vertical buildings. **Objective:** To construct hierarchical regression models for analysis of extremely low frequency non-ionizing radiation in vertical edifications. **Methodology:** We evaluated 37 environments of 17 apartments located in 14 vertical buildings, in which intensity of magnetic field was measured at the frequency of 60 Hz. Other variables associated with the environment, the apartment and the building were also measured. From these data, multilevel regression models involving four hierarchical levels were constructed, which are: "measurements" of the intensity of ELF MF (1st level), which were performed with a magnetic spectrum analyzer device; in the rooms (2nd level), which can be of the type bedroom, kitchen, living room, living room-kitchen; which are grouped in "apartments" (3rd level); which constitute each building (4th level). **Results and Discussion:** (1) *Models with random errors at two hierarchical levels.* Among the three hierarchical regression models selected, containing the random error term in two levels ($n^{\circ} 1$, $n^{\circ} 2$ and $n^{\circ} 3$ transformed), the model $n^{\circ} 3$, which presents random error in the measurement and environment levels, had the best fit for the AIC and the logarithm of the likelihood function (logLik). For this model, regardless of the variables, the expected mean intensity of ELF MF at 60 Hz is $1.11 \mu\text{T}$. This value exceeds by $0.71 \mu\text{T}$ the value of ELF MF of $0.4 \mu\text{T}$, above which Longyo et al. (2014) found a significant statistical association with childhood leukemia. (2) *Models with random errors at three hierarchical levels.* For the same adjustment criteria, among the three hierarchical regression models selected, containing the random error term in three levels ($n^{\circ} 4$, n°

5 and n^o6 transformed), model n^o 5, which presents random error in the measurement, environment and apartment levels, had the best fit. In this model, regardless of the fixed effect of the variables, the expected mean intensity of ELF MF at 60 Hz is 1.1294 μ T. The remaining adjacency variable in the model indicates that apartments adjacent to internal transformers tend to have ELF MF values 39.10% larger than nonadjacent apartments. Regarding the random effects that are not explained by the model variables, 78.04% are explained by the performed measurements, 1.83% by the ambient level and 20.13% by the apartment level. **Conclusion:** Model n^o 5 presented the best fit when comparing the selected models n^o 3 and n^o 5 transformed according to the AIC and logLik, with the model n^o 7 transformed (the only one that was obtained with error in the four hierarchical levels). This model shows that 20.13% of the random effects are due to factors associated with apartments that are not being taken into account by the model, demonstrating that residents of dwellings with internal transformers stations are constantly exposed to levels of extremely low frequency magnetic fields above 0.4 μ T. Therefore, they are more likely to develop short- and long-term negative health effects.

Keywords: Hierarchical Regression Model, Extremely Low Frequency Magnetic Field, Internal Transformer Station.

LISTA DE ABREVIATURAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALS	Esclerose lateral amiotrófica (<i>Amyotrophic Lateral Sclerosis</i>)
AM	Modulação em Amplitude (<i>Amplitude Modulation</i>)
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DNA	Ácido Desoxirribonucléico
EHC	Critérios de saúde ambiental (<i>Environmental Health Criteria</i>)
ELF EMF	Campos Eletromagnéticos de Extrema Baixa Frequência (<i>Extremely Low Frequency Eletromagnetic Fields</i>)
ELF MF	Campos Magnéticos de Extrema Baixa Frequência (<i>Extremely Low Frequency Eletromagnetic Fields</i>)
EMF	Campos eletromagnéticos (<i>Eletromagnetic Fields</i>)
FINJEM	Matriz finlandesa de exposição profissional
FNDCT	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FM	Modulação em Frequência (<i>Frequency Modulation</i>)
FUNTEL	Fundo para Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações
IARC	Agência Internacional de Pesquisa em Câncer
ICNIRP	Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>)
INIRC	Comissão Internacional de Radiação Não Ionizante (<i>International Non-Ionizing Radiation Commission</i>)
IR	Radiação Ionizante (<i>Ionizing Radiation</i>)
IRPA	Associação Internacional de Proteção contra Radiação (<i>International Radiation Protection Association</i>)
IT	Estação de transformadores interna (<i>internal transformer station</i>)
LNH	Linfoma não-Hodgkin
MRI	Exames de Ressonância Magnética (<i>Magnetic Resonance Imaging</i>)
MW	Micro-ondas (<i>Microwaves</i>)
NR	Norma Regulamentadora
OIT	Organização Internacional do Trabalho

OMS	A Organização Mundial da Saúde
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPRA	Programa de Prevenção de Risco Ambientais
RNI	Radiação Não Ionizante (<i>Non-Ionizing Radiation</i>)
RF	Radiofrequência
SNC	Sistema Nervoso Central
UIT	União Internacional das Telecomunicações
UV	Ultra-violeta
VHF	Frequência Muito Alta (<i>Very High Frequency</i>)
UHV	Frequência Ultra Alta (<i>Ultra High Frequency</i>)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro eletromagnético.....	32
Figura 2 - Medidor de campo eletromagnético de baixa frequência Aaronia SPECTRAN NF-5035.....	34
Figura 3 – Esquema de um sistema de distribuição de energia elétrica.	56
Figura 4 – Vista de cima da residência localizada no bairro de Cabro Branco, em João Pessoa.	70
Figura 5 – Vista frontal da residência nº3 localizada no bairro de Manaíra, em João Pessoa.....	71
Figura 6 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis.....	75
Figura 7 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis.	75
Figura 8 – Residências verticais localizadas em bairros da cidade de João Pessoa (PB); (a) Bairro dos Estados; (b) Bancários; (c) Cabo Branco; (d) Intermares; (e) Jardim Luna; (f) Manaíra (nº1); (g) Manaíra (nº2); (h) Manaíra (nº3); (i) Tambaú. ...	81
Figura 9 – Residências verticais localizadas Brasília (DF); (a) Águas Claras (nº1) e Águas Claras (nº2); (b) Águas Claras (nº3).....	82
Figura 10 – Residência vertical localizadas Manaus (AM).....	82
Figura 11 – Residências verticais localizadas em bairros da cidade de Teresina (PI); (a) Horto; (b) Ininga.....	83
Figura 12 – Histograma dos resíduos do modelo nº1.	88
Figura 13 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº1.....	88
Figura 14 – Histograma dos resíduos do modelo nº1 transformado.	89
Figura 15 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo 1 transformado.	90
Figura 16 – Histograma dos resíduos do modelo nº 2.	96
Figura 17 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2.....	96
Figura 18 – Histograma dos resíduos do modelo nº 2 transformado.	97
Figura 19 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2 transformado. ...	98
Figura 20 – Histograma dos resíduos do modelo nº 3.	103
Figura 21 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2.....	104
Figura 22 – Histograma dos resíduos do modelo 2 transformado.....	105
Figura 23 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo 2 transformado.	105

Figura 24 – Histograma dos resíduos do modelo nº 4.	111
Figura 25 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 4.	112
Figura 26 – Histograma dos resíduos do modelo nº4 transformado.	113
Figura 27 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº4 transformado. ..	113
Figura 28 – Histograma dos resíduos do modelo nº 5.	119
Figura 29 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 5.	120
Figura 30 – Histograma dos resíduos do modelo nº 5 transformado.	121
Figura 31 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº5 transformado. ..	121
Figura 32 – Histograma dos resíduos do modelo nº 6.	127
Figura 33 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 6.	127
Figura 34 – Histograma dos resíduos do modelo nº 6 transformado.	128
Figura 35 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº6 transformado. ..	129
Figura 36 – Histograma dos resíduos do modelo nº 7.	137
Figura 37 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 7.	137
Figura 38 – Histograma dos resíduos do modelo nº 7 transformado.	138
Figura 39 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº7 transformado. ..	139
Figura 40 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de dois níveis.	164
Figura 41 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de dois níveis.	164
Figura 42 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de três níveis.	166
Figura 43 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de três níveis.	167
Figura 44 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis com variável no primeiro nível.	170
Figura 45 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis com variável no primeiro nível.	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aplicação de modelos hierárquicos em estudos recentes e de diferentes áreas.....	27
Quadro 2 – Variáveis do estudo.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das residências avaliadas.....	84
Tabela 2 – Médias das alturas e das distâncias para cada uma das edificações avaliadas.....	86
Tabela 3 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e edifício.	91
Tabela 4 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e edifício.	93
Tabela 5 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e apartamento.....	94
Tabela 6 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e apartamento.....	99
Tabela 7 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e apartamento.....	100
Tabela 8 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e ambiente.....	102
Tabela 9 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e ambiente.....	106
Tabela 10 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e ambiente.....	107
Tabela 11 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois níveis.....	109
Tabela 12 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, apartamento e edifício.	111
Tabela 13 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, apartamento e edifício.	114
Tabela 14 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, apartamento e edifício.	116
Tabela 15 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento.....	118
Tabela 16 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento selecionado nº5.....	119
Tabela 17 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento.....	122

Tabela 18 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente e apartamento.	123
Tabela 19 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício.	126
Tabela 20 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício nº6 selecionado.	126
Tabela 21 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício.	129
Tabela 22 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente e edifício...	131
Tabela 23 – Coeficientes de correlação intraclasse para os níveis contendo erros aleatórios dos modelos nº4, nº5 e nº 6 transformados.	132
Tabela 24 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois níveis.....	134
Tabela 25 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erro aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.	135
Tabela 26 – Parâmetros fixos do modelo final de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.....	136
Tabela 27 – Intercepto do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.....	139
Tabela 28 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.	140
Tabela 29 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois, três e quatro níveis.	142

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	19
1.1 Tema e problemática de pesquisa	19
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.2 Objetivos Específicos	23
1.3 Justificativa	23
1.4 Delimitação do tema	28
1.5 Estrutura da dissertação	29
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 Radiação não-ionizante de extrema baixa frequência	32
2.1.2 Dispositivo analisador de espectro eletromagnético	34
2.2 Efeitos da exposição à radiação não-ionizante de baixa frequência	35
2.2.1 Efeitos a curto prazo	36
2.2.2 Efeitos a longo prazo	37
2.2.2.1 Devido à exposição ocupacional	40
2.2.3 Normas e padrões internacionais	41
2.2.4 Normas e padrões nacionais	44
2.2.5 Limites propostos na literatura	46
2.3 Níveis de radiação não-ionizante de extrema baixa frequência	48
2.3.1 Fatores inerentes ao nível ambiente	48
2.3.1.1 Equipamentos eletroeletrônicos	48
2.3.1.1.1 Telefones celulares	49
2.3.1.1.2 Computadores portáteis	51
2.3.2 Fatores inerentes ao nível apartamento	52
2.3.2.1 Presença e distância de transformadores internos	52
2.3.2.2 Presença e distância de fios e cabos de alta tensão da rede elétrica	55
2.3.2.3 Altura do apartamento em relação ao nível da via urbana	58
2.3.3 Fatores inerentes ao nível edifício	59
2.3.3.1 Densidade de construções	60
2.3.3.2 Presença de edifícios multipavimentos	60
2.3.3.3 Distância média das construções adjacentes	61

2.3.3.3.1 Fator de visão do céu	62
2.4 Aplicações dos modelos de regressão hierárquica	63
2.5 Considerações Finais	64
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	66
3.1 Classificação da pesquisa.....	66
3.2 Procedimentos metodológicos	66
3.3 Primeira etapa: coleta de dados.....	67
3.3.1 Níveis de campo magnético de extrema baixa frequência	68
3.3.2 Variáveis associadas aos ambientes	68
3.3.3 Variáveis associadas aos apartamentos	69
3.3.4 Variáveis associadas às edificações.....	69
3.4 Segunda etapa: tratamento de dados	71
3.4.1 Modelagem matemática de regressão hierárquica.....	72
3.4.2 Construção dos modelos multiníveis.....	76
3.4.3 Seleção das variáveis dos modelos multiníveis	78
3.4.4 Variação da ELF MF a 60 Hz atribuída aos níveis hierárquicos e correlação intraclasse	79
3.4.5 Qualidade do ajuste de modelos hierárquicos	80
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.1 Modelos hierárquicos de regressão com efeitos aleatórios apenas no intercepto.....	86
4.1.1 Modelos hierárquicos com erros aleatórios em dois níveis hierárquicos ...	87
Níveis medição e edifício.....	87
Níveis medição e apartamento	94
Níveis medição e ambiente	101
Qualidade do ajuste dos modelos n ^o 1, n ^o 2 e n ^o 3 transformados	108
4.1.2 Modelos hierárquicos com erros aleatórios em três níveis hierárquicos..	109
Qualidade do ajuste dos modelos n ^o 4, n ^o 5 e n ^o 6 transformados	133
4.1.3 Modelos hierárquicos com efeitos aleatórios em quatro níveis hierárquicos	135
4.1.4 Modelos selecionados	141
4.2 Modelos hierárquicos de regressão com efeitos aleatórios nas variáveis	145
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	146
5.1 Considerações finais.....	146

5.2 Limitações e sugestões para estudos futuros	149
REFERÊNCIAS	151
ANEXOS	163
Anexo 01 - Modelo hierárquico de regressão de dois níveis	163
Anexo 02 - Modelo hierárquico de regressão de três níveis.....	165
Anexo 03 - Modelo hierárquico de regressão de quatro níveis contendo uma variável explicativa no primeiro nível.....	168

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o conteúdo que compõe a pesquisa, abordando aspectos relativos à definição e delimitação do tema, problemática e questão de pesquisa, assim como a justificativa, objetivos, e também um panorama global dos capítulos subsequentes.

1.1 Tema e problemática de pesquisa

Campos eletromagnéticos ocorrem na natureza e sempre estiveram presentes na Terra. Dentre as radiações naturais podem ser identificadas: as explosões e os ruídos solares (extraterrestres); e as descargas atmosféricas e eletrostáticas (terrestres).

Entretanto, nas últimas décadas, a exposição ambiental a fontes de campos eletromagnéticos artificiais, ou seja, às radiações criadas pelo homem, aumentaram consideravelmente devido à demanda por energia elétrica, tecnologias sem fio – em permanente evolução tecnológica – e mudanças em práticas profissionais e comportamentos sociais. Algumas fontes artificiais fixas podem ser mencionadas, como as que emitem ondas de rádio (AM e FM) e televisão (UHV/VHF), linhas de transmissão de eletricidade de alta tensão, transformadores, geradores, subestações de transformadores. As fontes móveis incluem telefones celulares, equipamentos de informática, lâmpadas, máquinas industriais, eletrodomésticos variados (geladeiras, forno micro-ondas, aparelhos de climatização, computadores, notebooks, videogames, fogões, cafeteiras, sanduicheiras, dentre outros). De modo que todos estão expostos a uma mistura complexa de campos elétricos e magnéticos tanto nos ambientes residenciais quanto laborais (OMS, 2002; PADILHA, 2011).

A depender dos efeitos que provoca no organismo humano, a radiação eletromagnética pode ser classificada em radiações ionizantes e radiações não-ionizantes (de baixa ou extrema baixa frequência). As radiações ionizantes (do inglês, *ionizing radiation* – IR) são capazes de danificar direta ou indiretamente o DNA dos tecidos, uma vez possuem energia suficiente para extrair elétrons de átomos ou moléculas. Já as radiações não-ionizantes (do inglês, *non-ionizing radiation* - RNI) não

possuem energia suficiente para realizar ionização, mas podem ser capazes de promover a quebra de moléculas e de ligações químicas (CALVENTE *et al.*, 2010).

Campos magnéticos de extrema baixa frequência (ELF EMF) consistem na radiação eletromagnética (do inglês, *extremely low frequency electromagnetic field* - ELF EMF) cuja frequência é abaixo de 300 Hz (BRODIĆ, 2015).

Estudos que investigam a exposição humana à radiação não-ionizante reconhecem a ocorrência de alguns sintomas aos indivíduos em contato com as fontes geradoras, como a hipersensibilidade eletromagnética (GENIUS; LIPP, 2012; HAGSTRÖM; AURANEN; EKMAN, 2013; JOHANSSON, 2006). A Organização Mundial da Saúde (2007) descreve como formas de manifestação da hipersensibilidade eletromagnética sintomas dermatológicos, neurastênicos e vegetativos. Alguns sintomas de hipersensibilidade eletromagnética estão vinculados à falta de ar, arritmia, fadiga, às náuseas, a problemas de memória e concentração; à cefaleia, visão turva, a dores nos membros, à rigidez muscular e às sensações de queimação (BRODIĆ, 2015).

É comum várias edificações residenciais verticais possuírem grupos de transformadores internos, o que aumenta potencialmente a exposição aos campos eletromagnéticos dos residentes das habitações adjacentes a estes transformadores (KANDEL *et al.*, 2013). Uma vez que as crianças são mais vulneráveis do que os adultos ao meio, mas é nos ambientes residenciais que elas passam cerca de 90% do tempo (VALENZUELA, 2011). Ao longo das últimas duas décadas a exposição residencial a campos magnéticos de baixa frequência tem sido associada ao desenvolvimento de leucemia infantil, em consistentes estudos epidemiológicos, embora a sua causalidade seja questionável devido à possibilidade de uso de viés de seleção (AHLBOM *et al.*, 2000; CALVENTE *et al.*, 2010; SAGE, 2012; ZARYABOVA, 2013; GRELLIER; RAVAZZANI; CARDIS, 2014).

Ahlbom *et al.* (2000) constataram que 99,2% das crianças residentes em domicílios com níveis de exposição a ELF EMF inferior à 0,4 μ T apresentaram estimativas compatíveis com nenhum risco aumentado, enquanto que o percentual restante (0,8%) das crianças com exposições a ELF EMF acima de 0,4 μ T tiveram um aumento de 2 vezes no risco relativo estimado de desenvolver leucemia. Em virtude dos valores obtidos, os autores ressaltam que é improvável que esse aumento seja

devido à variabilidade aleatória, uma vez que os resultados não mudaram após o ajuste para os potenciais fatores de confusão.

Na realidade, existem mais evidências de que campos elétricos e magnéticos são capazes de produzir efeitos adversos à saúde do que evidências que sugerem que o tabagismo passivo é prejudicial. Contudo, as diretrizes de exposição aos campos elétrico e magnético permanecem extremamente altas. A Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (do inglês, *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection - ICNIRP*) fixa em 100 μT o valor de referência limite de exposição do público em geral à RNI, na frequência de 50 Hz. Esse limite supera em 250 vezes o nível acima do qual foi observada uma duplicação do risco de leucemia infantil (HENSHAW, 2002).

Isso deve-se ao fato de que, apesar de terem se fundamentado em uma ampla revisão da literatura científica publicada, realizada por Allen *et al.* (1991) e OMS (1984,1987, 1993), as diretrizes da ICNIRP (1998) baseia-se apenas em efeitos imediatos e a curto prazo da exposição a campos eletromagnéticos, tais como a estimulação de músculos periféricos, choques provocados pelo toque direto de objetos condutores e a elevação da temperatura de tecidos. Os potenciais efeitos a longo prazo da exposição, como o risco de desenvolver câncer, não foram levados em consideração pela ICNIRP (1998), que considerou os dados disponíveis insuficientes para fornecer uma base para estabelecer restrições de exposição.

Desse modo, os valores limites estabelecidos pela ICNIRP (1998) para a exposição do público a campos magnéticos na faixa de frequência de até 300 Hz são considerados elevados, embora esta Comissão reconheça em seu documento de regulamentação que a pesquisa científica epidemiológica tem fornecido evidências sugestivas, embora pouco convincentes, da existência de uma associação entre possíveis efeitos carcinogênicos e a exposição a níveis de ELF EMF bem abaixo dos limites de exposição definidos em sua norma para a faixa de frequência de 50 a 60 Hz.

Em 2002, o IARC (Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer), instituto de pesquisa de câncer da OMS, avaliou os campos magnéticos de baixa frequência e os classificou na categoria 2 B, o que se traduz em "possivelmente carcinogênico para os seres humanos" (ICNIRP, 2010), tendo tomado como base para esta classificação

evidências de estudos epidemiológicos sobre leucemia infantil, como os desenvolvidos por Ahlbom *et al.* (2000) e Greenland *et al.* (2000).

Em 2010, a ICNIRP reafirmou que a evidência científica existente até o momento do tocante à relação entre a exposição prolongada a campos magnéticos de baixa frequência e o risco aumentado de leucemia infantil é muito fraca para ser tomada como base para modificar as diretrizes de exposição. Enfatizou, ainda, que se o relacionamento não é causal, então não há benefícios para a saúde gerados pela redução na exposição (ICNIRP, 2010).

Mesmo com a existência de divergências com relação aos níveis permissíveis de exposição dos indivíduos, observa-se que há diversos equipamentos e dispositivos no interior ambiente doméstico que podem levar ao aumento dos níveis de radiação não-ionizante aos quais seus habitantes estão expostos. Além destes dispositivos, há os transformadores adjacentes às residências que contribuem para o aumento da radiação, bem como as condições do entorno desses edifícios, haja vista o crescimento urbano verticalizado observado sobretudo nas capitais brasileiras.

Diante disso, tem sido desenvolvidos estudos voltados para a avaliação dos níveis de intensidade de ELF EMF no interior de ambientes domésticos (ILONEN *et al.*, 2008; HAREUVENY *et al.*, 2011; HUSS *et al.*, 2013; KANDEL *et al.*, 2013), sendo o método TransExpo a metodologia utilizada na maioria deles; para o mapeamento do campo magnético (KANDEL *et al.*, 2013; PAVLÍK *et al.*, 2017), utilizando equipamentos analisadores de espectro eletromagnético; para a avaliação dos possíveis efeitos adversos causados pela exposição à radiação não ionizante, a longo prazo, ao ambiente (LAZAR *et al.*, 2011; YEGOROV *et al.*, 2010) e à saúde dos indivíduos (LLAURADO, 1990; ALLEN *et al.*, 1991; SAHL; KELSH; FLODERUS *et al.*, 1993; GREENLAND, 1993; THERIAULT *et al.*, 1994; SAVITZ; LOOMIS, 1995; SAVITZ; CHECKOWAY; LOOMIS, 1998; AHLBOM *et al.*, 2000; SORAHAN, *et al.*, 2001; HARRINGTON, J. M. *et al.*, 2001; HENSAW, 2002; DRAPER, 2005; JOHANSEN *et al.*, 2007; KHEIFETS, L. *et al.*, 2009; CALVENTE *et al.*, 2010; BALBANI; KRAWCZYK, 2011; CÂMARA, 2014), sendo notável o elevado número de estudos de cunho epidemiológico desenvolvidos. Apesar disso, esses artigos não analisam quanto da sua variação da radiação não ionizante de extrema baixa frequência pode ser atribuída a características do ambiente, do apartamento e da

edificação nas quais residem os indivíduos expostos, gerando uma lacuna nesse aspecto.

Verifica-se que a problemática abordada nessa dissertação se enquadra no nível da Ergonomia, da segurança e da saúde ocupacional, formalizada na seguinte questão: Os modelos hierárquicos de regressão construídos são capazes de descrever o comportamento da radiação não ionizante de extrema baixa frequência nas residências verticais?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Construir modelos hierárquicos de regressão para análise de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em edificações verticais.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar modelos hierárquicos de regressão contendo os termos de erros aleatórios em dois ou mais níveis;
2. Avaliar qual a contribuição das características dos níveis medições, ambiente, apartamento e edifício para a elevação dos níveis de campo magnético de extrema baixa frequência verificados no interior de residências verticais;
3. Comparar os modelos selecionados, destacando os que apresentaram melhor qualidade de ajuste.

1.3 Justificativa

Os possíveis efeitos da exposição a fontes emissoras de radiação não ionizante de baixa frequência nos ambientes residenciais e os potenciais riscos para a saúde tem suscitados várias investigações (SAGE, 2012). Estudos epidemiológicos relatam alguns efeitos da exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência, como: alterações na função da membrana celular, no metabolismo e na comunicação celular (LAI, 2007); interferências na proliferação celular e a ativação de proto-oncogenes, a

liberação de proteínas de stress ou proteínas de choque térmico (LIN *et al.*, 1997; BLANK, 2007; BLANK e GOODMAN, 2004; TOKALOV e GUTZEIT, 2004); a redução ou supressão da função imune normal, a perturbação hormonal, a ocorrência de reações alérgicas e inflamatórias e eventual hipersensibilidade do indivíduo a futuras exposições (JOHANSSON 2006, 2007, 2009).

Uma série de efeitos da exposição à RNI sobre o sistema nervoso central também foram documentados, sobretudo alterações na função neurológica e cerebral que incluem: distúrbios do sono, desorientação espacial, perda de memória, atraso na aprendizagem e comprometimento da função cognitiva, perda de concentração e funções de atenção, disfunção motora e comprometimento do desempenho e frequência aumentada de dor de cabeça e fadiga (LAI, 2007).

Com o crescimento da preocupação com a exposição cotidiana dos indivíduos à radiação não ionizante de extrema baixa frequência, diversos trabalhos publicados tem buscado estabelecer uma conexão direta entre essa exposição e o desenvolvimento de doenças e distúrbios, como mal de Parkinson (KHEIFETS *et al.*, 2009), depressão (HENSHAW, 2002), alterações no fluxo sanguíneo cutâneo (MOFRECOLA; MOFFA; PROCACCINI., 2003), esclerose lateral amiotrófica (HUSS; PETERS; VERMEULEN, 2018); e alguns tipos de câncer, dentre eles a leucemia infantil (FLODERUS *et al.*, 1993; MILLER *et al.*, 1996; AHLBOM *et al.*, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; CALVENTE, 2010; ELWOOD, 2017; GRELLIER; RAVAZZANI; CARDIS, 2014), o glioma (KARIPIDIS *et al.*, 2007b), o linfoma não-Hodgkin (KARIPIDIS *et al.*, 2007a), tumor cerebral (KHEIFETS *et al.*, 2010; ORABY *et al.*, 2018) o câncer de mama (LIBURDY *et al.*, 1993; LONDON *et al.*, 2003; MILHAM, 2004; WEST *et al.*, 2013).

Por isso, o conhecimento científico a respeito dos potenciais efeitos adversos sobre a saúde devido à presença de campos eletromagnéticos é substancial e baseado num grande número de estudos epidemiológicos, em animais e in vitro. Muitos resultados voltados para a saúde, desde imperfeições reprodutivas a doenças cardiovasculares e neurodegenerativas foram examinados, mas a evidência mais consistente até a atualidade refere-se à leucemia infantil (OMS, 2002).

Segundo Elwood (2017), a leucemia em crianças é mais evidente pela exposição num período mais intenso a campos magnéticos de intensidade acima de 0,3 ou 0,4 μT , que são produzidos por sistemas de energia elétrica doméstica. Segundo o

mesmo autor, a leucemia é uma doença complexa com muitos subtipos de diferentes etiologias, que pode estar vinculada a exposições genéticas, nutricionais e ambientais. Assim, é de fundamental importância investigar de maneira mais profunda a relação entre tais exposições, em particular as ambientais, e a leucemia em crianças.

Estudos de autores de diferentes países associam a presença de estações internas de transformadores em edificações verticais à elevação dos níveis de campo magnético de extrema baixa frequência aos quais estão expostas as pessoas que nelas habitam (ILONEN *et al.*, 2008; HAREUVENY *et al.*, 2011; HUSS *et al.*, 2013; KANDEL *et al.*, 2013).

Outros autores analisam o impacto de equipamentos e dispositivos elétricos que constituem fontes de campos magnéticos de extrema baixa frequência cujo alcance é restrito a algumas áreas circunvizinhas, como: computadores, televisores, celulares, notebooks, geladeiras, fornos, fogões, fornos de micro-ondas, sistemas de conexão wireless, notebooks, computadores, sistemas de climatização, impressoras, receptores de sinal, modems, cafeteiras, sanduicheiras, churrasqueiras elétricas, chuveiros elétricos, etc. (BALBANI e KRAWCZYK, 2011; BRODIĆ, 2015; BRODIĆ e AMELIO, 2015; CÂMARA, 2014; DRAPER *et al.*, 2005; KHEIFETS *et al.*, 2009; MOFRECOLA; MOFFA; PROCACCINI, 2003; STRUCHEN *et al.*, 2015; VIJAYALAXMI *et al.*, 2014).

Tomitsch, Dechant e Frank (2009) destacaram que poucos estudos que incluam medidas de campos eletromagnéticos de baixa frequência haviam sido publicados até o ano de 2009, embora tenham o potencial de fornecer uma contribuição valiosa para esta área de pesquisa.

A OMS (2002) alerta que os riscos potenciais da exposição aos campos eletromagnéticos representam um difícil conjunto de desafios, que incluem: determinar se existe ameaça na exposição aos campos eletromagnéticos e qual o impacto potencial sobre a saúde, isto é, promover uma avaliação de risco; reconhecer as razões que levam à preocupação por parte do público, ou seja, a percepção de risco; e implementar políticas que protejam a saúde pública e respondam às preocupações do público, em outras palavras, gerência de risco.

O debate atual tem focado na avaliação da exposição durante longos períodos a níveis abaixo dos limites de exposição, para constatar se ela é capaz de causar efeitos adversos à saúde dos indivíduos. Ao tratar da radiação não ionizante de

extrema baixa frequência, o foco da literatura nos últimos anos tem sido a investigação de uma possível associação entre a exposição e o desenvolvimento de distúrbios, em estudos de natureza epidemiológica.

Tomando como parâmetro as pesquisas internacionais e, também, levando-se em consideração a hipótese de inadequação dos limites de exposição a ELF EMF estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP, 2010), levantada por autores da literatura (AHLBOM *et al.*, 2000; GREENLAND *et al.* 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; MOFRECOLA; MOFFA; PROCACCINI., 2003; LONGYU *et al.*, 2014; SCHUZ; ERDMANN, 2016), destaca-se a necessidade de analisar os níveis de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em residências verticais, relacionando a sua variação a aspectos internos e externos às residências.

Nesse contexto, a construção de modelos hierárquicos de regressão para análise de radiação não ionizante de extrema baixa frequência em edificações verticais permite compreender quanto da sua variação pode ser atribuída às características do ambiente, do apartamento e da edificação.

Esse tipo de modelagem matemática hierarquizada permite estudar tanto a participação de fatores relacionados ao ambiente interno da residência para a elevação da intensidade de ELF EMF quanto da configuração do meio urbano onde está inserido o ambiente.

Como definição geral, é possível afirmar que um modelo hierárquico consiste numa sequência de expressões matemáticas relacionadas e ordenadas por sua estrutura de probabilidade condicional. Na prática, isso significa que modelos multiníveis são dotados de um ou mais níveis “intermediários” (KÉRY; ROYLE, 2016). Enquanto nos modelos lineares clássicos, o intercepto e o coeficiente de inclinação são apenas parâmetros fixos, para o modelo multinível o intercepto e o coeficiente de inclinação são considerados parâmetros aleatórios, dependentes da influência do nível hierárquico mais alto (GOLDSTEIN, 1995; BRYK; RAUDENBUSH, 1992).

Portanto, os modelos multinível representam uma generalização dos métodos de regressão, podendo ser usados para diversas aplicações, dentre elas a inferência causal a partir de experimentos e estudos observacionais. Esse fato aliado a capacidade desse tipo de modelo de atender a propósitos tanto comuns quanto específicos de cada observação em estudo (FÁVERO *et al.*, 2009), fez com que

emergissem contribuições recentes e significativas provenientes de diversas áreas de conhecimento (Quadro 1).

Quadro 1 – Aplicação de modelos hierárquicos em estudos recentes e de diferentes áreas.

Área	Descrição do estudo
Estudo de sistemas ambientais e ecológicos	Utilizando um modelo hierárquico linear, Miller <i>et al.</i> (2018) identificaram que as principais fontes de estresse de bacias hidrográficas relacionadas à presença de espécies em 33 estuários no Golfo do México, estudados durante 19 anos, são o uso total das terras, o uso das terras agrícolas e o montante de agrotóxicos liberados nas bacias, bem como a agricultura praticada no litoral.
Efeito de fatores individuais e ambientais na saúde de indivíduos	Para investigar os fatores que influenciam na saúde das pessoas na China, Zhang, Jin e Zhu (2018) construíram três modelos de regressão multinível contendo três níveis cada: indivíduo (nível 1), família (nível 2) e comunidade (nível 3). Com isso, verificaram que existe diferença significativa entre o estado de saúde dos indivíduos, o qual deve-se 16% ao nível família e 9,11% ao nível comunidade.
Eficiência material e energética de sistemas de manufatura	Alvadi <i>et al.</i> (2015) propuseram uma estrutura hierárquica para modelar fluxos de energia e materiais dentro de sistemas de manufatura em quatro níveis: componente (1º nível), processo unitário (2º nível), cadeia de processo (3º nível) e fábrica (4º nível). Através de uma simulação numa indústria de reciclagem de alumínio e chapas laminadas, verificaram que a economia de energia é significativa. Somente no nível do componente há 80% redução de energia, traduzindo-se numa redução de 11% em todo o consumo de energia da fábrica.
Projeto de processos otimizados de fabricação de fibras	Gao, Lu e Xu (2018). Propuseram um modelo hierárquico para entender o desempenho mecânico de fibras de nanotubos de carbono com três níveis: nanotubos de carbono individuais (nível 1), feixes de nanotubos compactos (nível 2) e a fibra ou montagem dos feixes (nível 3). Aplicando dados experimentais, os autores constataram que o modelo não só quantifica a quebra da resistência do material nos três níveis (nanotubo, feixe e fibra), como também fornece suporte prático para otimizar os processos de fabricação para desempenho mecânico elevado.
Controle de sistemas lineares	Koeln e Alleyne (2018) apresentam uma estrutura hierárquica genérica de N níveis para controlar um sistema linear de subsistemas acoplados dinamicamente. Os autores destacam que o sistema é decomposto em múltiplos subsistemas para reduzir o custo computacional de

controladores de baixo nível e que a formulação dos controladores em cada nível é fornecida juntamente com as restrições e as informações necessárias para alcançar a sua coordenação.

Uma das contribuições dessa dissertação está na condução de um estudo dos níveis de campos magnéticos de extrema baixa frequência em ambientes domésticos, considerando as fontes que contribuem para sua elevação de uma perspectiva macro (fatores associados à edificação e à morfologia urbana) e micro (fatores ligados aos ambientes internos aos apartamentos), não se limitando ao fato de que a maioria dos estudos existentes investigam essas fontes sob uma única perspectiva.

Os modelos construídos nessa dissertação possuem o diferencial de evidenciar que a intensidade de ELF EMF depende de aspectos inerentes a sua medição, aos ambientes das residências, aos apartamentos nos quais indivíduos residem e à edificação vertical na qual se localizam, a qual sofre a influência do entorno devido à morfologia urbana.

Além disso, tendo em vista a complexidade dos campos magnéticos de baixa frequência, os modelos hierárquicos de regressão utilizados são capazes de evidenciar os efeitos desiguais que fontes emissoras fixas e móveis podem apresentar na sua constituição.

Adicionalmente, essa dissertação fornece suporte empírico para instituições responsáveis pela elaboração de normativas referente à radiação não ionizante, órgãos formuladores de políticas públicas relativas ao ambiente construído e à ocupação do espaço urbano, bem como às empresas fornecedoras de energia elétrica.

1.4 Delimitação do tema

Esta pesquisa está delimitada em analisar a intensidade de campo magnético de extrema baixa frequência ao qual as pessoas que habitam residências verticais estão submetidas. Para isso, identifica e reúne em modelos de regressão hierárquica as variáveis que podem estar associadas ao ambiente interno e externo das habitações consideradas no estudo, contribuindo para a elevação dos níveis de campo magnético de extrema baixa frequência em seu interior.

Nesse sentido, quanto às residências, este estudo restringe-se, exclusivamente, aos indivíduos que residem em edifícios multipavimentos, notadamente as habitações dotadas de estações internas de transformadores. Quanto à localização das edificações, está limitada a cidades das regiões Centro Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, em sua maioria capitais.

É válido ressaltar que esta pesquisa se delimita ao estudo da exposição das pessoas a níveis de campo magnético de extrema baixa frequência, a partir da realização de medições de intensidade de campo magnético e do levantamento de variáveis descritivas do interior de ambientes que compõem as residências, as quais estão relacionadas à morfologia urbana da região do entorno dessas residências.

As variáveis consideradas nessa pesquisa foram definidas com base nos aspectos investigados na literatura internacional acerca dos níveis de ELF MF prevalentes em ambientes urbanos.

O número de ambientes avaliados em cada residência variou de acordo com a configuração interna dos apartamentos, tais como: número de cômodos, quantidade de acessos, separação entre sala e cozinha e a existência de cômodos integrados.

Por considerar habitações localizadas em regiões brasileiras, é provável que os resultados encontrados neste estudo possam ser verificados também em regiões de países cuja rede elétrica tenha frequência de 60 Hz, assim como o Brasil, os quais tenham características de estrutura de distribuição de energia elétrica, potência de transformadores, geometria urbana, densidade populacional e composição das edificações semelhantes às do estudo.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é estruturada em cinco capítulos. O primeiro, do qual faz parte este item, apresenta a introdução, que tem por finalidade contemplar o tema e o problema de pesquisa, abordar a relevância e os aspectos intrínsecos à justificativa, caracterizar os objetivos gerais e específicos assim como explicitar a delimitação deste estudo.

O segundo capítulo abrange o referencial teórico, cuja fundamentação objetiva o fornecimento de suporte ao problema suscitado nesta pesquisa, enfocando conceitos e informações essenciais ao seu desenvolvimento.

No terceiro capítulo enfocou-se a metodologia, incluindo caracterização da pesquisa, as ferramentas utilizadas e os métodos e procedimentos adotados para coleta, análise e tratamento de dados.

No quarto capítulo são descritos os principais resultados obtidos na pesquisa, como parâmetros fixos dos modelos hierárquicos de regressão elaborados; os efeitos aleatório de cada um dos níveis hierárquicos em que foram considerados erros aleatórios, explicitados pelos coeficientes de correlação intraclasse; as figuras que descrevem o procedimento de diagnóstico dos modelos; as tabelas e equações descritivas dos modelos e a discussão acerca da relevância dos resultados encontrados e de sua relação com o que tem sido abordado na literatura do tema.

O quinto capítulo abordou as conclusões em consonância com os resultados obtidos e ainda, as recomendações e sugestões para projetos ou estudos futuros.

Ao final, foram elencadas as referências e em seguida, o apêndice.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica, que reúne os conceitos, as definições e o conhecimento que alicerçam o desenvolvimento dessa pesquisa. Os assuntos aqui tratados são baseados em pesquisas publicadas nos mais diferentes periódicos e nos tópicos que se seguem é exposto o estado da arte da literatura relacionada ao tema, que possibilitará um melhor entendimento acerca dos níveis de radiação não ionizante de extrema baixa frequência que podem ser verificados em residências verticais.

A seção 2.1 é destinada a explicações acerca das características e tipos de fontes emissoras de radiação não ionizante presentes no dia-a-dia das pessoas, inclusive no interior de suas próprias residências. Também apresenta brevemente as características de um equipamento analisador de espectro eletromagnético, o qual é utilizado para mensuração dos níveis de campo magnético nos diversos ambientes.

A seção 2.2 faz elucidações a respeito dos possíveis efeitos da exposição a campos magnético de extrema baixa frequência à saúde das pessoas, discutindo os limites de exposição estabelecidos em normas e padrões nacionais e internacionais, bem como as controvérsias existentes com relação a estes valores limite tendo em vista os resultados de uma série de estudos epidemiológicos.

Na seção 2.3 são abordados os estudos e investigações da literatura acerca da exposição à radiação não ionizante de extrema baixa frequência em ambientes domiciliares, discutindo-se os aspectos inerentes aos ambientes, aos apartamentos e a geometria urbana na qual os edifícios estão inseridos.

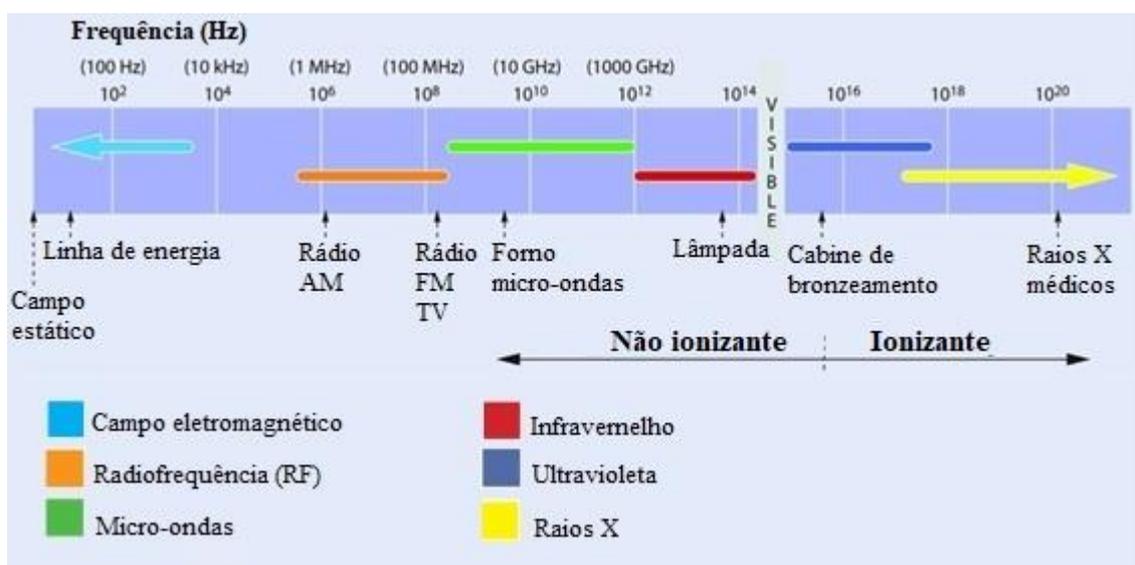
A seção 2.4 apresenta as particularidades dos modelos de regressão multiníveis que serão desenvolvidos para analisar quais os efeitos inerentes às medições, aos ambientes, aos apartamentos e aos edifícios que melhor explicam a variação dos níveis de radiação não ionizante de extrema baixa frequência.

Por fim, a seção 2.5 é direcionada às considerações finais acerca do capítulo.

2.1 Radiação não-ionizante de extrema baixa frequência

A radiação eletromagnética refere-se à propagação de energia como resultado de um campo eletromagnético variando no tempo (HENSHAW, 2002). O espectro eletromagnético (Figura 1) inclui campos elétricos e magnéticos estáticos (não alternados), campos elétricos e magnéticos de baixa frequência (baixa energia, longos comprimentos de onda), campos eletromagnéticos intermediários e de radiofrequência (RF), micro-ondas, radiação óptica (infravermelho, luz visível, radiação ultravioleta) e raios X e gama (radiação ionizante com alta energia e comprimentos de onda muito baixos) (MCCOLL *et al.*, 2015).

Figura 1 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de MCCOLL *et al.*, 2015.

Os campos eletromagnéticos são caracterizados por sua frequência (comprimento de onda) e amplitude (intensidade). Em baixa frequência os campos eletromagnéticos comportam-se de forma independente. Enquanto os campos elétricos são normalmente atenuados por obstáculos tais como árvores, paredes e objetos em geral, os campos magnéticos não são atenuados por estes obstáculos (BELARDO *et al.*, 2004).

Radiação sob a forma de ondas de rádio, emissões de telefones celulares e luz visível, todos constituem radiação eletromagnética. Os campos magnéticos gerados pela rede de distribuição elétrica, que têm frequência de 60 Hz nos EUA, Canadá e

América do Sul, e 50 Hz na Europa e em outros lugares; são descritos como de extrema baixa frequência em termos de frequência eletromagnética (HENSHAW, 2002).

Os campos elétricos e magnéticos estáticos e extremamente baixos, que são caracterizados por frequências inferiores a 300 Hz, deve-se à ocorrência de fenômenos naturais ou estão associados à geração artificial através da transmissão de energia elétrica. As fontes naturais constituem basicamente o campo geomagnético da Terra, trovões e relâmpagos, e as fontes artificiais incluem os transformadores de energia elétrica, bem como todos os dispositivos que são alimentadas por energia elétrica (BRODIĆ; AMELIO, 2015; MCCOLL *et al.*, 2015).

O avanço do desenvolvimento tecnológico introduziu um número cada vez maior de equipamentos eletroeletrônicos na rotina das pessoas, seja no ambiente de trabalho ou no espaço de convívio doméstico, associando conforto e bem-estar. Os dispositivos elétricos, no geral, embora emitam altos níveis de campos magnético, têm seu uso comumente restrito a curtos períodos de tempo, fazendo com que não contribuam substancialmente para a média exposição diária dos indivíduos em residências (SCHUZ; ERDMANN, 2016).

Sendo assim, é necessário levar em consideração outras importantes fontes emissoras de radiação não ionizante de extrema baixa frequência, tais como as linhas de alta tensão, os transformadores e as instalações elétricas presentes nas adjacências das residências. Estas são bastante significativas, uma vez que resultam em níveis de exposição mais elevados nas áreas próximas, incluindo o interior de edificações (MCCOLL *et al.*, 2015). Por essa razão, inspiram também estudos que avaliam o efeito da exposição na saúde de pessoas que exercem algumas profissões que envolvem a sua manipulação (SAHL; KELSH; GREENLAND, 1993; THERIAULT *et al.*, 1994; SAVITZ; LOOMIS, 1995; SAVITZ; CHECKOWAY; LOOMIS, 1998; SORAHAN *et al.*, 2001; HARRINGTON *et al.*, 2001; JOHANSEN *et al.*, 2007), como de eletricitas, apesar de que, normalmente nestes casos, a exposição se mantém por períodos de tempo mais curtos. A duração e a distância mantida deste tipo de fonte são as principais variáveis que determinam a intensidade da exposição dos indivíduos próximos (CALVENTE *et al.*, 2010).

Todas as fontes artificiais oferecem riscos para o meio ambiente e saúde humana, uma vez que expõem seus usuários à radiação não ionizante (GRELLIER;

RAVAZZANI; CARDIS, 2014), a qual apresenta como característica o fato de ser absorvida pela pele, de modo que pode causar um aumento de temperatura não percebido pelos sensores térmicos naturais, localizados superficialmente. O aquecimento gerado internamente depende de três fatores: tempo de exposição, intensidade do campo e espessura do tecido. O organismo pode não ser capaz de compensar esse aumento de temperatura, causando efeitos biológicos diversos (SILVA *et al.*, 2015).

2.1.2 Dispositivo analisador de espectro eletromagnético

O analisador de espectro eletromagnético consiste num dispositivo capaz de exibir os valores de campo mensurados em tempo real, para o intervalo de frequência selecionado. Normalmente esse tipo de equipamento pode ser acoplado a um computador por meio de um software de análise, que permite exibir graficamente os resultados das medições. Assim, enquanto o equipamento exibe os níveis de campo eletromagnético, é possível acompanhar, simultaneamente, na tela do computador o comportamento gráfico do campo no tempo (AARONIA AG, 2009).

O *Low-frequency Spectrum Analyzer* Aaronia SPECTRAN NF-5035 (Figura 2), dispositivo utilizado nessa dissertação, possui uma bobina de medição 3D integrada que permite a medição de campos magnéticos em todas as direções ao mesmo tempo. Os resultados das medições do campo magnético nos três eixos são calculados como uma média quadrática utilizando a equação $3D(X,Y,Z) = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$.

Figura 2 - Medidor de campo eletromagnético de baixa frequência Aaronia SPECTRAN NF-5035.



Fonte: AARONIA AG, 2009.

O intervalo de frequência aplicado no dispositivo Aaronia SPECTRAN NF-5035 pode ser selecionado manualmente de duas formas: selecionando um valor de frequência central e um valor de *span*, o qual definirá o tamanho do intervalo (por exemplo, para um valor central de 50 Hz e *span* de 100 Hz, o intervalo de frequência considerado durante a varredura será de 0 a 100 Hz); definindo uma frequência de início (fLow) e de final (fHigh), escolha essa que exige mais cautela, uma vez que o uso de uma faixa de frequência grande comprimirá mal a tela horizontalmente e, portanto, reduzirá significativamente a precisão da medição (AARONIA AG, 2010).

Considerar uma faixa de frequência menor permite uma medição mais precisa, sendo os resultados gráficos exibidos mais detalhados. Embora um grande intervalo de frequência permita ter uma visão geral mais ampla, este resulta em medições menos exatas (AARONIA AG, 2010).

2.2 Efeitos da exposição à radiação não-ionizante de baixa frequência

A investigação dos efeitos à saúde em virtude da exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência é feita em estudos epidemiológicos, uma vez que, atualmente, qualquer associação de causa-efeito só é considerada como verdadeira quando sustentada por evidências obtidas através de estudos desse tipo (MATTOS; KOIFMAN, 2004).

Neste sentido, o debate atual, no âmbito epidemiológico, sobre a associação entre a exposição aos campos eletromagnéticos de extrema baixa frequência e a ocorrência de câncer assumiu uma importância fundamental para a compreensão aprofundada deste tema (MATTOS; KOIFMAN, 2004).

Outros possíveis efeitos da exposição à radiação não-ionizante para as pessoas incluem distúrbios físicos, neurológicos, psíquicos e comportamentais descritos na literatura dos últimos anos (FLODERUS *et al.*, 1993; LIBURDY *et al.*, 1993; MILLER *et al.*, 1996; AHLBOM *et al.*, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; HENSHAW, 2002; MOFRECOLA *et al.*, 2003; MILHAM, 2004; HA *et al.*, 2007; KARIPIDIS *et al.*, 2007a; KARIPIDIS *et al.*, 2007b; KHEIFETS *et al.*, 2009; CALVENTE, 2010; WEST *et al.*, 2013; GRELLIER; RAVAZZANI; CARDIS, 2014; ELWOOD, 2017).

Os tópicos subsequentes descrevem os resultados de estudos epidemiológicos a respeito da exposição dos indivíduos a níveis de ELF EMF e discutem as normas e

padrões nacionais e internacionais que limitam a exposição do público, bem como as controvérsias existentes com relação a estes valores limite.

2.2.1 Efeitos a curto prazo

Os campos eletromagnéticos de baixa frequência normalmente atravessam o corpo humano, induzindo correntes circulantes dentro do corpo humano. A intensidade dessas correntes induzidas depende da intensidade do campo magnético externo e do comprimento do percurso através do qual a corrente flui. Quando suficientemente intensas essas correntes podem causar o estímulo de nervos e músculos (OMS, 2002).

A evidência de uma relação entre ELF EMF e queixas de saúde não específicas é considerada fraca, mas a população em geral atribui alguns efeitos adversos, como problemas de fadiga e concentração, à exposição à ELF EMF emitida por várias fontes elétricas, dentre elas os telefones e as linhas de transmissão de energia (Porsius *et al.*, 2015).

Efeitos a nível comportamental induzidos pela exposição a ELF EMF foram descritos em estudos recentes, incluindo: alterações na atividade locomotora (DIMITRIJEVIĆ, D. *et al.* 2014), ansiedade (SALUNKE; UMATHE; CHAVAN, 2013; KITAOKA, K. *et al.*, 2012) e comportamento semelhante à depressão (KITAOKA, K. *et al.* 2012).

Wang *et al.* (2013) estudaram a associação entre a exposição a campos magnéticos na frequência de 50 Hz e o risco de aborto espontâneo para mulheres residentes na área do Delta do Rio das Pérolas, na China. Foram realizadas medições de pelo menos 16 segundos em cada local e foi aplicado um questionário composto de 7 partes a cada uma das mulheres participantes, para investigar fatores de risco de aborto espontâneo. Embora a incidência de aborto tenha se mostrado positivamente associada à exposição máxima de ELF MF verificada, a associação entre o risco de aborto espontâneo e a exposição a ELF MF não foi confirmada no estudo.

2.2.2 Efeitos a longo prazo

As preocupações acerca dos possíveis efeitos da exposição a longo prazo a campos eletromagnéticos sobre a saúde dos indivíduos já eram levantadas desde a década de 1970 (MARINO e BECKER, 1978). Ao longo dos anos, o interesse por esta questão controversa continua a aumentar (CUNNINGHAM, 1991).

A existência de uma associação entre a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência residencial e a leucemia infantil, por exemplo, foi sugerida pela primeira vez por Wertheimer e Leeper, em 1979 (AHLBOM *et al.*, 2000). Desde então, esta tem sido um questão controversa, abordada em estudos epidemiológicos subsequentes (GREENLAND, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; HA *et al.*, 2007; CALVENTE *et al.*, 2010; LONGYU *et al.*, 2014; SCHUZ; ERDMANN, 2016).

Em virtude das divergências quanto à capacidade das radiações não ionizantes de baixa e extrema baixa frequência de causarem câncer à população exposta, Havas (2017) estabeleceu uma divisão dos estudiosos do tema em dois grupos:

- 1) O grupo que defende que as evidências científicas que documentam os efeitos adversos à saúde são inconsistentes e inconclusivas e, embora reconheçam que alguns tipos de câncer - como por exemplo a leucemia infantil devido à exposição ao campo magnético residencial - não podem ser ignorados, ressaltam que os riscos são baixos e podem estar associados a outros fatores causais. Tal grupo baseia-se na teoria, bem estabelecida, de que a RNI não tem energia suficiente para extrair elétrons e que, portanto, é incapaz de causar câncer;
- 2) O grupo que defende que a RNI é prejudicial à saúde humana em níveis que atualmente são predominantes nos centros urbanos, sustentando que além de estar associada ao desenvolvimento de câncer, pode provocar problemas reprodutivos, além de sintomas classificados como eletro-hipersensibilidade (EHS) ou intolerância ambiental idiopática, de acordo com a OMS, além de desencadear outras doenças crônicas comuns em nossa sociedade. Tal grupo baseia-se em uma série de estudos que documentam efeitos biológicos à de saúde (LEE *et al.*, 1996; HAVAS, 2000, 2013; SAGE e CARPENTER, 2007, 2012; LEVITT e LAI, 2010; BLANK *et al.*, 2015).

Havas (2017) explica que apesar da IR e a RNI comporem o espectro eletromagnético, a aplicação do modelo de ionização à energia não ionizante é inadequada. Ambas produzem efeitos biológicos, mas através de rotas diferentes: enquanto a IR quebra ligações químicas, causando danos diretos ao DNA; a RNI altera o mecanismo de reparação de anti-oxidantes, resultando em uma acumulação de radicais livres, que agem interrompendo processos celulares e causando danos ao DNA.

Sage (2012) destacou que há evidências científicas de que os efeitos biológicos da exposição a radiações não ionizantes de extrema baixa frequência são surpreendentemente semelhantes aos da exposição a baixas doses de radiação ionizante. De forma semelhante a Havas (2017), ressalta que existem provas científicas de que campos electromagnéticos de extrema baixa frequência e radiofrequência são genotóxicos, uma vez que provocam estresse oxidativo, que resulta em danos ao DNA (micronucleação, danos no DNA de cadeia simples e dupla, instabilidade do genoma e aberrações cromossômicas persistentes) e falha na reparação de danos ao DNA.

Não se sabe qual o período de vida, se houver, que é determinante para a indução de câncer pela exposição a campos magnéticos. Pesquisas apontam que mais de metade (55%) dos casos de leucemia infantil e 43% de outros tipos de câncer na infância ocorrem até a idade de 5 anos (DRAPER *et al.*, 2005).

Calvente *et al.* (2010) realizaram um levantamento bibliográfico de publicações que tratam da associação entre a exposição humana a RNI de baixa frequência, extrema baixa frequência e a leucemia infantil, entre os anos de 1979 e 2008. Apesar de encontrarem evidências epidemiológicas do aumento da incidência de leucemia em crianças expostas a valores de intensidade de campo magnético superiores a 0,3 μT , não puderam concluir a existência de uma relação causal direta.

Utilizando os dados de um total de 9 estudos que visavam estabelecer uma associação entre a leucemia infantil e exposição ao campo magnético de extrema baixa frequência, realizados no período de 1997 e 2013, Longyo *et al.* (2014) classificaram os níveis de exposição ao campo magnético mensurados em quatro faixas: abaixo de 0,1 μT ($<0,1 \mu\text{T}$), entre 0,1 e 0,2 μT ($0,1 < x < 0,2 \mu\text{T}$), entre 0,2 e 0,4 μT ($0,2 < x < 0,4 \mu\text{T}$), e acima de 0,4 μT ($\geq 0,4 \mu\text{T}$). Como resultado, encontraram uma significativa associação estatística entre a leucemia infantil e a exposição à níveis de

intensidade do campo magnético acima de $0,4 \mu\text{T}$, o que foi consistente com os achados de Ahlbom *et al.* (2000).

Wünsch-Filho *et al.* (2011) avaliaram o efeito da exposição a campos magnéticos de 60 Hz sobre a ocorrência de leucemia linfocítica aguda (do inglês, *acute lymphocytic leucemia* - ALL) em crianças residentes no estado de São Paulo, no Brasil. Um total de 162 casos selecionados foram recrutados em oito hospitais que cobrem mais de 50% de todos os casos de leucemia no estado. Foram realizadas medições de intensidade de ELF MF na porta da frente e em cada cômodo da casa dos participantes usando um dosímetro portátil EMDEX-II, no intervalo de frequência de 40 a 800 Hz, cada uma com 3 min de duração. Adicionalmente efetuou-se uma medição de 24 horas sob o leito das crianças. Não foi observado aumento do risco de ALL para exposições iguais ou superiores a $0,3 \mu\text{T}$ verificadas nas mensurações de 24 h nos quartos das crianças. No entanto, quando a análise foi restrita às medições noturnas do quarto, um risco aumentado foi observado.

Ao realizar uma revisão da literatura sobre a relação entre os fatores ambientais e o risco de leucemia infantil, Schuz e Erdmann (2016) destacaram que uma associação positiva entre a exposição residencial a campos magnéticos de extrema baixa frequência e leucemia infantil foi observada em vários estudos epidemiológicos, realizados em diferentes contextos, em diferentes períodos de tempo e países diversos. Mostraram, ainda, que a combinação desses estudos na análise conjunta resultou no risco relativo em torno de 1,5 a 2 para exposição a níveis diários de exposição média acima de $0,3$ e $0,4 \mu\text{T}$.

Com base no ponto de vista dos artigos que analisaram, Schuz e Erdmann (2016) classificaram a evidência da casualidade da exposição à campos eletromagnéticos de baixa frequência em relação à leucemia infantil como convincente. Consideraram que essa evidência foi confirmada em vários estudos epidemiológicos conduzidos de forma independente, com um mecanismo que bem estabelecido ou pelo menos com uma sugestão plausível de uma rota em potencial.

No entanto, o foco que a literatura tem dado a leucemia infantil mascara o fato de que para algumas outras doenças há um grau de consistência nas evidências apresentadas em pesquisas científicas que sugerem que os efeitos adversos à saúde provocados pela exposição a campos magnéticos na frequência da energia elétrica podem estar ocorrendo em uma escala muito mais ampla do que a atualmente

apreciada (HENSHAW, 2002). Uma associação entre a exposição a campos magnéticos e o desenvolvimento de depressão tem sido vista em estudos epidemiológicos, e é biologicamente explicada através da redução da melatonina pineal a níveis anormais, com a maioria dos estudos relatando a ocorrência de níveis noturnos reduzidos (ARENDRT, 1989; BROWN *et al.*, 1987; MCINTYRE *et al.*, 1989). Há evidências de que a depressão é um importante fator de risco para o suicídio (HENSHAW, 2002).

2.2.2.1 Devido à exposição ocupacional

Um segmento substancial da epidemiologia relacionada a campos elétricos e magnéticos tem se concentrado em condições ocupacionais, com exposições geralmente maiores do que as da população em geral, possibilitando uma detecção mais fácil dos efeitos (KHEIFETS *et al.*, 2009).

Karipidis *et al.* (2007a) investigaram a associação entre a exposição ocupacional a radiação não ionizante de extrema baixa frequência e o risco de desenvolver linfoma não-Hodgkin (LNH), em um estudo de caso-controle baseado na população diagnosticada em duas regiões da Austrália. Embora estudos ocupacionais anteriores tenham relatado uma associação entre o LNH e ocupações que envolvem a relação com fontes elétricas, os resultados obtidos pelo autor não foram suficientes para fornecer suporte para uma associação entre o desenvolvimento de LNH em função da exposição a ELF EMF.

Kheifets *et al.* (2009) fizeram uma revisão bibliográfica de uma série de estudos realizados nos últimos 20 anos e que tratam da exposição ocupacional a campos eletromagnéticos. Com base nas fraquezas metodológicas destes estudos, propuseram formas analíticas de abordagem e destacaram prioridades para pesquisas futuras, tais como nas áreas de avaliação de exposição e de investigação da esclerose lateral amiotrófica (ELA).

Karipidis *et al.* (2007b) investigaram a existência de uma possível associação entre exposição ocupacional a radiação não ionizante de extrema baixa frequência e o risco de glioma em indivíduos adultos. Para tanto, utilizaram-se de uma matriz finlandesa de exposição profissional (FINJEM) em um estudo de caso-controle baseado na comunidade australiana. Devido à maior incidência de glioma em homens,

foi realizada uma análise FINJEM separada de acordo com os pacientes do sexo masculino e feminino. Entretanto, a análise não mostrou associação significativa com o glioma para nenhum dos sexos, de modo que os resultados não fornecem suporte para uma associação direta entre o desenvolvimento de glioma e a exposição ocupacional a ELF EMF.

Huss, Peters e Vermeulen (2018) realizaram uma metanálise com 20 estudos, tendo observado risco de 1,14 (para 95% de confiança, no intervalo de confiança de 1,00–1,30) de pessoas atuando em empregos que lidam com eletricidade e estão constantemente expostos a níveis mais elevados de ELF EMF desenvolverem esclerose lateral amiotrófica (ELA), com relação às que não estão.

2.2.3 Normas e padrões internacionais

Diferentes organizações e países possuem as mais variadas recomendações legais e normativas aplicáveis à exposição aos campos eletromagnéticos. A elaboração das recomendações internacionais de proteção às radiações não ionizantes é feita por comitês internacionais, que se baseiam principalmente nos resultados de estudos epidemiológicos e de pesquisas em laboratórios, as quais fornecem as bases para a estimativa de riscos associados a determinados agentes que, por sua vez, são usados para o estabelecimento dos limites de exposição (OKUNO, 2009).

As comissões trabalham em parceria e mantêm relações oficiais com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), a Organização Internacional do Trabalho (OIT), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), dentre outros (OKUNO, 2009).

O primeiro esforço significativo para estabelecer limites internacionais de exposição à radiação não ionizante foi feito pela Associação Internacional de Proteção contra Radiação (do inglês, *International Radiation Protection Association - IRPA*). Em 1977, no 4º Congresso da IRPA, em Paris (OKUNO, 2009), esse grupo recebeu o nome de Comissão Internacional de Radiação Não Ionizante (do inglês, *International Non-Ionizing Radiation Commission - INIRC*).

Dentro do programa da Organização Mundial da Saúde (OMS) sobre Saúde Ambiental, a IRPA e o INIRC desenvolveram vários critérios de saúde ambiental

(Environmental Health Criteria - EHC) e documentos sobre RNI, cada um dos quais incluía diversos resumos das características físicas, de medição e instrumentação, das origens e aplicações da RNI, além de uma ampla revisão da literatura sobre efeitos biológicos e uma avaliação dos riscos da exposição à RNI para a saúde das pessoas. Estes EHCs forneceram a base de dados científicos para o desenvolvimento posterior dos limites de exposição e códigos de boas práticas relativas à proteção contra a radiação não ionizante (INSTITUTO EDUMED, 2010).

Em 1992, no 8º Congresso da IRPA, em Montreal, o nome do grupo foi mudado para Comissão Internacional de Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP) (INSTITUTO EDUMED, 2010). A ICNIRP é a organização não governamental formalmente reconhecida pela Organização Mundial da Saúde e pelo Escritório Internacional de Trabalho quanto à orientação sobre os riscos da exposição à radiação não ionizante para a saúde e a proteção das pessoas e do meio ambiente (ZIEGELBERGER *et al.*, 2006).

A ICNIRP mantém uma estreita relação com todos os organismos internacionais envolvidos no campo da proteção contra radiações não ionizantes e atua em colaboração com a Associação Internacional de Proteção contra Radiação e suas sociedades. O escopo de seu trabalho abrange todos os tipos de radiações não ionizantes, incluindo radiações ópticas (ultravioleta, visível e infravermelho), campos elétricos e magnéticos estáticos e radiofrequência, além das micro-ondas e ultrassom (ZIEGELBERGER *et al.*, 2006).

Em suma, a ICNIRP dispõe de diretrizes internacionais sobre os limites de exposição a radiações não ionizantes; fornece orientações e recomendações sobre a proteção contra exposição a este tipo de radiação; e estabelece princípios para a formulação de programas de proteção a nível nacional e internacional (ZIEGELBERGER *et al.*, 2006).

A elaboração das recomendações e o estabelecimento de limites de exposição das radiações não ionizantes seguem um organograma complexo. Por essa razão, a ICNIRP forma um grupo de experts de diferentes áreas, que analisa e faz revisão de todos os artigos científicos publicados até o momento em Epidemiologia, Biologia, Física e Dosimetria (OKUNO, 2009).

Em 1998, a ICNIRP publicou uma revisão das diretrizes de exposição à radiação não ionizante. Este documento define as restrições de níveis de referência para

diferentes faixas de frequência até 300 GHz, tanto para o grande público quanto para profissionais expostos à campos eletromagnéticos no exercício de suas funções, com explicações sobre o porquê de cada uma (WESSELING, 2014). Suas orientações foram aprovadas pela OMS, pela OIT e pela União Internacional das Telecomunicações (UIT), e foram adotadas como padrão nacional em mais de 50 países do mundo (INSTITUTO EDUMED, 2010).

Também no ano de 2009 foi estabelecido o Projeto Internacional de Campos Eletromagnéticos (do inglês, *International EMF and Health Project*) da OMS, com o objetivo de promover a adoção de orientações científicas com base em padrões internacionais, como os da ICNIRP (1998), nesta área. O Projeto publica um site na internet com muitos documentos e informações, em três idiomas diferentes (INSTITUTO EDUMED, 2010).

Paralelamente ao desenvolvimento de limites de exposição pelos órgãos internacionais que regulam a exposição aos diversos agentes, como a radiação não ionizante, por exemplo, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC) elabora um documento no qual identifica e classifica agentes, substâncias, fatores ambientais ou estilo de vida que podem aumentar o risco de seres humanos de desenvolverem câncer.

A IARC classifica os agentes em grupos: 1 – carcinogênico, 2A – provavelmente carcinogênico, 2B – possivelmente carcinogênico, 3 – não carcinogênico e 4 – provavelmente não carcinogênico. No grupo 2A estão os agentes que apresentam forte evidência de correlação com câncer, porém ainda não conclusivos e no grupo 2B, os agentes com alguma evidência de correlação com câncer, mas ainda longe de se chegar à conclusão (OKUNO, 2009). Em 2002, os campos magnéticos cuja frequência é de 60 Hz foram classificados pela IARC como pertencente ao grupo 2B, ou seja, como agente possivelmente carcinogênico (IARC, 2002).

Em 2010, a ICNIRP publicou um documento focado nas baixas frequências (ICNIRP, 2010), com o objetivo de complementar a diretiva de 1998 para as radiações eletromagnéticas de baixa frequência. Foi publicado principalmente em virtude das preocupações recentes sobre os efeitos das ondas eletromagnéticas de baixa frequência sobre tecidos nervosos e musculares (WESSELING, 2014).

Em 2017, a ICNIRP publicou uma nova declaração que analisa vários dispositivos utilizados para diagnóstico de doenças que emitem RNI, e que são

atualmente utilizados em clínicas. Além disso, documenta os regulamentos e políticas relevantes que abrangem pacientes e profissionais de saúde, revisa as evidências demonstradas pela literatura acerca dos potenciais riscos para a saúde dos pacientes e trabalhadores expostos e identifica situações de alta exposição de RNI em que pacientes ou profissionais de saúde podem não estar adequadamente protegidos devido à regulamentação vigente.

Alguns países como China, Rússia e vários países do Leste Europeu adotam normas diferentes, ditas orientais, as quais diferenciam-se dos padrões estabelecidos pela ICNIRP (conhecidos como normas ocidentais) em dois aspectos (BALBANI; KRAWCZYK, 2009):

a) A metodologia científica de definição dos valores limite utiliza o conceito de dose (que corresponde à densidade de potência multiplicada pelo tempo de exposição). Critérios mais flexíveis são usados para reconhecer os efeitos da exposição a campos eletromagnéticos, admitindo sintomas inespecíficos como cefaleia, fadiga, irritabilidade, distúrbios do sono e tontura;

b) Estabelecem uma margem de segurança mais restritiva, pois na escola médica russa existe a convicção de que a exposição aos campos eletromagnéticos durante horas é suficiente para causar danos à saúde, ainda que não provoque aumento da temperatura dos tecidos vivos.

Outros países adotam normas baseadas no princípio da precaução, o qual não leva em consideração os resultados obtidos em trabalhos científicos e preconiza “minimizar os riscos ainda desconhecidos” através da cautela. Pouquíssimos países, como a Itália e a Suíça, seguem este princípio, adotando na legislação alguns limites para exposição humana que correspondem a 1/10 dos valores máximos permitidos pelas normas da ICNIRP (1998, 2010) (BALBANI; KRAWCZYK, 2009).

2.2.4 Normas e padrões nacionais

A legislação brasileira foi redigida tomando como base as diretrizes estabelecidas pela ICNIRP (1998). A lei 11.934/2009 regulamenta os limites de exposição do público a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, gerados por estações transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuário e de sistemas de energia elétrica, na frequência de até 300 GHz, visando garantir a proteção da

saúde e do meio ambiente. Para isso, assume os limites da OMS como recomendações, e do ICNIRP nas questões nas quais os parâmetros da OMS forem omissos, sabendo-se que as próprias recomendações da OMS são baseadas nas da ICNIRP.

Além disso, a lei 11.934/2009 estabelece que o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e o Fundo para Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (FUNTTEL) são os responsáveis pelas pesquisas sobre exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, reservando uma parcela dos recursos para estudos que avaliem a exposição associada a postos de trabalho em empresas que utilizem fontes geradoras desses campos e de indivíduos que possam ser especialmente afetados por eles, tais como crianças, idosos e gestantes. Adicionalmente, atribui a fiscalização do atendimento aos limites estabelecidos por esta Lei aos órgãos federais reguladores dos setores elétricos e de telecomunicações.

A Resolução nº 303, de 02 de junho de 2002, da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), aprovou o regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Este regulamento estabelece limites para a exposição humana associada à operação de estações transmissoras de radiocomunicação de serviços de telecomunicações, definindo métodos de avaliação e procedimentos a serem observados quando do licenciamento de estações de radiocomunicação, no que diz respeito a aspectos relacionados à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na banda de radiofrequências.

Com relação à legislação trabalhista brasileira, a Portaria nº 3.214, de 08 de junho de 1978, que aprovou as Normas Regulamentadoras (NRs) relativas à Segurança e Medicina do Trabalho, por meio da NR-9, considera as radiações não ionizantes como agentes causadores de risco físico para os trabalhadores a elas expostos. A NR-15 esclarece que, para os efeitos desta norma, são consideradas radiações não-ionizantes as micro-ondas, a radiação ultravioleta e as operações ou atividades que exponham os trabalhadores a qualquer desses tipos de radiações não-ionizantes, sem a proteção adequada. Todas estas são consideradas insalubres quando identificadas por meio de laudo de inspeção realizada no local de trabalho.

2.2.5 Limites propostos na literatura

Ahlbom *et al.* (2000) realizaram um estudo conjunto, considerando os dados coletados em nove estudos desenvolvidos em diferentes países (Canadá, Dinamarca, Finlândia, Alemanha, Nova Zelândia, Noruega, Suécia, Estados Unidos e Reino Unido), com o objetivo de avaliar se os resultados combinados de vários estudos são capazes de comprovar a existência de uma associação entre a exposição à ELF EMF e o risco de desenvolver leucemia infantil, maior do que seria de esperar em virtude da ocorrência de variabilidade aleatória.

Aplicando os dados brutos dos estudos considerados a um modelo de regressão logística, em que cada centro (local de coleta de dados envolvido em cada estudo) era representado por variáveis do modelo, Ahlbom *et al.* (2000) estimaram o risco relativo. Para isso, classificaram a exposição em quatro níveis: abaixo de 0,1 μT ($<0,1 \mu\text{T}$); entre 0,1 μT e 0,2 μT ($0,1 < x < 0,2 \mu\text{T}$); entre 0,2 μT e 0,4 μT ($0,2 < x < 0,4 \mu\text{T}$); acima 0,4 μT ($\geq 0,4 \mu\text{T}$). Embora não tenham encontrado nenhuma evidência de risco aumentado de leucemia infantil em níveis de campo magnético residencial abaixo de 0,4 μT , verificaram uma estimativa de risco relativo estatisticamente significativa de dois para leucemia infantil em crianças com exposição residencial a ELF EMF acima de 0,4 μT durante o ano anterior ao diagnóstico de leucemia.

Apesar de apresentar como limitação o fato do risco elevado de exposição a níveis de campo eletromagnético em frequências superiores à 0,4 μT ter sido devido a uma pequena fração das crianças consideradas no estudo, as quais estão altamente expostas, os achados de Ahlbom *et al.* (2000) foram de tamanha relevância que foram mencionados pelo ICNIRP *guidelines for limiting exposure to timevarying electric and magnetic fields (1 Hz – 100kHz)*, publicado em 2010, bem como, desde o seu ano de publicação, tem sido referenciado por autores diversos.

Greenland *et al.* (2000) reuniram os dados de 15 estudos que associam a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência com a ocorrência de leucemia infantil, concluindo que efeitos mais significativos dos níveis campo magnético nos indivíduos, se houverem, ocorrem para exposições relativamente mais altas (acima de 0,3 μT).

Os autores acrescentaram que, com base nas medições feitas por autores de 12 dos estudos considerados, estes níveis de intensidade de campo magnético são incomuns e o esclarecimento dessa associação suscita a realização de pesquisas que se concentrem em regiões nas quais a população está constantemente exposta a níveis de campos magnéticos elevados. Sugerem, ainda, que áreas densamente ocupadas de alguns países industrializados, como o Japão, ou que contenham linhas de transmissão, como foi feito em alguns estudos escandinavos, sejam examinadas (GREENLAND *et al.* 2000).

As observações de Ahlbom *et al.* (2000) e Greenland *et al.* (2000) incitaram algumas questões com relação à adequação das diretrizes do ICNIRP (1998, 2010) para a proteção do público em caso de exposição à radiação não ionizante de extrema baixa frequência, sobretudo a longo prazo. Argumenta-se, sobretudo, que estas diretrizes são demasiadamente baseadas em efeitos a curto prazo da exposição a níveis de campo magnético de baixa frequência, como estimulação elétrica de músculos e nervos periféricos. O risco de desenvolver doenças, a longo prazo, como o câncer, não foi levado em consideração, uma vez que a ICNIRP (1998, 2010) considerou os dados apresentados na literatura, incluindo a evidência mais consistente, que diz respeito ao aumento do risco de desenvolver leucemia infantil (FLODERUS *et al.*, 1993; MILLER *et al.*, 1996; AHLBOM *et al.*, 2000; GREENLAND *et al.*, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002), como insuficientes para suportarem valores de restrição.

Devido a estas preocupações, com base não apenas nos trabalhos de Ahlbom *et al.* (2000) e Greenland *et al.* (2000), mas também em estudos epidemiológicos anteriores (LLAURADO, 1990; ALLEN *et al.*, 1991; SAHL; KELSH; FLODERUS *et al.*, 1993; GREENLAND, 1993; THERIAULT *et al.*, 1994; SAVITZ; LOOMIS, 1995; SAVITZ; CHECKOWAY; LOOMIS, 1998) e subsequentes (SORAHAN, *et al.*, 2001; HARRINGTON *et al.*, 2001; HENSAW, 2002; MOFRECOLA; MOFFA; PROCACCINI., 2003; LONGYU *et al.*, 2014; SCHUZ; ERDMANN, 2016) que investigaram a associação da exposição à radiação não ionizante de extrema baixa frequência, a longo prazo, com o desenvolvimento de câncer, vários autores (ILONEN *et al.*, 2008; THURÓCZY *et al.*, 2008; HAREUVENY *et al.*, 2011; HUSS *et al.*, 2013; KANDEL *et al.*, 2013; STRUCHEN *et al.*, 2015; BRODIĆ, 2015; BRODIĆ; AMELIO, 2015;

ELWOOD, 2017) passaram a adotar $0,4 \mu\text{T}$ como valor de referência, acima do qual a saúde e a integridade física dos indivíduos está potencialmente em risco.

2.3 Níveis de radiação não-ionizante de extrema baixa frequência

Conforme já discutido, a radiação não ionizante de baixa frequência é constituída de campos eletromagnéticos abaixo de 300 Hz. Diferentemente do que ocorre com os campos magnéticos, as paredes que envolvem as residências servem facilmente de escudo para barrar a ação de campos elétricos. Por essa razão, campos magnéticos são mais propensos a refletir a exposição real dos moradores às linhas de energia e transformadores do que os campos elétricos (CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA DOS EUA, 1997).

Com base em estudos e investigações da literatura acerca da exposição à radiação campos magnéticos de extrema baixa frequência em ambientes domiciliares são discutidos nos tópicos que se seguem os principais aspectos inseridos nos níveis do ambiente, do apartamento e da edificação que são capazes de provocar a elevação dos níveis de radiação não ionizante de extrema baixa frequência ao qual os residentes estão expostos em residências verticais.

2.3.1 Fatores inerentes ao nível ambiente

Esta dissertação considera como fatores inerentes aos ambientes no interior dos quais são avaliados os níveis de intensidade de campo magnético de extrema baixa frequência as principais fontes artificiais emissoras de ELF EMF nos dias atuais. A seguir discute-se o que autores da literatura tem destacado sobre o impacto de cada uma dessas fontes na exposição total dos indivíduos no interior de residências verticais.

2.3.1.1 Equipamentos eletroeletrônicos

Tendo em vista que os avanços tecnológicos permitiram que um número cada vez maior de equipamentos eletroeletrônicos passasse a fazer parte da rotina das pessoas, tanto no espaço de convívio doméstico, como também nos locais de

trabalho, cresceu o número de pesquisas referentes aos efeitos da exposição das pessoas a radiação não-ionizante de extrema baixa frequência nos mais diversos ambientes.

Em geral, as fontes de campos magnéticos em residências dividem-se em duas categorias: fontes de área, que produzem campos que se estendem para além da área imediata que rodeia a fonte (por exemplo, linhas de alimentação e distribuição, transformadores); e fontes locais, nas quais o campo está essencialmente confinado a um espaço restrito, a uma pequena distância da fonte (por exemplo, aparelhos eletroeletrônicos e dispositivos portáteis) (CÂMARA, 2014).

Tomitsch, Dechant e Frank (2009) investigaram o impacto de medidas simples na redução nos níveis de ELF EMF ao lado da cama de indivíduos. Na maioria dos casos, foram notadas reduções substanciais alterando-se a distância ou desconectando lâmpadas de cabeceira, despertadores elétricos, cabos de extensão e dispositivos elétricos, que constituíam as fontes locais de maior exposição.

2.3.1.1.1 Telefones celulares

A preocupação com os efeitos adversos à saúde que podem advir do uso de telefones celulares, por um longo período de tempo, tem crescido entre o público em geral (CÂMARA, 2014).

Os celulares são aparelhos especialmente atraentes para crianças e influenciam seu padrão de comportamento. Devido ao fato de seu organismo estar em desenvolvimento e ser, hipoteticamente, mais sensível aos efeitos nocivos da radiação eletromagnética; e também à falta de dados conclusivos sobre tais consequências, algumas autoridades de saúde contraindicam o uso do celular nessa faixa etária. A precaução foi recomendada, por exemplo, pelo Grupo Independente de Especialistas em Telefones Móveis do Reino Unido, por meio do Relatório Stewart, publicado em 2000, e pelo Comitê Nacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante da Rússia, no documento de 2008 (BALBANI e KRAWCZYK, 2011).

A justificativa apresentada pelo Comitê russo inclui o fato de que as características do crânio e encéfalo da criança as predispõem a maior absorção da radiação, e o efeito cumulativo no sistema nervoso central (SNC) imaturo poderia

provocar alteração das funções nervosas superiores (déficits de atenção, memória e aprendizado), irritabilidade e distúrbios do sono (BALBANI e KRAWCZYK, 2011).

Em contrapartida, em 2002, o Conselho de Saúde da Holanda declarou que não havia justificativa científica para limitar o uso dos celulares na infância. Em meio às controvérsias, a Organização Mundial de Saúde incentiva a realização de pesquisas para esclarecer o efeito dos campos eletromagnéticos na saúde das crianças (BALBANI e KRAWCZYK, 2011).

O fato é que o crescente uso de telefones celulares e outros aparelhos eletrônicos tem sido a fonte principal de exposição de crianças à radiação não-ionizante de extrema baixa frequência, e incita uma maior investigação por parte dos estudiosos do tema (CALVENTE *et al.*, 2010).

O Brasil é o quinto maior mercado consumidor de celulares no mundo. Com o custo elevado da assinatura da linha residencial fixa, o celular passou, inclusive, a ser o único telefone em muitos lares brasileiros (BALBANI e KRAWCZYK, 2011), intensificando, assim, a exposição dos indivíduos à radiação não ionizante emitida por esse tipo de dispositivo.

Silva *et al.* (2015) constataram que o risco de exposição às radiações eletromagnéticas não-ionizantes emitidas por telefones celulares diminui com o encurtamento da distância desses aparelhos às estações radiobase de telefonia celular. De modo que, em áreas localizadas a uma longa distância de estações radiobase, comumente áreas rurais, o nível de potência utilizado pelos aparelhos é superior quando comparado com áreas urbanas, mais próximas às estações.

Mofrecola, Moffa e Procaccini (2003) avaliaram os efeitos da emissão de radiações eletromagnéticas não ionizantes por telefones celulares no fluxo sanguíneo cutâneo de trinta voluntários saudáveis, sem qualquer doença cardiovascular, respiratória ou de pele e não fumantes. Os valores de microfluxo foram registrados em situações envolvendo contato entre a pele da orelha e o aparelho ligado, desligado, recebido chamadas e sem nenhum contato. Constataram que o contato dos celulares com a pele da orelha resultou no aumento da microcirculação cutânea tanto quando os aparelhos estavam desligados, quanto ligados, embora quando ligados, sobretudo no modo receptor, o aumento tenha sido significativamente maior. Também verificaram que 27 dos pacientes avaliados no seu estudo apresentaram vermelhidão da pele do ouvido. Além disso, 15 pacientes relataram perda de

sensibilidade em áreas contíguas da pele do ouvido (bochecha, têmpora e área retroauricular).

2.3.1.1.2 Computadores portáteis

Brodić (2015) avaliou o campo magnético nas vizinhanças de 10 computadores portáteis (laptops) diferentes em condições normais de operação e sob carga pesada (sob estresse), em um ambiente livre da interferência da luz solar direta e de outras fontes de calor. Para isso, foram realizadas medições da intensidade do campo magnético em 27 pontos distribuídos no topo e na base dos computadores. Como resultado, obtiveram que os valores máximos do campo magnético medido variaram de 0,58 a 2,20 μT nas partes superiores e de 0,52 a 4,39 μT nas partes inferiores dos computadores portáteis, em condição de operação normal.

Já sob estresse, Brodić (2015) encontraram valores máximos do campo magnético na faixa de 1,08 a 5,05 μT nas partes superiores e de 0,85 a 10,91 μT nas partes inferiores dos computadores portáteis. De modo que concluíram que os pontos críticos de medição são aqueles próximos ao teclado e touchpad e na parte inferior do laptop, regiões com as quais os usuários mantêm um contato próximo, no geral. Os valores apresentados nessa região são consideravelmente mais elevados do que os propostos por limites seguros (havendo na literatura o consenso quanto a valores limite em torno de 0,4 μT) e, portanto, sugeriram que é necessário extrema cautela para usar adequadamente esse tipo de equipamento.

Brodić e Amelio (2015) avaliaram a intensidade de campo magnético de baixa frequência produzido por 13 computadores portáteis diferentes, durante sua operação “normal” (trabalho típico de escritórios), considerando equipamentos alimentados por corrente alternada (CA), com a bateria extraída, e alimentados apenas pela bateria. Como resultado, verificaram que alguns pontos dos computadores portáteis emitiram um campo magnético muito forte, especialmente os laptops alimentados por CA. Em especial, concluíram que a parte inferior dos laptops irradiavam o mais alto nível de campo magnético, a qual é normalmente mantida em contato direto com o corpo do usuário, em áreas da pele, e, conseqüentemente, com o sangue, linfa, ossos, etc. Por essa razão, recomendam que o laptop deve ser usado com extrema cautela.

2.3.2 Fatores inerentes ao nível apartamento

Esta dissertação considera como fatores inerente aos apartamentos a presença, bem como a distância do domicílio no qual estão sendo considerados os níveis de campo magnético de extrema baixa frequência até transformadores internos e linhas de transmissão de energia elétrica, bem como sua altura em relação ao nível da via urbana.

2.3.2.1 Presença e distância de transformadores internos

Uma estação de transformadores interna (do inglês, *internal transformer station* - IT) consiste numa área na qual são instalados um ou mais transformadores de distribuição. Em vários países, as ITs são comumente instaladas em edificações verticais, no nível da via urbana, e constituem numa importante fonte de emissão de campos magnético de extrema baixa frequência para as residências localizadas nas suas adjacências (HAREUVENY *et al.*, 2011).

Kandel *et al.* (2013) concluíram que valores elevados de intensidade de campo magnético, resultado da presença de estações internas de transformadores, estão restritas à distância de 3 m dos cabos de baixa tensão e a altura aproximada de 2 m da estação, quando os valores de campo eletromagnético podem superar a marca de 0,4 μT , utilizada em estudos epidemiológicos. Em outras palavras, em construções verticais dotadas de estações internas de transformadores, os apartamentos localizados na vizinhança imediata dessas estações (normalmente localizados no primeiro andar das edificações) são os mais expostos à valores elevados de campo magnético de baixa frequência.

Algumas das associações epidemiológicas entre a ELF EMF e seu potencial carcinogênico podem ser explicadas pela utilização de um viés de seleção. O estudo epidemiológico internacional TransExpo (EMFS.INFO, 2018), que foca na intensidade do campo magnético em apartamentos localizados acima de estações internas de transformadores, tem como objetivo minimizar essa tendência a um viés de seleção, uma vez que avalia apartamentos nos quais os níveis de ELF EMF são significativamente mais altos do que em apartamentos localizados em andares diversos do mesmo edifício (KANDEL *et. al.*, 2013).

À luz da hipótese levantada por estudos epidemiológicos de que a leucemia infantil pode estar relacionada à exposição a campos magnéticos, há um consenso de que a redução das incertezas científicas nos estudos que mensuram os níveis de exposição crônica à ELF EMF é um objetivo relevante, suscitando novos estudos, diferentes dos realizados até agora (HAREUVENY *et al.*, 2011).

Pesquisadores que realizaram investigações, tendo o estudo internacional TransExpo como metodologia, constataram níveis de exposição dos indivíduos residentes em construções verticais adjacentes a estações internas de transformadores superiores aos níveis descritos como prejudiciais em diversos estudos epidemiológicos sobre o tema ($>> 0.4 \mu\text{T}$, na faixa de 50-60Hz). É o caso de Ilonen *et al.* (2008), Thuróczy *et al.* (2008), Hareuveny *et al.* (2011) e Huss *et al.* (2013).

Ilonen *et al.* (2008) realizaram medições de intensidade do campo magnético de extrema baixa frequência em apartamentos na Finlândia, localizados no primeiro andar (imediatamente acima de estações de transformadores) e em outros andares, ao longo de 24 h, na frequência de 40 a 1.000 Hz. Os valores foram registrados a cada 4 s, com um medidor de campo magnético Emdex Lite, posicionado a 0,5 m de altura em relação ao piso. Como resultado, verificaram que as medições locais de ELF EMF foram substancialmente mais elevadas nos apartamentos localizados imediatamente acima das estações de transformadores do que nos apartamentos de andares mais altos. Os valores registrados para apartamentos imediatamente acima das estações de transformadores superaram a marca $0,4 \mu\text{T}$ em 63% deles, enquanto apenas 3,3% dos apartamentos de andares diferentes exibiram tais valores.

Thuróczy *et al.* (2008) conduziram um estudo para caracterizar a exposição a níveis de campo magnético de extrema baixa frequência em apartamentos localizados diretamente acima de estações de transformadores internas, no mesmo piso e também em outros andares, em 31 edifícios. Todas as residências acima dos transformadores foram classificadas como "expostas" e todas as outras como "não expostas". As medições foram realizadas com base na metodologia utilizada por Ilonen *et al.* (2008), no intervalo de frequência de 40-800 Hz, durante o inverno, no horário da manhã (entre as 8 às 13h). O valor médio ELF EMF medido foi de $0,98 \mu\text{T}$ em apartamentos localizados imediatamente acima dos transformadores, $0,13 \mu\text{T}$ no mesmo piso e $0,1 \mu\text{T}$ em níveis mais elevados. O valor médio do ELF EMF medido foi

superior a $0,2 \mu\text{T}$ em 30 apartamentos acima de transformadores (97%), 4 (14%) no mesmo piso e 4 (13%) em pisos mais altos. Assim, concluíram que os apartamentos de edificações que possuem transformadores internos podem ser classificados de forma confiável como sendo de alta e baixa exposição, a partir da sua distância e localização em relação aos transformadores.

Hareuveny *et al.* (2011) avaliaram a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência em 41 apartamentos de 10 edifícios com ITS em Israel. As medições de intensidade de ELF EMF foram locais, na altura de 0,5m em relação ao piso, utilizando medidores EMDEX II, no intervalo de frequência de 40-800 Hz. A coleta de dados foi realizada durante a noite (normalmente entre 17:00 e 21:00 horas), que é o horário no qual esperava-se que a carga no transformador fosse máxima, nos apartamentos localizados nas adjacências das ITs e também mais afastados. Verificaram que o valor médio de ELF EMF foi de $0,40 \mu\text{T}$ em apartamentos localizados acima das ITS e variaram entre $0,06-0,12 \mu\text{T}$ em todos os demais apartamentos avaliados. Esses achados estão em conformidade com os relatados por Ilonen *et al.* (2008), tendo os autores, adicionalmente, sugerido que investigações futuras levem em consideração as disparidades existentes entre os países com relação aos níveis de exposição a ELF EMF.

Huss *et al.* (2013) realizaram medições locais de 24 h dos níveis de campo magnético de extrema baixa frequência em 35 apartamentos de 14 edifícios na Holanda, todos caracterizados pela presença de transformadores embutidos. Para tal, utilizaram um medidor de campo magnético Emdex Lite, posicionado a 0,5 m do piso, que registrava valores em intervalos de 3 a 4 s, na frequência de 40 a 800 Hz. Verificaram que apartamentos localizados diretamente acima ou adjacentes a uma estação de transformadores apresentaram níveis consideravelmente maiores de campos magnéticos do que os apartamentos mais distantes.

Adicionalmente, Huss *et al.* (2013) mensuraram o campo magnético de extrema baixa frequência ao qual indivíduos que aceitaram portar o equipamento durante 24 h estavam expostos. Os participantes envolvidos nas medições individuais passavam 72% do seu tempo no interior dos apartamentos, tempo que os autores estimaram como o que é gasto por crianças no interior de suas residências. A exposição individual total foi superior a $0,2 \mu\text{T}$ para 2 em cada 6 pessoas que estavam adjacentes

a uma sala de transformadores e para 1 em cada 18 pessoas que viviam em apartamentos mais afastados.

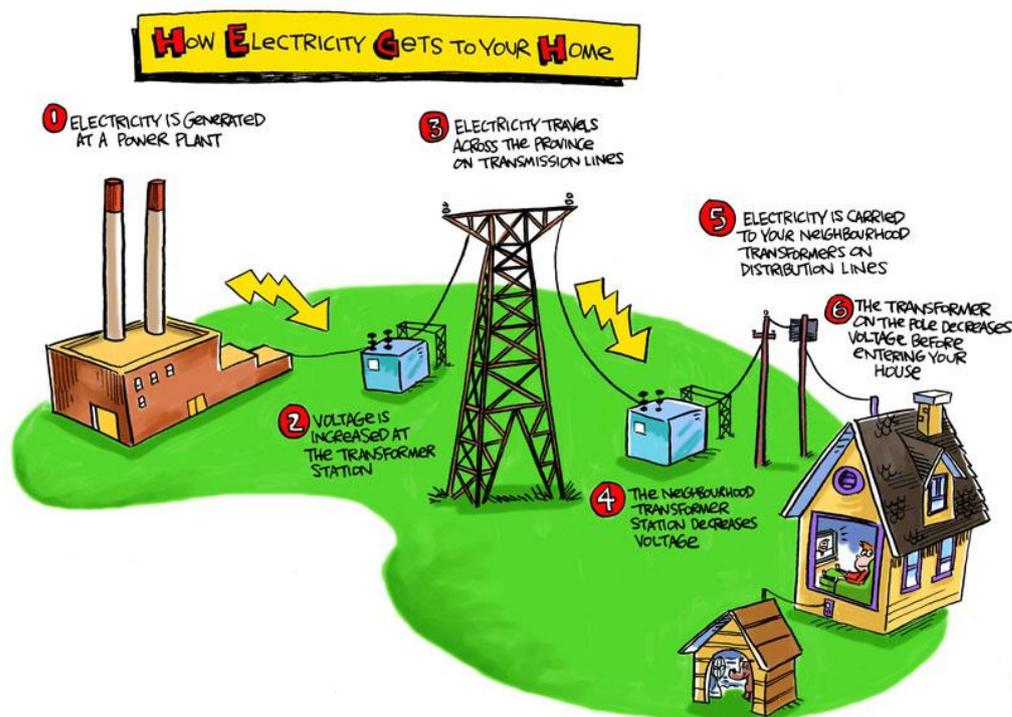
Huss *et al.* (2013) constataram que, embora os níveis medidos de exposição dos indivíduos em apartamentos localizados nas adjacências de estações de transformadores tenham sido aproximadamente 2 vezes menores em comparação com os valores locais, obtidos no interior desses apartamentos, ainda assim, verificou-se que o grau de exposição desses indivíduos é de $0,23 \mu\text{T}$, bem superior ao daqueles que vivem em apartamentos mais afastados das ITS, o qual se mantém em torno de $0,06 \mu\text{T}$.

De forma semelhante, STRUCHEN *et al.* (2015) avaliaram os níveis de ELF EMF aos quais um grupo de crianças estavam expostas diariamente, por meio de medidas de intensidade de campo magnético individuais, realizadas durante 24 a 72 h, em cada uma delas. Para isso utilizaram modelos de regressão linear mista, usando o software estatístico R, concluindo que a exposição pessoal a ELF EMF é maior para crianças residentes nas adjacências de transformadores e que moravam ou frequentavam escolas localizadas a distâncias inferiores a 100 m de cabos de alta tensão, enquanto para os outros grupos avaliados não houveram diferenças substanciais.

2.3.2.2 Presença e distância de fios e cabos de alta tensão da rede elétrica

As linhas de transmissão são linhas de energia de alta tensão usadas para transportar energia elétrica de forma eficiente em longas distâncias. Normalmente, as linhas se estendem de usinas geradoras de energia para centros consumidores, sejam núcleos urbanos ou grandes plantas industriais. Concessionárias urbanas utilizam linhas de distribuição de baixa tensão para fornecer energia elétrica para casas e empresas (Figura 3) (LEE *et al.*, 1996).

Figura 3 – Esquema de um sistema de distribuição de energia elétrica.



Fonte: 33 WAYS TO SAVE THE WORLD, 2010.

Os potenciais efeitos para a saúde pública da exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência provenientes das linhas de energia de alta tensão próximas são objeto de um longo debate sobre a saúde ambiental. Frequentemente são levantados questionamentos a respeito desses efeitos quando as pessoas planejam comprar ou vender imóveis perto de linhas de transmissão. Algumas questões também surgem quando novas linhas de transmissão e subestações são propostas. Muitas dessas questões lidam com os possíveis efeitos elétricos sobre a saúde das pessoas devido à existência dessas instalações (PORSIUS *et al.*, 2015).

Draper *et al.* (2005) estudaram a possível associação entre a leucemia infantil e a distância da residência nas quais as crianças diagnosticadas nasceram às linhas de alta tensão no Reino Unido. Em comparação com crianças que viviam a mais de 600 m da linha de alta tensão ao nascer, crianças que viviam dentro de 200 m apresentavam um risco relativo de 1,69, enquanto aqueles que viveram entre 200 e 600 m tiveram um risco relativo de 1,23. Entretanto, devido à verificação de uma relação de dependência da exposição a campos magnéticos de extrema baixa

frequência maior com os indivíduos selecionados do que com os casos de leucemia em si, apontou-se a possível ocorrência de viés de seleção.

Kheifets *et al.* (2010) realizaram uma análise combinada com base em dados primários de 10 estudos para avaliar se os resultados combinados indicavam a existência de uma associação entre exposição a ELF EMF gerados por linhas de energia próximas a residências e o desenvolvimento de tumores cerebrais na infância. Entretanto, não verificaram aumentos estatisticamente significativos nem detectaram um padrão consistente sugestivo de uma associação entre o risco de câncer cerebral na infância e os valores de exposição residencial ao ELF EMF.

Com base no estudo realizado por Draper *et al.* (2005), Kheifets *et al.* (2015) desenvolveram um design de estudo de caso na Califórnia para examinar a associação entre o risco de leucemia infantil e a distância do domicílio de nascimento à linhas de transmissão de alta tensão presentes nas adjacências. O objetivo do estudo foi demonstrar a metodologia desenvolvida com base em um estudo piloto que visou minimizar o viés e melhor avaliar a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência. Os autores desenvolveram um plano de análise com um total de 5788 casos de leucemia infantil disponíveis, mais um grupo de indivíduos controle, tendo incluído em sua pesquisa a distância de 2000 m entre a residência dos indivíduos, bem como os cabos de transmissão de energia e linhas de baixa tensão.

Com base na metodologia desenvolvida por Draper *et al.* (2005), Wunsch-Filho *et al.* (2011) calcularam a distância entre os domicílios dos participantes de um estudo que visou avaliar o efeito da exposição a ELF MF sobre a ocorrência de leucemia linfocítica aguda (ALL) em crianças no estado São Paulo, às linhas de energia mais próximas de 88, 138, 230, 345 ou 440 quilovolts (kV). Essa investigação restringiu-se às crianças que habitavam a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), porque esta era a única região do estado onde os mapas da rede elétrica estavam disponíveis. Observaram o aumento do risco de ALL em crianças que moram a menos de 50 m das linhas de transmissão, para distâncias inferiores a 100 m e também entre 100 e 200 m. A maioria das linhas de transmissão próximas a estas residências era de 88 kV, entretanto, os autores enfatizaram que estas são geralmente localizadas em áreas com alta densidade populacional, de modo que o risco observado pode ter sido devido a outros fatores, como a exposição ao benzeno produzido pelo tráfego de veículos.

Em estudos de avaliação do campo magnético envolvendo um grupo de 172 crianças entre 5 e 13 anos, Struchen *et al.* (2015) constataram que aquelas que viviam ou frequentavam escolas localizadas a menos de 100 metros de uma linha de energia de alta tensão ou que moravam numa residência diretamente adjacente a um transformador externo apresentaram, respectivamente, valores de exposição pessoal a ELF EMF de cerca de 3 e 2,5 vezes maior em comparação com os as crianças que viviam a uma distância superior a 100 m e inferior a 200 m e acima de 200 metros de fios de alta tensão, além das crianças que não pertenciam a nenhum dos grupos anteriormente mencionados (grupo "controle").

Porsius *et al.* (2015) avaliaram a resposta dos indivíduos, em termos de sintomas de saúde, que viviam a até 2 km de distância de um cabo de transmissão de energia de alta tensão recentemente instalado, na Holanda. Constataram que os residentes que vivem mais perto da linha relataram, durante a construção, uma crença mais forte de que a presença da mesma foi a responsável pelos sintomas de saúde cognitiva e somática (por exemplo, problemas de concentração, dores de cabeça) percebidos. Entretanto, os sintomas relatados por estes residentes próximos foram semelhantes aos relatados pelos que viviam mais afastados. Concluíram, assim, que a percepção de que surgiu um novo risco ambiental na área com a instalação da linha refletiu no aumento percebido nas crenças causais e nos sintomas.

2.3.2.3 Altura do apartamento em relação ao nível da via urbana

Estudos têm demonstrado (ILONEN *et al.*, 2008; THURÓCZY *et al.*, 2008; HAREUVENY *et al.*, 2011; HUSS *et al.*, 2013; KANDEL *et al.*, 2013) que apartamentos localizados diretamente acima de estações de transformadores internos comumente apresentam níveis de exposições que excedem 0,4 μ T. Tem-se mostrado que, com nível razoavelmente baixo de erros de classificação de exposição, através da localização dos apartamentos de uma edificação em relação a estação de transformadores internos da mesma é possível classificar os apartamentos em duas categorias: “expostos” e “não expostos”.

Dessa forma, é viável desenvolver estudos que considerem uma classificação de duas categorias de exposição baseada no fato de um sujeito viver ou não diretamente acima de uma estação transformadora. Lançar mão de informações

adicionais sobre as características estruturais das estações transformadoras podem permitir uma redução adicional do erro de classificação (OKOKON, E. O. *et al.*, 2014).

Em investigações que visem a detecção da existência de um possível efeito da presença de transformadores internos nos níveis de exposição a ELF EMF recomenda-se o uso de uma classificação simples de duas categorias, se não for possível levantar dados sobre as configurações do transformador. No entanto, o tipo e a localização dos condutores de baixa tensão desses transformadores podem gerar um gradiente de exposição, de modo os dados referentes as características estruturais dos transformadores, sempre que disponíveis, devem ser aplicados (OKOKON, E. O. *et al.*, 2014).

Röösli *et al.* (2011) desenvolveram um método de avaliação de exposição que classifica apartamentos em três categorias de exposição de ELF EMF, com base na sua localização em relação a estação de transformadores internos, a saber: os apartamentos localizados diretamente acima ou que dividiam uma parede com a IT foram definidos como de tipo "A"; os apartamentos localizados no mesmo andar dos apartamentos do tipo "A" ou diretamente acima deles foram designados como do tipo "B"; e os demais apartamentos de outros andares da edificação, selecionados aleatoriamente, constituíram o tipo "C". Verificaram que o tipo "A" apresentou média exposição de 0,59 μT , o tipo "B" de 0,14 μT e os de tipo "C" 0,07 μT , concluindo que a classificação da exposição com base na localização do apartamento com relação à IT é viável.

2.3.3 Fatores inerentes ao nível edifício

Diferentemente dos níveis ambiente e apartamento, os quais são influenciados por fontes artificiais geradoras de campo magnético de extrema baixa frequência, o nível edifício é afetado pela morfologia urbana, a qual tem potencial para elevar os níveis ELF EMF do entorno.

A morfologia urbana é considerada nesta pesquisa por refletir não apenas o processo de urbanização que resultou na estruturação das ruas, bairros e cidades, sobretudo das capitais, em que foram avaliados os níveis de ELF EMF; mas também por seu impacto nas edificações variar de acordo com o grau de ocupação dos espaços circunvizinhos.

Como resultado do processo de urbanização que se intensificou nas últimas décadas e tem gerado mudanças significativas nas formas espaciais urbanas (Miyazaki, 2013), o processo de verticalização aumenta a superfície de contato exposta a radiação e, conseqüentemente, gera um aumento de absorção de radiação solar. Além disso, provoca a diminuição da velocidade média dos ventos, devido ao aumento da rugosidade urbana (FERREIRA, 2014).

Tratar os aspectos relacionadas ao entorno das edificações possibilita avaliar quais os efeitos da ocupação urbana nos níveis de radiação não ionizante de extrema baixa frequência medidos no interior das residências.

2.3.3.1 Densidade de construções

Todos as pessoas, através da experiência cotidiana de olhar o que as cerca, são capazes de perceber o modo como a maior ou menor concentração de construções ou atividades num determinado lugar influencia o tipo e a qualidade da vida que nele se pode desfrutar. Essa qualidade tende a deteriorar-se quando a situação se aproxima de um dos extremos de concentração ou de rarefação (CUNHA, 2017).

Quando não é realizado o planejamento urbano, deixando-se de levar em consideração a morfologia urbana, pode ocorrer a grande concentração de edificações e espaços construídos, que pode resultar em níveis de radiação mais elevados, devido ao aumento da área de absorção da radiação solar e conseqüente elevação da temperatura (FERREIRA, 2014).

Portanto, nesse contexto, a densidade de construções pode ser entendida como o número de edificações adjacentes a cada edifício cujos apartamentos foram acessados para a realização de medições de nível de campo magnético de extrema baixa frequência. Pode variar entre 0, situação na qual não há qualquer construção circundante e 4, quando as imediações são totalmente ocupadas por construções.

2.3.3.2 Presença de edifícios multipavimentos

As cidades apresentam no seu interior uma variedade muito grande de tipos de superfícies, com diferentes revestimentos e capacidades de armazenar e refletir calor. Estas superfícies, por sua vez, estão distribuídas ao longo do tecido urbano de forma

concentrada, geralmente nas áreas centrais, com alta verticalização e fluxos de veículos e pessoas. Em conjunto com o metabolismo urbano (presença de água, poluentes, calor antropogênico), todos estes processos vão interferir na atmosfera urbana. Identificar o quanto eles influenciam isoladamente, hierarquicamente e em conjunto é uma questão de interesse (FERREIRA, 2014).

A predominância de edifícios de poucos pavimentos favorece a ventilação, e o espaçamento das edificações de gabarito mais elevado permite a passagem de brisas (FERREIRA, 2014). Do contrário, a presença de edifícios multipavimentos, pouco espaçados, mantém a área que ocupam com baixa circulação de ar.

Tomitsch, Dechant e Frank (2009) estudaram se o tipo de residência (apartamentos ou casas) e o tipo de área (urbana ou rural) resultam em diferentes intensidades de ELF EMF na frequência de fornecimento de eletricidade (50 Hz). Constataram que tanto em áreas urbanas quanto em apartamentos os níveis de ELF EMF foram significativamente maiores do que em residências rurais e casas. Segundo os autores, uma única casa normalmente tem menor consumo de energia do que uma habitação com vários andares, resultando em níveis mais baixos de ELF EMF, e as diferenças verificadas entre territórios urbanos e rurais são reflexo da presença de um número maior de residência do tipo multipavimentos no meio urbano.

Por conseguinte, medir a altura média das construções circunvizinhas é uma forma de detalhar as condições de geometria urbana às quais cada edificação está submetida, o que permite identificar a presença de estações de transformadores e demais fontes emissoras de ELF EMF em edifícios vizinhos, que podem impactar nos níveis mensurados no interior dos apartamentos avaliados.

2.3.3.3 Distância média das construções adjacentes

Não apenas a presença de edificações multipavimentos, mas também a proximidade delas até a habitação de interesse é um aspecto determinante, pelo fato de determinar a área de absorção da radiação, podendo gerar um aumento de temperatura quanto maior for a quantidade de edificações desse tipo nas vizinhanças (FERREIRA, 2014).

Além disso, quanto mais próximas entre si são as edificações, maior também será a proximidade das fontes emissoras de ELF EMF presente em cada uma delas,

com potencial para elevar os níveis de ELF EMF no interior das residências que as constituem.

Uma forma de avaliar e categorizar o grau de distanciamento entre as construções que constituem as redondezas de uma edificação é o fator de visão do céu.

2.3.3.3.1 Fator de visão do céu

O fator de visão do céu (FVC) é um parâmetro adimensional também chamado de fator de configuração ou fator angular. Ele indica uma relação geométrica entre a Terra e o céu e representa uma estimativa da área visível de céu. O céu, por apresentar normalmente sua temperatura inferior à da superfície terrestre, é um elemento essencial no balanço de energia (SOUZA *et al.*, 2010).

O FVC consiste na razão entre a porção de céu visível a partir de um determinado ponto e o céu potencialmente disponível a partir deste ponto. Mas, em termos geométricos, qualquer edificação, elemento ou equipamento urbano pertencente ao plano do observador posicionado na camada intra urbana representa uma obstrução à abóbada celeste. De modo que a projeção dessa edificação na abóbada celeste é a fração do céu por ela obstruída para o observador (MINELLA; ROSSI; KRÜGER, 2009; SOUZA *et al.*, 2010).

O valor do FVC varia de 0 (zero) até 1 (um), sendo que o valor 1 corresponde a uma área sem qualquer obstáculo que se interponha entre o ponto escolhido e o céu. Na prática, o valor numérico do FVC é sempre menor que a unidade, pois dificilmente se encontram regiões urbanas que não apresentem nenhuma obstrução do horizonte (MINELLA; ROSSI; KRÜGER, 2009; SOUZA *et al.*, 2010).

Por estabelecer que quanto mais obstruído for um local na área urbana, maior será a obstrução do céu, o FVC revela que, neste caso, maior será a dificuldade do ambiente em dispersar para a atmosfera a energia térmica armazenada. Este processo ocorre porque a verticalização, associada à morfologia urbana, aumentam a superfície de contato exposta a radiação, ocasionando aumento da absorção da radiação solar (FERREIRA, 2014).

A estimativa do fator de visão do céu pode ser feita por processos analíticos, por fotografia, por processamento de imagens, por diagramas ou por gráficos. Tanto pelo

processo analítico, como pelo uso de diagramas e gráficos, é necessária uma base de dados angulares relativos às edificações existentes no entorno urbano, sendo esta uma das problemáticas mais constantes nesse tipo de determinação. No caso de fotografias e processamento de imagens, são necessários equipamentos específicos, podendo-se contar com uma câmera, com possibilidade de nela ser acoplada uma lente do tipo “olho de peixe” com abertura de 180° (SOUZA *et al.*, 2010).

2.4 Aplicações dos modelos de regressão hierárquica

Na linguagem cotidiana, hierarquia pode ser definida como “escala de autoridade num grupo, classe, etc.” (HOUAISS, A.; VILLAR, M. S., 2008). Ou, em outras palavras, como uma “classificação, crescente ou decrescente, segundo uma escala de valor, de grandeza ou de importância.” (HOUAISS, A.; VILLAR, M. S., 2008). Para esta última definição, o “valor” ou “importância” pode ser generalizada como simplesmente uma determinada ordem a partir da qual visualizamos um grupo de itens.

Segundo Stryhn e Christensen (2014), o fato do termo “Hierarquia” apresentar uma definição tão ampla, a expressão “modelo (estatístico) hierárquico” é usado em três situações distintas: para considerar o agrupamento, para investigar a variabilidade e separar equações preditivas em diferentes níveis hierárquicos (análise multinível), e em uma estrutura Bayesiana para envolver múltiplas camadas de dados ou informações prévias.

Esta dissertação trata de modelos hierárquicos (multiníveis) de regressão, descritos por Fávero *et al.* (2009) como expressões matemáticas em que cada um dos níveis da estrutura de dados é representado formalmente pelo seu próprio submodelo, que apresenta as relações estruturais e a variabilidade residual que ocorrem naquele nível.

Uma vez que sujeitos pertencentes ao mesmo nível hierárquico darão origem a observações que não podem ser consideradas independentes entre si, as estruturas hierárquicas de dados estão relacionadas à violação dos pressupostos de independência envolvidos em modelos estatísticos clássicos, como os de regressão linear (STRYHN; CHRISTENSEN, 2014).

Além disso, os modelos lineares ordinários são geralmente destinados a um único nível de dados e satisfazem às premissas básicas de linearidade, distribuição

normal, homogeneidade de variância e independência. No entanto, geralmente o alinhamento dos dados em vários níveis não permite que as duas últimas hipóteses sejam satisfeitas (ZHANG; JIN; ZHU, 2018). Devido à essa combinação de variáveis aleatórias em sequência, os modelos hierarquizados são comumente referidos como modelos clássicos de efeitos aleatórios (KÉRY; ROYLE, 2016).

Portanto, os modelos multinível representam uma generalização dos métodos de regressão, podendo ser usados para diversas aplicações, dentre elas a inferência causal a partir de experimentos e estudos observacionais. Em estudos nos quais os grupos de elementos ou sujeitos considerados sigam uma organização, esse tipo de modelo apresenta as seguintes vantagens (FÁVERO *et al.*, 2009):

- Permitem considerar as diferenças de contexto, uma vez que as observações e os cenários diferem de um caso para outro, de forma a não fazer agregações estatísticas e nem limitar os contextos a vagas generalizações;
- Possibilitam a consideração das heterogeneidades individuais, e não somente das diferenças entre os contextos;
- Não requerem uma compilação de dados equilibrada, de modo que pode haver diferentes números de observações para cada nível superior.

Lindley (2001) exemplifica a atribuição de níveis, nos quais estão distribuídas as variáveis, mencionando grupos de alunos (primeiro nível), presentes em salas de aula (segundo nível), as quais compõem a escola (terceiro nível).

O desenvolvimento de modelos de regressão multiníveis a intensidade de ELF MF mensurada em residências verticais permitem esclarecer qual a contribuição dos fatores associados ambientes, aos respectivos apartamentos e, em última instância, à própria edificação na variação dos valores de ELF MF.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo abordou e discutiu os principais conceitos sobre radiação não ionizante, elucidando as discussões trazidas pela literatura sobre o tema, assim como as diretrizes definidas por órgãos reguladores internacionais e legislações nacionais que limitam a exposição do público a esse tipo de radiação eletromagnética. Foram abordadas também os aspectos inerentes ao ambiente, apartamento e edifício com

potencial para interferir nos níveis de campo eletromagnético de extrema baixa frequência.

Partindo do que foi discorrido no presente capítulo, percebe-se que na literatura acessada por meio das bases de dados Periódicos CAPES, Web of Science e Scopus revelou uma série de estudos epidemiológicos, voltados para a investigação do efeito da exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência a saúde dos indivíduos, sobretudo da hipótese de associação com o desenvolvimento de leucemia infantil. Além disso, o único estudo identificado no Brasil foi realizado por Wunsch-Filho *et al.* (2011), que ressaltaram que o seu estudo era o pioneiro na América do Sul, sobre o efeito da exposição ao ELF MF no desenvolvimento de leucemia infantil, já realizado em muitos países há décadas.

Há outras pesquisas que analisam os níveis de campos magnéticos de extrema baixa frequência emitidos por fontes fixas, sobretudo estações de transformadores internos e linhas de transmissão.

Adicionalmente, não foram encontrados estudos que utilizam modelos de regressão hierárquica para caracterizar os níveis de ELF EMF quanto às variáveis associadas aos ambientes, aos apartamentos e às edificações.

A combinação dessas variáveis em sequência nos modelos hierarquizados permite esclarecer quanto da exposição a campos eletromagnéticos de extrema baixa frequência deve-se às peculiaridades do próprio ambiente do qual foram mensurados, à adjacência a transformadores e a altura do apartamento ou às características do entorno da edificação, como o número, a distância e a altura média de construções presentes nas vizinhanças.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

A seguir é descrita a metodologia utilizada para execução da pesquisa, descrevendo desde a etapa de levantamento bibliográfico até a coleta de dados e os procedimentos metodológicos que foram desenvolvidos.

3.1 Classificação da pesquisa

Esta pesquisa apresenta uma abordagem quantitativa, uma vez que a revisão da literatura foi fundamental para a busca pelas variáveis identificadas como significativas, as quais foram observadas e medidas, com a finalidade de explicar o seu efeito na variável dependente (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013, Cap.1). Com relação à sua natureza, a pesquisa é classificada como aplicada, pois visa gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais (GERHARDT; SILVEIRA, 2009, Und. 2).

Com relação aos seus objetivos, a pesquisa caracteriza-se como exploratória, uma vez que tem como objetivo promover a familiarização com um assunto ainda pouco explorado, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses (GIL, 2007).

Quanto aos procedimentos, a pesquisa é experimental, uma vez que foi determinado como objeto a consideração dos níveis de radiação não ionizante de baixa frequência, sendo selecionadas as variáveis que determinam esses níveis e definiu-se os procedimentos a serem tomados como forma de controle e de observação das variáveis a fim de estabelecer os efeitos que elas produzem no objeto (SAMPIERI; COLLADO; LUCIO, 2013, Cap.3).

3.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos realizados organizam-se em duas etapas. A primeira consiste como foram coletados os dados, que envolveu a realização de medições de campo magnético de extrema baixa frequência, através de um dispositivo analisador de espectro magnético previamente calibrado; assim como a mensuração das variáveis apresentadas no Quadro 2. A segunda etapa apresenta as

especificações dos modelos hierárquicos de regressão, os processos de suas construções, a análise da variação da ELF MF a 60 Hz atribuída aos níveis hierárquicos, a correlação intraclasse e os critérios de avaliação da qualidade de ajuste dos modelos para às suas validações.

As variáveis testadas nos modelos multiníveis foram escolhidas segundo suas características, e dividem-se em três eixos fundamentais: ambientes, apartamentos e edificações, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 – Variáveis do estudo.

Nível	Variáveis
Ambiente	Tipo de ambiente avaliado (sala, cozinha, sala-cozinha, quarto)
Apartamento	Adjacência a transformadores internos; altura do apartamento em relação a via urbana;
Edificação	Densidade de construções (nº de edificações nas vizinhanças imediatas); distância média das construções presentes nas vizinhanças imediatas até a habitação considerada; presença de edifícios multipavimentos (altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas); altura do edifício.

3.3 Primeira etapa: coleta de dados

Essa dissertação verifica se os níveis de campo magnético de extrema baixa frequência podem ser explicados pelo tipo de ambiente, pela característica de adjacência ou não do apartamento, pelo número de edificações presentes nas vizinhanças imediatas, pela distância média das construções presentes nas vizinhanças até a edificação considerada, pela altura média das construções presentes nas vizinhanças, pela altura do apartamento (que consiste na distância do apartamento até o piso térreo) e pela altura da edificação.

Dessa forma, os tópicos a seguir descrevem as etapas de mensuração dos níveis de ELF MF (variável dependente do modelo de regressão hierárquico) e de cada uma das variáveis anteriormente descritas (variáveis independentes), às quais estão associadas ao ambiente, apartamento e à edificação.

3.3.1 Níveis de campo magnético de extrema baixa frequência

Inicialmente efetuou-se a medição dos níveis de ELF MF no interior de apartamentos localizados no primeiro andar e em diferentes andares de edificações verticais, utilizando-se o medidor de espectro eletromagnético *Aaronia Spectran* NF-5035, devidamente calibrado, cujos valores foram recolhidos na unidade de microtesla (μT). O equipamento foi ajustado para o *span* de 120 Hz e frequência central de 60 Hz, resultando no intervalo de frequência de medição de 1 a 120Hz.

O aparelho foi mantido conectado a um notebook, no qual os registros foram efetuados em uma planilha do Office Excel. Com auxílio de um tripé de alumínio, o dispositivo foi posicionado a 0,5 m de altura em relação ao piso nos ambientes nos quais foi fixado, sempre que possível junto à porta de entrada dos mesmos, a fim de captar o campo magnético de baixa frequência propagado por todo o espaço ao longo do dia.

Tomando como base o método *Transexpo* utilizado em estudos de cunho epidemiológico a nível internacional (EMFs.info, 2018), o tempo padrão de medição utilizado na maior parte dos ambientes avaliados foi de 24 h. Priorizou-se a realização das mensurações nos fins de semana, tendo em vista que consistem nos dias em que os residentes permaneciam durante um tempo maior no interior dos ambientes.

Entretanto, também foi necessário realizar medições nos outros dias da semana, durante os quais os residentes precisavam ausentar-se para exercer atividades relativas ao trabalho e estudo. De acordo com o tempo disponibilizado pelos residentes para que fossem efetuadas as medições, foi necessário realizar um número menor de registros em alguns ambientes, tendo-se coletado os valores de ELF MF durante 4, 8, 12 e 16h.

3.3.2 Variáveis associadas aos ambientes

De acordo com o Quadro 2, o tipo de ambiente (quarto, cozinha, sala, sala-cozinha) no qual foram realizadas as medições de intensidade de ELF MF foi identificado como variável característica do nível ambiente.

O número de ambientes avaliados em cada apartamento foi preferencialmente de dois ou três, a depender do layout interno, da área, do número de acessos, bem como do número de cômodos de cada apartamento. Entretanto, em alguns casos foi

possível efetuar medições em um único ambiente, uma vez que esse foi o limite de tempo fornecido pelos residentes para tal.

Nas residências nas quais foi possível avaliar mais de um ambiente, optou-se por um quarto e cozinha, porém foram também selecionados um quarto e sala quando a residência apresentava um único acesso, ou quarto e sala-cozinha, nos casos em que os imóveis possuíam cozinhas e salas integradas. Em algumas residências foi possível realizar medições em três ambientes diversos: cozinha, sala e um quarto.

3.3.3 Variáveis associadas aos apartamentos

De acordo com o Quadro 2, a adjacência a transformadores internos e a altura do apartamento em relação a via urbana foram identificadas como variáveis características do nível apartamento.

Thuróczy *et al.* (2008) constataram que apartamentos em edificações com estação de transformadores internos podem ser classificados com segurança em categorias de alta e baixa exposição com base em sua localização em relação aos transformadores.

As residências participantes se localizam em cidades das regiões Centro Oeste, Norte e Nordeste do Brasil. Como todos os apartamentos fazem parte de edificações dotadas de transformadores internos localizados no piso térreo, cada um deles foi classificado como “adjacente” (1) ou “não adjacente” (0), a depender do andar em que se localizavam com relação aos transformadores. Desse modo, os apartamentos caracterizados como “adjacentes” e, conseqüentemente considerados como altamente expostos aos níveis de ELF MF produzidos por esta fonte fixa, foram todos aqueles localizados no primeiro andar das edificações. Os demais, localizados em quaisquer outros andares e, portanto, considerados como de baixa exposição aos níveis de ELF MF produzidos pelos transformadores, foram categorizados como “não adjacentes”.

3.3.4 Variáveis associadas às edificações

Com relação às variáveis identificadas como características das edificações, descritas no Quadro 2 (nº de edificações nas vizinhanças imediatas, distância média

das construções presentes nas vizinhanças imediatas até a habitação considerada, a altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas e altura da edificação de interesse), todas foram mensuradas com o auxílio do software *Google Earth Pro 2018*, através do qual foi possível ter uma visão tridimensional das construções e suas circunvizinhanças.

Uma vez que as edificações analisadas estão inseridas em terrenos retangulares, para definir a densidade de construções apreciou-se a presença de quaisquer construções presentes ao longo de todo o perímetro do terreno, o qual foi dividido em quatro quadrantes, cada qual referente a um dos lados (Figura 4). Assim, cada edifício poderia estar cercado por 1, 2, 3 ou 4 imóveis, a depender da existência ou não de uma ou mais áreas desocupadas, descampadas, verdes ou mesmo praças e espaços de uso público.

Figura 4 – Vista de cima da residência localizada no bairro de Cabro Branco, em João Pessoa.



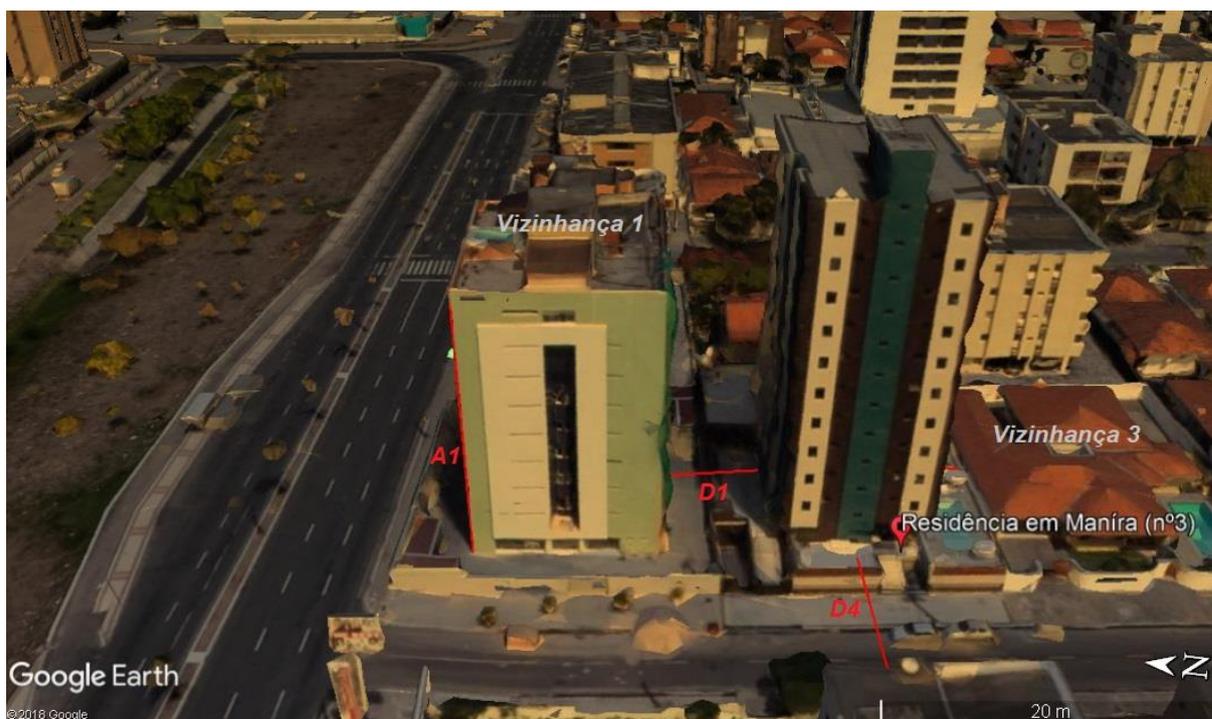
Fonte: *Google Earth Pro 2018*.

Uma vez identificadas as construções que constituíam as vizinhanças dos prédios envolvidos no estudo, mediu-se a distância horizontal do centro da habitação considerada até a aresta mais próxima de cada uma delas, conforme exemplificado na Figura 4 (na qual as distâncias foram identificadas segundo o quadrante

considerado). Após calcular as distâncias das quatro laterais, calculou-se a média das distâncias.

Seguindo um procedimento semelhante ao descrito para o cálculo das distâncias, mediu-se a altura, ou seja, a distância vertical da extremidade superior até o piso de cada uma das edificações, conforme Figura 5, presentes nas vizinhanças imediatas do prédio avaliado e, em seguida, obteve-se a média.

Figura 5 – Vista frontal da residência n^o3 localizada no bairro de Manaíra, em João Pessoa.



Fonte: Google Earth Pro 2018.

3.4 Segunda etapa: tratamento de dados

Após a coleta de dados, os níveis de intensidade de campo magnético para a frequência de 60 Hz, a qual compreende a frequência da rede elétrica local do Brasil, juntamente com as demais variáveis descritas no Quadro 2 associadas ao ambiente, ao apartamento e à edificação foram tabulados em planilhas do *Microsoft Excel 2016*, para cada uma das residências avaliadas.

Os procedimentos de análises dos dados foram realizados utilizando o software R Project 3.3.3 (GARCIA, 2016), no qual foram construídos modelos hierárquicos de

regressão para avaliar quanto as variáveis associadas aos níveis ambiente, apartamento e edifício influenciam na variação da intensidade de ELF MF.

3.4.1 Modelagem matemática de regressão hierárquica

Baseado na modelagem matemática desenvolvida por Soares e Mendonça (2003), os modelos utilizados para analisar o ELF EMF em residências verticais contêm quatro níveis hierárquicos, a saber: “medições” (1º nível) que foram realizadas em “ambientes” (2º nível), que, por sua vez, estão vinculados aos “apartamentos” (3º nível), os quais estão inseridos em “edifícios” (4º nível).

Os modelos multiníveis utilizados contêm um número de parâmetros que depende do número de variáveis e do número de níveis envolvidos. Construiu-se modelos de quatro níveis o que os tornam mais complexos devido ao número de parâmetros considerados. Os submodelos que compõe um modelo são construídos ao descrever os parâmetros do primeiro nível como função de variáveis do segundo nível, além do termo erro aleatório. As expressões do segundo nível são descritas através das variáveis e do erro associado ao terceiro nível e este, por sua vez, pelas variáveis e erro do quarto nível.

No primeiro nível hierárquico, “medições”, foram considerados apenas o efeito fixo do intercepto do submodelo (1) e o erro aleatório, que comporá o modelo hierárquico de regressão final.

$$y_{tijk} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (1)$$

Onde α_{0ijk} é o intercepto do submodelo (1) do nível 1 e π_{tijk} é a componente de erro aleatório associado a “medição”. Os índices t, i, j, k , representam cada unidade “medição”, “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente. O intercepto α_{0ijk} do nível 1 torna-se uma variável dependente do submodelo do nível 2, que é dado pela equação (2).

No segundo nível hierárquico, “ambiente”, foram considerados os efeitos fixos do intercepto e da variável do nível 2 do submodelo (2) e o seu erro aleatório, que comporá o modelo hierárquico de regressão final.

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} + \beta_{01jk} \cdot x_{ijk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (2)$$

Em que β_{00jk} é o intercepto do submodelo (2) do nível 2; ε_{0ijk} é a componente de erro aleatório do “ambiente” associado ao intercepto do nível 2; x_{ijk} é uma variável do nível 2 e β_{01jk} é o parâmetro associado à variável x_{ijk} .

Vale salientar que os termos β_{00jk} e β_{01jk} do submodelo do nível 2 são escritos pelas equações (3) e (4), respectivamente, que constituem os submodelos do nível 3.

No terceiro nível hierárquico, “apartamento”, foram considerados os efeitos fixos do intercepto e da variável do nível 3 apresentada nos submodelos (3) e (4) e os seus erros aleatórios, que comporão o modelo hierárquico de regressão final.

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + \theta_{001} \cdot w_{jk} + e_{00jk} \quad (3)$$

$$\beta_{01jk} = \theta_{010} + \theta_{011} \cdot w_{jk} + e_{01jk} \quad (4)$$

Em que θ_{000} é o intercepto do submodelo (3) do nível 3, w_{jk} é uma variável do nível 3, e_{00jk} é a componente de erro aleatório do “apartamento” associado ao intercepto do nível 3, e_{01jk} é a componente do erro aleatório do nível “apartamento” vinculado ao coeficiente de inclinação da variável w_{jk} .

No quarto nível hierárquico, “edifício”, foram considerados os efeitos fixos do intercepto e da variável do nível 4 apresentada nos submodelos (5) a (8) e os seus erros aleatórios, que comporão o modelo hierárquico de regressão final (12).

$$\theta_{000k} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \xi_{000k} \quad (5)$$

$$\theta_{001k} = \gamma_{0010} + \gamma_{0011} \cdot z_k + \xi_{001k} \quad (6)$$

$$\theta_{010k} = \gamma_{0100} + \gamma_{0101} \cdot z_k + \xi_{010k} \quad (7)$$

$$\theta_{011k} = \gamma_{0110} + \gamma_{0111} \cdot z_k + \xi_{011k} \quad (8)$$

Onde γ_{0000} é o intercepto do submodelo (5) do nível 4 (edifício), z_k é uma variável do nível 4, ξ_{000k} é a componente de erro aleatório associado ao intercepto do nível 4.

Substituindo as equações (5) a (8) nas equações (3) e (4), tem-se as equações (9) e (10).

$$\beta_{00jk} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \xi_{000k} + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0011} \cdot z_k w_{jk} + \xi_{001k} w_{jk} + e_{00jk} \quad (9)$$

$$\beta_{01jk} = \gamma_{0100} + \gamma_{0101} \cdot z_k + \xi_{010k} + \gamma_{0110} w_{jk} + \gamma_{0111} \cdot z_k w_{jk} + \xi_{011k} w_{jk} + e_{01jk} \quad (10)$$

Substituindo (9) e (10) na equação (2) obtém-se a expressão (11)

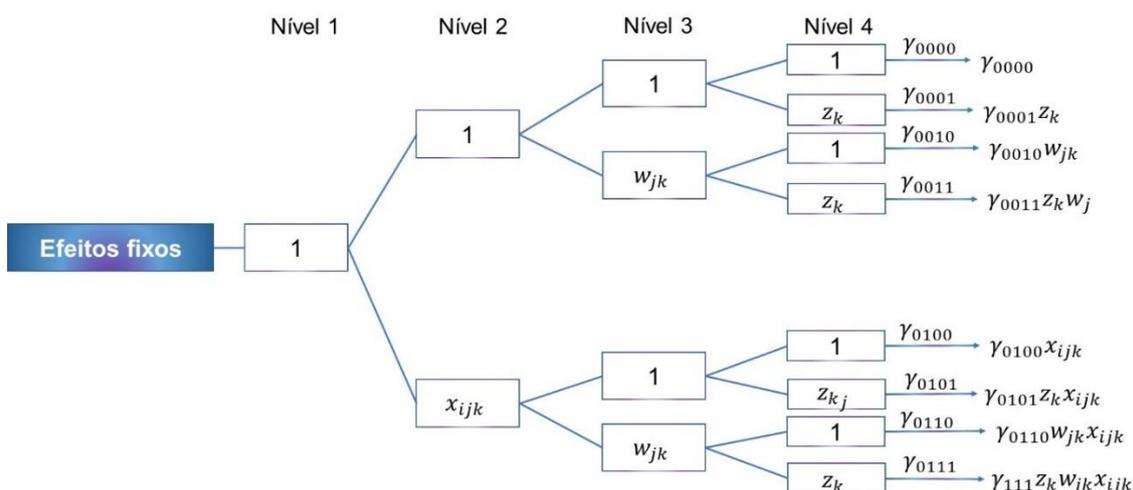
$$\begin{aligned} \alpha_{0ijk} = & \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \xi_{000k} + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0011} \cdot z_k w_{jk} + \xi_{001k} w_{jk} + e_{00jk} + \\ & + \gamma_{0100} x_{ijk} + \gamma_{0101} \cdot z_k x_{ijk} + \xi_{010k} x_{ijk} + \gamma_{0110} w_{jk} x_{ijk} + \gamma_{0111} \cdot z_k w_{jk} x_{ijk} + \xi_{011k} w_{jk} x_{ijk} + \\ & e_{01jk} x_{ijk} + \varepsilon_{0ijk} \end{aligned} \quad (11)$$

Por fim, substituindo a expressão (11) na equação (1), obtém-se a expressão (12) final do modelo de quatro níveis sem variável no primeiro nível.

$$\begin{aligned} y_{tijk} = & \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \gamma_{0011} \cdot z_k w_{jk} + \gamma_{0101} \cdot z_k x_{ijk} + \\ & + \gamma_{0110} w_{jk} x_{ijk} + \gamma_{0111} \cdot z_k w_{jk} x_{ijk} + \xi_{011k} w_{jk} x_{ijk} + \xi_{010k} x_{ijk} + \xi_{001k} w_{jk} + e_{01jk} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \\ & \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \end{aligned} \quad (12)$$

Observando a equação (12), quanto aos efeitos fixos (Figura 6), verifica-se que o termo γ_{0000} é o intercepto geral do modelo; γ_{0010} é o parâmetro fixo associado à variável w_{jk} ; γ_{0001} é o parâmetro fixo associado à variável z_k ; γ_{0100} é o parâmetro fixo associado à variável x_{ijk} ; o coeficiente γ_{0011} constitui o efeito fixo de interação entre as variáveis do terceiro e quarto níveis; o termo γ_{0101} expressa o efeito fixo de interação entre as variáveis do segundo e quarto níveis; γ_{0110} é o efeito fixo de interação entre as variáveis do segundo e terceiro níveis; o termo γ_{0111} é o efeito fixo de interação entre as três variáveis, x_{ijk} , w_{jk} e z_k .

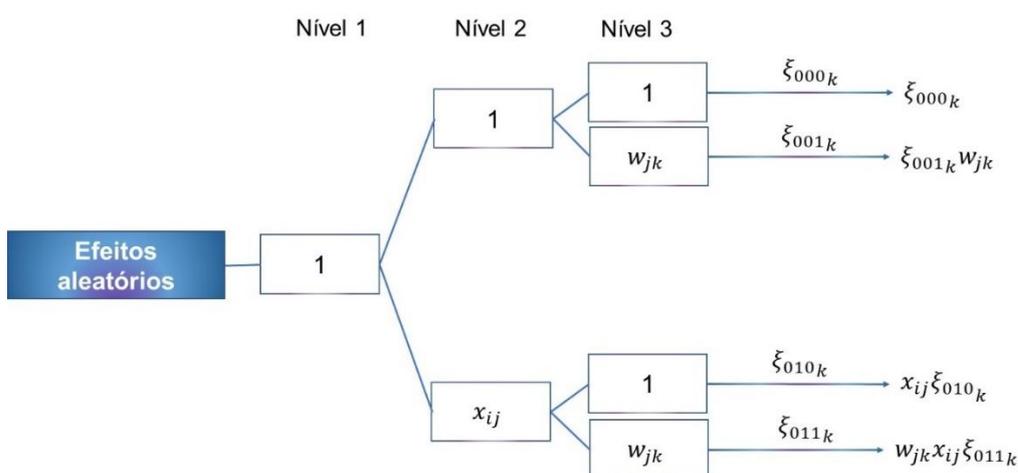
Figura 6 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Quanto aos efeitos aleatórios (Figura 07), através da equação (12) identifica-se que o termo ξ_{001} representa o efeito aleatório da variável do nível 3; os coeficientes ξ_{010}, e_{01} expressam os efeitos aleatórios da variável do nível 2; e o termo ξ_{011} consiste no efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 2 e 3. Os coeficientes $\pi_{tijk}, \varepsilon_{0ijk}, e_{00jk}, \xi_{000k}$, por sua vez, constituem as componentes do erro aleatório associados aos níveis “medição”, “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente, relativos a fatores desses níveis que não estão sendo considerados no modelo multinível.

Figura 7 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

No item 03 da seção de Anexos descreve-se em detalhes a estrutura matemática de modelos hierárquicos de regressão de quatro níveis obtidos quando considera-se uma variável qualquer no nível 1, “medições”.

Ressalta-se que a estimação dos coeficientes fixos é realizada através do método de mínimos quadrados generalizados, e a estimação das componentes de variância é realizada através dos métodos de máxima verossimilhança plena e máxima verossimilhança restrita. A medida de ajuste do modelo utilizada será a estatística *deviance*, definida por $D = -2 \text{ LOG } (L)$, onde L é o valor da função de verossimilhança (maximizada segundo os valores dos parâmetros do modelo) nos valores observados da variável dependente e das variáveis explicativas (GOLDSTEIN, 1995; BRYK e RAUDENBUSH, 1992).

3.4.2 Construção dos modelos multiníveis

Foi utilizado o software R Project 3.3.3 para construir os modelos matemáticos, o qual permite ajustar modelos lineares e lineares generalizados de efeitos mistos. A partir dos dados coletados, realizando as tabulações necessárias, construiu-se os modelos matemáticos multiníveis. Como em modelos multiníveis quanto maior o número de parâmetros fixos, de níveis envolvidos e de efeitos aleatórios considerados, maior a complexidade do modelo construído, optou-se por testar inicialmente modelos menos complexos e, partindo-se dos resultados verificados com esses modelos, aumentar o nível de complexidade, implementando novos modelos.

A equação (12) constitui o modelo hierárquico de quatro níveis contendo todos os efeitos fixos e aleatórios. Os modelos multiníveis construídos se baseiam nessa expressão, diferenciando-se pelo número de efeitos fixos e aleatórios considerados. Foram testados inicialmente os modelos hierárquicos com efeito aleatório apenas no intercepto, por serem mais simples. Isso significa que os únicos termos aleatórios que constam no modelo hierárquico de quatro níveis, tal qual o mostrado pela equação (12), são os resíduos dos níveis “medição”, “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, ou seja, π_{tijk} , ε_{0ijk} , e_{00jk} e ξ_{000k} . Os termos aleatórios das variáveis do nível 2 (ξ_{010} , e_{01}) e 3 (ξ_{001}) e o termo aleatório de interação entre essas variáveis (ξ_{011}) não compõem a expressão do modelo hierárquico de menor complexidade, conforme expressão (13).

$$y_{tijk} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \gamma_{0011} \cdot z_k w_{jk} + \gamma_{0101} \cdot z_k x_{ijk} + \gamma_{0110} w_{jk} x_{ijk} + \gamma_{0111} \cdot z_k w_{jk} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (13)$$

A equação (13) considera efeitos aleatórios em todos os quatro níveis. Entretanto, iniciou-se elaborando modelos ainda menos complexos, os quais apresentam menor número de termos aleatórios, e, portanto, de menor complexidade. Seguindo essa ordem, os primeiros modelos construídos apresentam efeitos aleatórios apenas no intercepto em dois dos quatro níveis, denotadas pelas seguintes equações: (14), possui termos erros aleatórios dos níveis 1 e 4; (15), apresenta erros aleatórios dos níveis 1 e 3; e (16), contém erros aleatórios dos níveis 1 e 2. Em seguida, foram elaborados modelos com efeitos aleatórios no intercepto em três dos quatro níveis, dados pelas seguintes equações: (17), possui erros aleatórios dos níveis 1, 3 e 4; (18), apresenta erros aleatórios dos níveis 1, 2 e 3; e (19), contém erros aleatórios dos níveis 1, 2 e 4. O modelo com erros aleatórios no intercepto em todos os quatro níveis dado pela equação (10), previamente apresentada.

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \xi_{000k} \quad (14)$$

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + e_{00jk} \quad (15)$$

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (16)$$

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (17)$$

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} \quad (18)$$

$$y_{tijk} = ELF MF_{60Hz} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + \xi_{000k} \quad (19)$$

3.4.3 Seleção das variáveis dos modelos multiníveis

As variáveis que permanecem ou não no modelo dependem do nível de significância dos parâmetros fixos e relacionados. Através do teste de *t-student*, se o parâmetro associado à variável apresenta $p\text{-valor} > 0,05$, esta variável é retirada do modelo, caso contrário, permanece no modelo.

A fim de evitar viés, recorreu-se ao procedimento de seleção incluindo as seguintes etapas: retirada de umas das variáveis de forma aleatória e obtenção de um novo modelo, a partir do qual seriam identificadas outras variáveis cujo $p\text{-valor}$ relacionado ao coeficiente de inclinação fosse superior a 0,05, as quais seriam removidas uma a uma, até que se obtivesse um modelo contendo apenas parâmetros fixos significativos.

Os modelos hierárquicos de regressão linear, por se tratarem de modelos de efeitos mistos (fixos e aleatórios), devem obedecer a alguns pressupostos rígidos para terem validade. Esses pressupostos dizem respeito aos resíduos (erros de valores esperados de ELF MF em relação aos valores de ELF MF observados). Alguns deles são:

- Normalidade dos resíduos;
- Homocedasticidade dos resíduos;

O resíduo padronizado consiste no resíduo ordinário dividido por um fator de correção (que é a estimativa da variância desses resíduos ordinários) que considera o erro-padrão (estimativa de incerteza dos parâmetros do modelo) e alavancagem (influência das observações na estimativa dos parâmetros).

Para validar os modelos obtidos ao final do procedimento de seleção de variáveis, realizou-se o procedimento de diagnóstico, por meio da análise dos pressupostos supracitados. Nesse procedimento pode ocorrer de critérios como a normalidade e homocedasticidade dos resíduos não serem obedecidos devido à variância não constante e a não aproximação da curva normal. Nesses casos, pode-se conduzir uma transformação aplicando o logaritmo na variável dependente (THOMAS, 2009, p. 90).

Em seguida, foram avaliados os efeitos aleatórios por meio da análise das variações de ELF MF a 60 Hz que estão vinculadas a cada um dos níveis envolvidos.

3.4.4 Variação da ELF MF a 60 Hz atribuída aos níveis hierárquicos e correlação intraclasse

Sendo y_{tijk} a variável dependente dos modelos hierárquicos de regressão, que corresponde à radiação não ionizante na frequência de 60 Hz, a variância total de y_{tijk} pode ser decomposta como a soma das variâncias de todos os níveis considerados (BERRIDGE; CROUCHLEY, 2011, p.51), tal que:

$$var(y_{tijk}) = var(ELF MF_{60Hz}) = var(nível 1) + var(nível 2) + var(nível 3) + var(nível 4) \quad (20)$$

Que pode ser escrita de forma mais simplificada, conforme a equação (21).

$$var(y_{tijk}) = var(ELF MF_{60Hz}) = \sigma_{nível 1}^2 + \sigma_{nível 2}^2 + \sigma_{nível 3}^2 + \sigma_{nível 4}^2 \quad (21)$$

Todos os modelos hierárquicos de regressão elaborados exibem como resultado, além dos parâmetros fixos, os valores de desvio padrão (σ) do erro de cada nível. Elevando esses valores ao quadrado obtém-se as variâncias, que consistem na variação do ELF MF a 60 Hz que não é explicada pelas variáveis e que são inerentes a cada um dos quatro níveis considerados.

Os modelos de natureza multinível envolvem o reconhecimento da existência de diferenças entre as unidades do nível medições (nível 1), do nível ambientes (nível 2), do nível apartamentos (nível 3) e do nível edificações (nível 4) em relação à variável radiação não ionizante a 60 Hz cujo comportamento está sendo explicado. Essa diferença é evidenciada a partir do cálculo de indicadores como a correlação intraclasse (PUENTE-PALACIOS; LAROS, 2009). Os coeficientes de correlação intraclasse expressam a proporção da variância total relacionada a cada um dos níveis e são calculados a partir das variâncias dos níveis hierárquicos (BERRIDGE; CROUCHLEY, 2011, p.108), por meio das equações (22) a (25).

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 1}) = \frac{\sigma_{\text{nível 1}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} \quad (22)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 2}) = \frac{\sigma_{\text{nível 2}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} \quad (23)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 3}) = \frac{\sigma_{\text{nível 3}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} \quad (24)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 4}) = \frac{\sigma_{\text{nível 4}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} \quad (25)$$

3.4.5 Qualidade do ajuste de modelos hierárquicos

É possível definir um critério para prever o desempenho de modelos matemáticos e, em seguida, procurar pelo modelo que otimiza tal critério (FARAWAY, 2006, p.23). Um desses critérios é o logaritmo da função de verossimilhança (logLik).

Cada modelo que é ajustado ao mesmo conjunto de dados tem um valor correspondente de logaritmo da função de verossimilhança, que é calculado nas estimativas de máxima verossimilhança para aquele modelo. Estes valores são usados para comparar e testar estatisticamente a significância dos parâmetros que constituem o modelo (BERRIDGE; CROUCHLEY, 2011, p.14). É possível comparar a qualidade do ajuste destes modelos utilizando o logLik e, de acordo com esse critério, quanto maior o valor obtido melhor pode ser considerado o ajuste do modelo.

O *Akaike Information Criterion* (AIC) também tem sido frequentemente usado para escolher um entre diferentes modelos (FARAWAY, 2006, p.153), funcionando como uma medida da qualidade do ajuste (SHEATHER, 2009, p.230). O AIC é definido como menos duas vezes a máxima verossimilhança mais o dobro do número de parâmetros do modelo ajustado, como mostrado pela equação (26).

$$AIC = -2 \text{ máx logLik} + 2p \quad (26)$$

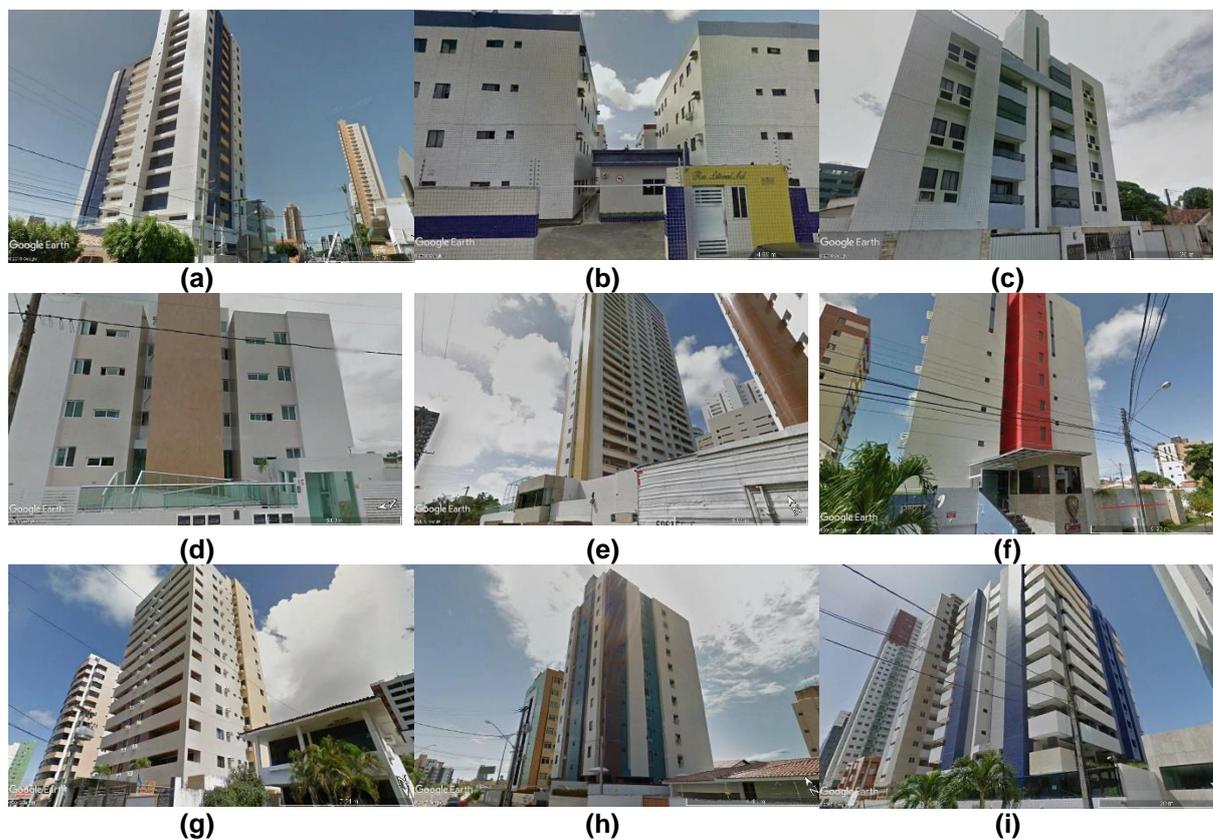
Onde logLik é o logaritmo da função de verossimilhança e p é o número de parâmetros ajustados, de forma que o termo 2p constitui uma medida de complexidade do modelo matemático. Esse critério é definido de tal forma que quanto menor o valor da AIC melhor o ajuste do modelo (SHEATHER, 2009, p.230).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Trinta e sete ambientes de dezessete apartamentos localizados em catorze diferentes edificações foram visitadas entre os meses de novembro de 2016 e julho de 2018 para a coleta dos dados.

Das edificações consideradas, nove localizam-se na cidade de João Pessoa (PB), uma em Manaus (AM), duas em Brasília (DF) e duas na cidade de Teresina (PI). Os edifícios logrados na cidade de João Pessoa (Figura 08) pertencem aos seguintes bairros: Bairro dos Estados (1), Bancários (1), Cabo Branco (1), Intermares (1), Jardim Luna (1), Manaíra (3) e Tambaú (1). As residências verticais de Brasília (Figura 09) pertencem todas ao bairro de Águas Claras. A habitação de Manaus (Figura 10) localiza-se no bairro do Aleixo e as de Teresina (Figura 11) ficam nos bairros de Ininga e Horto.

Figura 8 – Residências verticais localizadas em bairros da cidade de João Pessoa (PB); **(a)** Bairro dos Estados; **(b)** Bancários; **(c)** Cabo Branco; **(d)** Intermares; **(e)** Jardim Luna; **(f)** Manaíra (nº1); **(g)** Manaíra (nº2); **(h)** Manaíra (nº3); **(i)** Tambaú.



Fonte: Google Earth Pro 2018.

Figura 9 – Residências verticais localizadas Brasília (DF); **(a)** Águas Claras (nº1) e Águas Claras (nº2); **(b)** Águas Claras (nº3).



Fonte: *Google Earth Pro 2018*.

Figura 10 – Residência vertical localizadas Manaus (AM).



Fonte: *Google Earth Pro 2018*.

Figura 11 – Residências verticais localizadas em bairros da cidade de Teresina (PI); **(a)** Horto; **(b)** Ininga.



Fonte: *Google Earth Pro 2018.*

Conforme explicitado no tópico 3.3.3 dessa dissertação, utilizou-se uma classificação de duas categorias para caracterizar os apartamentos: adjacentes e não adjacentes. Assim, os apartamentos foram classificados como adjacentes quando localizados no primeiro andar, uma vez que a estação de transformadores interna de todas as edificações avaliadas se localiza no piso térreo das mesmas. Todos os apartamentos localizados em quaisquer outros andares foram considerados como não adjacentes, assim como realizado também nos trabalhos de Ilonen *et al.* (2008) e Thuróczy *et al.* (2008).

A cidade e o bairro no qual localizam-se, o(s) pavimentos(es) (andares) do(s) apartamento(s) avaliado(s) e sua classificação quanto à adjacência a transformadores internos é descrita para cada uma das edificações na Tabela 1. Nela também são detalhados o número de construções nas vizinhanças (vizinhança imediata), bem como as distâncias (D1, D2, D3 e D4) destas construções até a edificação estudada e as alturas (A1, A2, A3 e A4) destas construções.

Tabela 1 – Dados das residências avaliadas.

Cidade	Bairro	Edificação						Vizinhança										
		Edifício	Local	Andar	Adjacência	Ambiente	Altura do apartamento (m)	Altura do edifício (m)	Vizinhança imediata	Distância lateral (m)				Altura em relação ao solo (m)				
										D1	D2	D3	D4	A1	A2	A3	A4	
Brasília	Águas Claras	1	1	1	Sim	sala	4,11	82,04	4	148,79	43,76	12,96	50,74	157,66	152,42	73,54	63,57	
			2	20	Não	cozinha quarto	58,6											
		2	3	2	Não	cozinha quarto	12,85	72,74	3	27,98	12,16	32,71	-	66,79	74,86	70,50	-	
																		sala
João Pessoa	Bancários	3	4	1	Sim	cozinha quarto	5,19	13,73	4	21,45	19,80	1,96	15,41	2,87	8,21	13,66	13,29	
	Cabo Branco	4	5	1	Sim	quarto sala	3,38	17,70	3	4,59	4,73	18,38	-	2,52	5,32	4,84	-	
	Estados	5	6	12	Não	cozinha quarto	81,92	99,33	4	6	20,14	8,16	14,91	6,04	46,22	12,71	12,31	
	Intermares	6	7	2	Não	cozinha quarto	16,44	26,5	2	-	3,29	-	23,59	-	14,56	-	29,18	
	Jardim Luna	7	8	15	Não	quarto sala-cozinha	106,27	180,6	4	19,79	19,74	24,98	42,72	8,45	73,06	183,62	8,66	

Fonte: Dados da pesquisa.

(Continuação) **Tabela 1** – Dados das residências avaliadas.

Cidade	Edificação							Vizinhanças											
	Bairro	Edifício	Local	Andar	Adjacência	Ambiente	Altura do apartamento (m)	Altura do edifício (m)	Vizinhança imediata	Distância lateral (m)				Altura em relação ao solo (m)					
										D1	D2	D3	D4	A1	A2	A3	A4		
João Pessoa	Tambaú		9	10	Não	sala	60,99												
	Tambaú (nº1)	8	10	1	Sim	cozinha	8,51	72,74	4	7,24	5	11,87	32,94	5,70	7,21	88,95	145,32		
																		quarto	
		Tambaú (nº2)		11	1	Sim	sala												
		Manaíra (nº1)	9	12	1	Não	cozinha	7,47	53,45	4	7,22	7,70	24,44	34,89	7,2	13,44	4,36	85,78	
		Manaíra (nº2)	10	13	5	Não	cozinha	31,01	79,05	4	5,37	8,88	4,77	23,12	10,5	11,54	12,91	7,74	
							quarto												
	Manaíra (nº3)	11	14	5	Não	cozinha	31,04	65,95	4	10,12	8,63	5,78	24,47	53,49	10,44	7,06	24,42		
						quarto													
Manaus	Aleixo	12	15	2	Sim	sala	12,00	19,72	3	7,02	15,92	6,74	-	24,77	23,47	24,18	-		
						quarto													
	Horto	13	16	3	Não	sala-cozinha	6,00	13,6	4	5,41	5,52	13,66	8,89	4,28	13,68	13,33	13,42		
Teresina						quarto													
	Ininga	14	17	1	Não	sala-cozinha	4,26	10,53	3	3,63	-	64,60	25,57	12,73	-	5,13	7,21		

Fonte: Dados da pesquisa.

Com base no número de construções presente nas vizinhanças de cada edificação, a distância e a altura de cada uma delas, foi calculada a média das distâncias e das alturas por edifício, sendo esses os parâmetros testados nos modelos de regressão multinível (Tabela 2).

Tabela 2 – Médias das alturas e das distâncias para cada uma das edificações avaliadas.

Bairro	Edifício	Média das alturas (m)	Média das distâncias (m)
Águas Claras	1	111,79	64,06
Bancários	2	70,71	24,28
Cabo Branco	3	9,50	14,65
Estados	4	4,22	9,23
Intermares	5	19,32	12,30
Jardim Luna	6	21,87	13,44
Tambaú	7	68,44	26,80
Manaira (nº1)	8	61,79	14,26
Manaira (nº2)	9	27,69	18,56
Manaira (nº3)	10	10,67	10,53
Aleixo	11	23,85	12,25
Horto	12	24,14	9,89
Ininga	13	11,17	8,37
	14	8,35	31,26

Fonte: Dados da pesquisa.

4.1 Modelos hierárquicos de regressão com efeitos aleatórios apenas no intercepto

Todos os modelos testados possuem essencialmente quatro níveis, uma vez que há pelo menos um termo de erro aleatório ou um termo de efeito fixo em cada um dos níveis envolvidos no estudo da intensidade de campo magnético na frequência de 60 Hz, a saber: medição (1º nível), ambiente (2º nível), apartamento (3º nível) e edifício (4º nível).

4.1.1 Modelos hierárquicos com erros aleatórios em dois níveis hierárquicos

Níveis medição e edifício

Conforme mencionado no item 2.2.2, o primeiro modelo elaborado foi o que contém erros aleatórios nos níveis medições (1º nível) e edifício (4º nível), tal qual o descrito pela equação (14), testando todas as variáveis descritas no Quadro 2.

Para o modelo contendo todas as variáveis não foi possível obter estimativas para todos os parâmetros do modelo, uma vez que o algoritmo utilizado para esta situação não convergiu. Diante disso, aplicou-se o procedimento de seleção de variáveis, até que se obtivesse um modelo contendo apenas parâmetros fixos significativos (p -valor < 0,05).

Os submodelos de cada nível hierárquico do modelo final selecionado de nº1 são mostrados pelas equações (27) a (30), na ordem do menor para o maior nível.

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (27)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} - 0,0287 QUA - 0,0976 SAL - 0,0450 SACOZ \quad (28)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,0640 ADJ \quad (29)$$

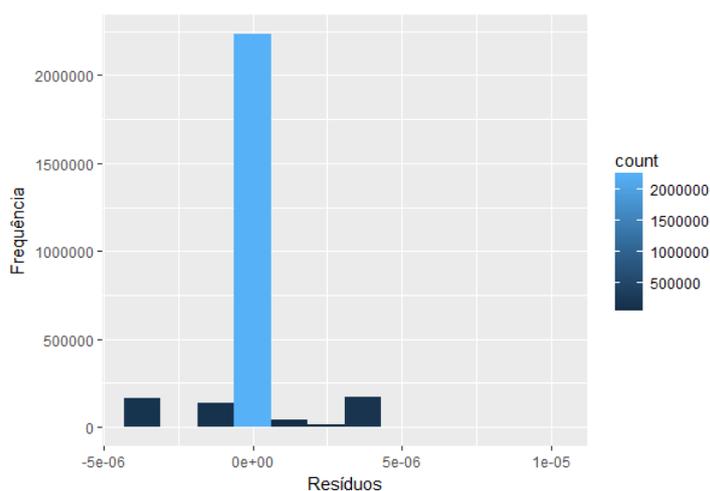
$$\theta_{000k} = 1,460 + \xi_{000k} \quad (30)$$

As equações (28) e (29) explicitam os efeitos fixos do modelo, enquanto as equações (27) e (30) exprimem os efeitos aleatórios. As características do intercepto do modelo são mostradas pela equação (30), que consiste na medida esperada do nível de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se os efeitos fixos das variáveis. A expressão geral do modelo selecionado nº1 é dada pela expressão (31), cujos parâmetros fixos são descritos na Tabela 3.

$$ELF MF_{60Hz} = 1,460 + 0,0640 ADJ - 0,0287 QUA - 0,0976 SAL - 0,0450 SACOZ + \pi_{tijk} + \xi_{000k} \quad (31)$$

Para verificar se os resíduos possuem distribuição normal, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 12).

Figura 12 – Histograma dos resíduos do modelo nº1.

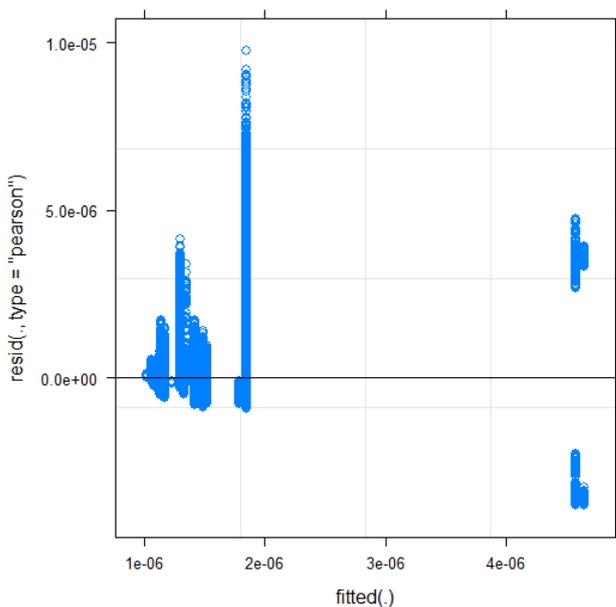


Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 12 conclui-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico avaliado não pode ser aproximada para a distribuição normal.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (valor esperado da variável dependente), mostrado pela Figura 13, é um dos recursos mais usados para avaliar a homocedasticidade (homogeneidade da variância dos erros) em modelos mistos de regressão linear.

Figura 13 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº1.



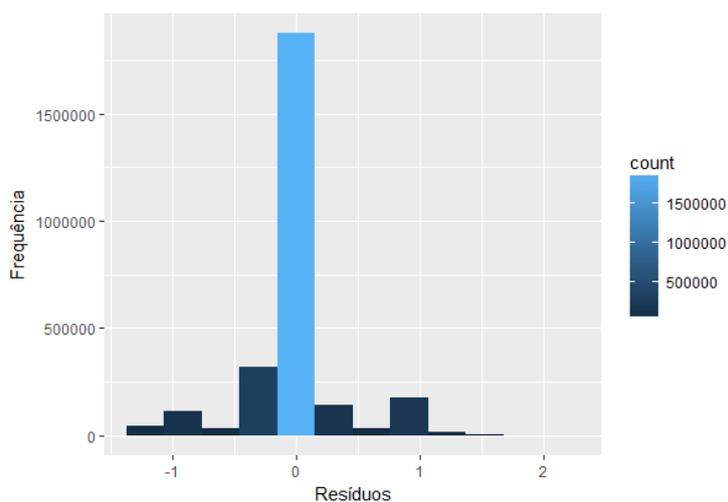
Fonte: Dados da pesquisa.

Observando a Figura 13, vê-se que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não há homogeneidade da variância dos erros. Portanto, pode-se considerar que o pressuposto da homocedasticidade não é obedecido. A fim de tornar a variância do erro relativamente constante deve-se conduzir uma transformação no modelo. Uma das transformações possíveis e que se optou por utilizar nesse caso foi a aplicação de logaritmo na variável dependente (THOMAS, 2009, p. 90). Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição e edifício que anteriormente era tal qual a expressão (31), passa a ser descrito pela equação (32).

$$\log ELF MF_{60Hz} = -13,586 + 0,0411ADJ - 0,0339QUA - 0,0414 SAL - 0,0489 SACOZ + \pi_{tijk} + \xi_{000k} \quad (32)$$

Para verificar se os resíduos possuem distribuição normal, plotou-se novamente o histograma dos resíduos (Figura 14).

Figura 14 – Histograma dos resíduos do modelo nº1 transformado.

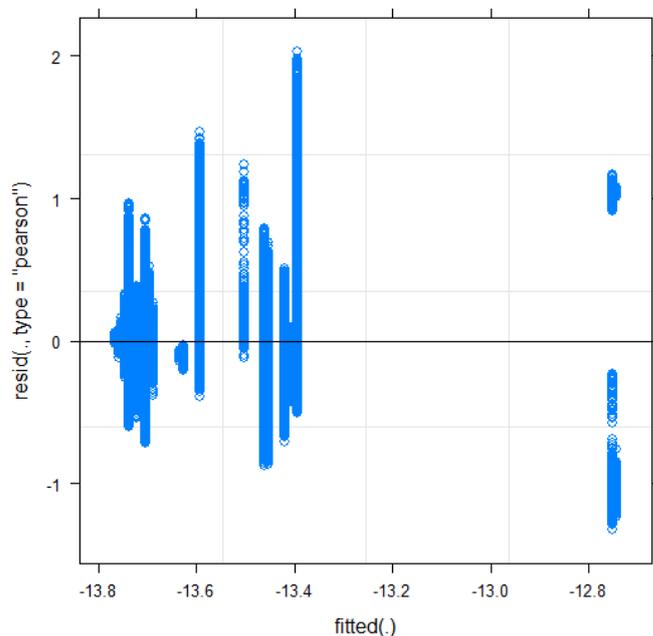


Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 14 conclui-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 15) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido.

Figura 15 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo 1 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Portanto, por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº1 (31) foi substituído pelo modelo nº1 transformado (32). A expressão do modelo nº1 transformado (32) pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (33) a (35), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 3.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,586+0,0411ADJ-0,0339QUA-0,0414 SAL-0,0489 SACOZ+\pi_{tijk}+\xi_{000k}} \quad (33)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,586} e^{0,0411ADJ} e^{-0,0339QUA} e^{-0,0414 SAL} e^{-0,0489 SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (34)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,586} (e^{0,0411})^{ADJ} (e^{-0,0339})^{QUA} (e^{-0,0414})^{SAL} (e^{-0,0489})^{SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (35)$$

Tabela 3 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor	p-valor
Intercepto	13,5862	-195,073	0,000
Adjacência (Sim)	0,0411	21,057	0,000
Quarto	-0,0339	-50,581	0,000
Sala	-0,0414	-43,502	0,000
Sala-cozinha	-0,0489	-35,212	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos coeficientes exibidos na Tabela 3, a equação (35) uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (36).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,2655 (1,0419)^{ADJ} (0,9666)^{QUA} (0,9594)^{SAL} (0,9522)^{SAC0Z} e^{\pi_{tijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (36)$$

A partir da Tabela 3, observa-se que as únicas variáveis que permaneceram no modelo foram as que definem o tipo de ambiente (quarto, sala, sala-cozinha) e a adjacência, p-valor<0,05. Isso implica dizer que não foram observados efeitos fixos decorrentes das variáveis densidade de construções, distância média das construções presentes nas vizinhanças imediatas até a habitação considerada; altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas; altura do apartamento e altura do edifício, tendo em vista que para os seus respectivos parâmetros apresentaram p-valor>0,05.

Quanto aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo n^o1 transformado (36) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,26 μ T. Esse valor supera em 0,86 μ T o valor de referência de exposição a ELF MF do público em geral proposto pela literatura, de 0,4 μ T, acima do qual podem ser causados efeitos negativos à saúde dos moradores. Diante da importância de considerar elevações na intensidade de ELF MF no interior de residências, Schuz *et al.* (2001) realizaram medições acima de 24 horas sob a cama de crianças e na sala de estar, em locais livres da presença de qualquer eletrodoméstico. Embora o estudo tenha fornecido uma evidência fraca da associação entre a leucemia infantil e a exposição a ELF MF, os autores encontraram estimativas de risco de 1,08, 1,19 e 3,53 para as categorias de exposição 0,1 a 0,2 μ T, 0,2 a 0,4

μT e acima de $0,4 \mu\text{T}$, próximas das trazidas por Ahlbom *et al.* (2000), que relataram razão da chance de 1,08, 1,11 e 2,00 respectivamente.

De acordo com o modelo (32) e a Tabela 3, os ambientes “sala-cozinha” foram os que apresentaram uma menor tendência de níveis elevados de ELF MF a 60 Hz, se situando em torno de 4,77% abaixo do níveis dos ambientes “cozinha”. Os ambientes “sala” apresentaram valores de ELF MF 4,05% inferiores aos níveis dos ambientes “cozinha”. E os ambientes “quarto”, por sua vez, exibiram valores de ELF MF 3,33% menores que os níveis dos ambientes “cozinha”. Verifica-se uma tendência de valores mais altos de ELF MF na frequência de 60 Hz nos ambientes cozinha (que é o nível de referência do modelo, motivo pelo qual não é descrito na Tabela 3).

Cabrita (2008) ressalta que, por ser um local no qual as pessoas permanecem durante um tempo considerável, deve-se evitar manter um número grande de equipamentos eletro eletrônicos no interior dos ambientes “cozinha”, pois a exposição a ELF MF nesses ambientes pode elevar-se em consequência da utilização desses dispositivos, em níveis considerados potenciadores de riscos para a saúde. Portanto, a ocorrência de valores mais elevados de ELF MF nas cozinhas dos apartamentos estudados pode ser justificado pelo uso mais frequente de equipamentos eletro eletrônicos.

Dias (2018) demonstrou valores mais elevados nas cozinhas do que nos ambientes “quarto” e “sala” em duas residências localizadas em Brasília durante o período diurno (que abrangeu o horário das 08 às 18h) e uma residência na cidade de João Pessoa, na qual os valores foram superiores ao ambiente “quarto” também durante o período noturno (que compreendeu o horário das 18h às 08h).

Quanto à adjacência, verificou-se que os ambientes de apartamentos que são adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores mais altos de ELF MF a 60 Hz. No interior desses apartamentos, espera-se que O ELF MF a 60 Hz esteja 4,20% acima dos ambientes localizados em apartamentos não adjacentes.

Esses resultados estão em conformidade com estudos realizados na Finlândia por Ilonen *et al.* (2008), que verificaram que o ELF EMF foi substancialmente mais elevado em apartamentos localizados imediatamente acima das estações de transformadores do que nos localizados nos demais pavimentos. Os autores verificaram que níveis de ELF MF que superam a marca de $0,4 \mu\text{T}$ ocorreram em 63% dos apartamentos adjacentes a transformadores, enquanto apenas 3,3% dos apartamentos de pavimentos diversos exibiram tais valores.

Já com relação aos efeitos aleatórios, a Tabela 4 exibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1 e 4, nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 4 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e edifício.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,4065	0,1652
Edifício	0,2605	0,0678

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância de cada um dos níveis hierárquicas expressa a variação da RNI na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22) e (25). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (37) a (39).

$$\text{var}(ELF MF_{60\text{Hz}})_{\text{modelo } n^{\circ}1} = \sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2 = 0,233 \quad (37)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 1) = \frac{\sigma_{\text{nível } 1}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2} = 0,7088 \quad (38)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 4) = \frac{\sigma_{\text{nível } 4}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2} = 0,2911 \quad (39)$$

De acordo com as equações (37) e (39), constata-se que 29,11% da variação total do logaritmo de ELF MF na frequência de 60 Hz deve-se ao nível edifício, enquanto 70,88% é atribuída ao nível medição. Como esses percentuais de variação correspondem aos efeitos aleatórios, devem-se a aspectos vinculados a esses níveis que não estão sendo avaliados no modelo matemático proposto.

No nível edifício alguns desses aspectos podem estar associados à dinâmica do entorno, como: a ocupação do solo (por exemplo a distribuição de comércio e serviços na área, que geram o maior fluxo de veículos e de pessoas na região); a presença de áreas permeáveis (por exemplo a existência de árvores, jardins e bosques nas vizinhanças) e impermeáveis (como calçadas, asfaltos, que levam ao aumento de

temperatura na região); o fator de visão do céu (que avalia de forma mais completa a proximidade de edificações multipavimentos, a qual é capaz de aumentar a área de absorção da radiação solar, gerando um aumento de temperatura, agravado pela maior quantidade de edificações desse tipo).

Já no nível medição, os responsáveis pela maior parte das variações da ELF MF a 60 Hz podem ser fatores como: a posição do equipamento analisador de espectro magnético durante a realização da medição de ELF MF de extrema baixa frequência; o local específico da residência no qual o aparelho foi colocado; sua proximidade a fontes emissoras de ELF MF, tanto fontes de área (ou fixas), que produzem campos que se estendem para além da área imediata que a rodeiam (por exemplo, linhas de alimentação e distribuição, transformadores), quanto as fontes locais (ou móveis), nas quais o campo está essencialmente confinado a uma pequena distância da fonte (por exemplo, aparelhos eletroeletrônicos e dispositivos portáteis), conforme classificação proposta por Câmara (2014).

Níveis medição e apartamento

O segundo modelo elaborado foi o que contém erros aleatórios nos níveis medições (1º nível) e apartamento (3º nível), tal qual o descrito pela equação (15). As estimativas de parâmetros fixos para todas as variáveis descritas no Quadro 2 para o modelo contendo erros nos níveis 1 e 3 são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e apartamento.

Variáveis	Coeficiente	Desvio padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	2,5071	1,3645	1,8373	0,0662
Adjacência (Sim)	1,1322	0,5307	2,1331	0,0587
Média das alturas das vizinhanças	-0,0028	0,0105	-0,2693	0,7931
Média das distâncias até as vizinhanças	0,0006	0,0212	0,0295	0,9770
Altura do apartamento	0,0085	0,0138	0,6129	0,5536
Altura do edifício	-0,0033	0,0114	-0,2928	0,7757
Vizinhanças	0,3591	0,4147	-0,8658	0,4069
Quarto	-0,0389	0,0021	-18,1447	0,0000
Sala	-0,1496	0,0031	-48,0818	0,0000
Sala-cozinha	0,0552	0,0044	-12,4705	0,0000

Fonte: Dados da pesquisa.

Observando a Tabela 5, verifica-se que apenas apresentaram efeitos significativos sobre a intensidade de ELF MF a 60 Hz as variáveis que definem o tipo de ambiente (quarto, sala, sala-cozinha), pois foram as únicas cujos parâmetros alcançaram p-valores inferiores a 0,05. Todas as demais variáveis, como também o parâmetro vinculado ao intercepto, tiveram p-valores superiores a 0,05, de modo que foram considerados como não significativos.

Seguindo-se o procedimento de seleção de variáveis, chegou-se ao modelo selecionado nº2. Os submodelos para os níveis hierárquicos que constituem o modelo nº2 são dados do menor para o maior nível pelas equações (40) a (43), respectivamente.

$$ELF\ MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (40)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} - 0,0389QUA - 0,1496SAL - 0,0552SAC0Z \quad (41)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,9170ADJ + e_{00jk} \quad (42)$$

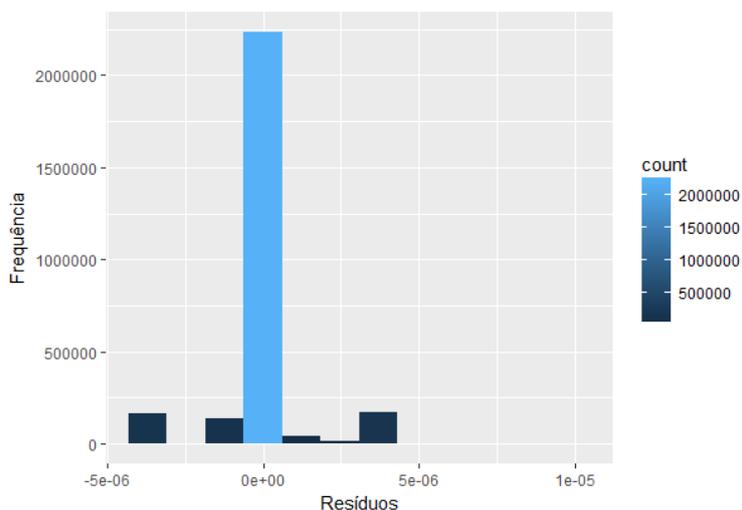
$$\theta_{000k} = 1,1918 \quad (43)$$

As equações (41) e (42) apresentam os efeitos fixos do modelo, e nas equações (40) e (42) os efeitos aleatórios são explicitados. O intercepto geral do modelo, que representa a intensidade esperada de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se os efeitos fixos das variáveis, é dado pela equação (43), que contém o intercepto geral do modelo. A equação (44) é a expressão matemática geral do modelo selecionado nº2.

$$ELF\ MF_{60Hz} = 1,1918 + 0,9170ADJ - 0,0389QUA - 0,1496SAL - 0,0552\ SALCOZ + \pi_{tijk} + e_{00jk} \quad (44)$$

Para avaliar os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 16) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº2 (Figura 17).

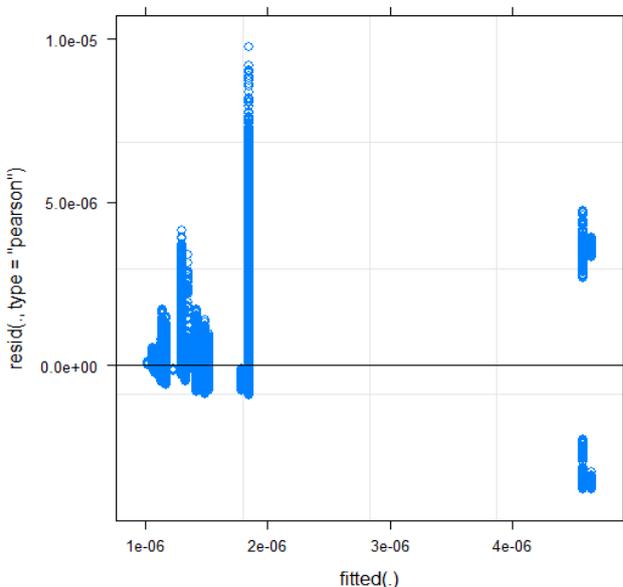
Figura 16 – Histograma dos resíduos do modelo nº 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 16 conclui-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico avaliado não pode ser aproximada para a distribuição normal.

Figura 17 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2.



Fonte: Dados da pesquisa.

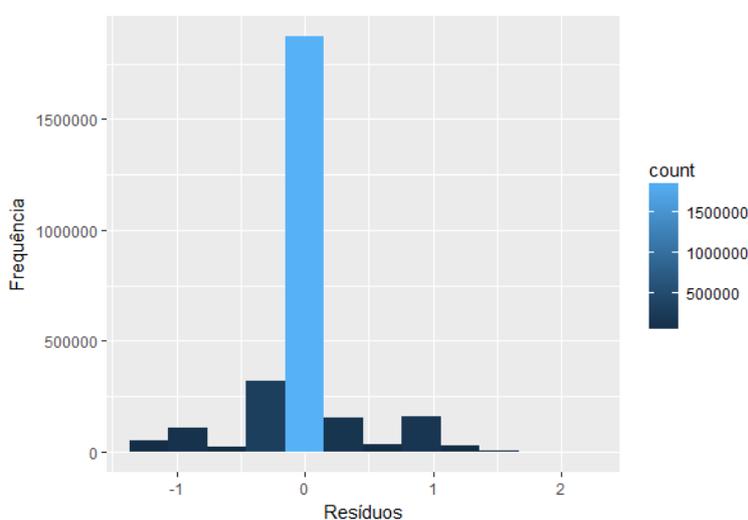
O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado mostrado na Figura 17 demonstra que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não há homogeneidade da variância dos erros.

Portanto, pode-se considerar que o pressuposto da homocedasticidade não é obedecido. Conforme efetuou-se para o modelo nº 1, conduziu-se uma transformação através da aplicação de logaritmo na variável dependente. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição e apartamento que anteriormente era tal qual a expressão (44), passa a ser descrito pela equação (45).

$$\log ELF_{MF_{60Hz}} = 1,1918 + 0,9170ADJ - 0,0389QUA - 0,1496SAL - 0,0552 SALCOZ + \pi_{tijk} + e_{00jk} \quad (45)$$

Para verificar se os resíduos possuem distribuição normal, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 18).

Figura 18 – Histograma dos resíduos do modelo nº 2 transformado.

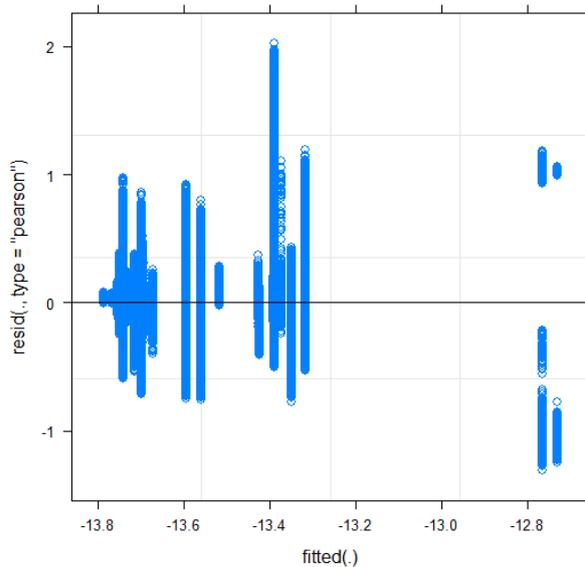


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 18 observa-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 19) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido.

Figura 19 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº2 (44) foi substituído pelo modelo nº2 transformado (45). A expressão do modelo nº2 transformado (45) pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (46) a (48), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 6.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650+0,345ADJ-0,042QUA-0,076 SAL-0,057 SACOZ+\pi_{tijk}+e_{00jk}} \quad (46)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650} e^{0,345ADJ} e^{-0,042QUA} e^{-0,076 SAL} e^{-0,057 SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} \quad (47)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650} (e^{0,345})^{ADJ} (e^{-0,042})^{QUA} (e^{-0,076})^{SAL} (e^{-0,057})^{SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} \quad (48)$$

Tabela 6 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e apartamento.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	-13,65	-205,216
Adjacência (Sim)	0,345	3,081
Quarto	-0,042	-62,342
Sala	-0,076	-78,293
Sala-cozinha	-0,057	-41,002

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos coeficientes exibidos na Tabela 6, a equação (48) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (49).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,18 (1,41199)^{ADJ} (0,9588)^{QUA} (0,9268)^{SAL} (0,9446)^{SACoz} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} \quad (49)$$

Assim como aconteceu para o modelo nº1, as únicas variáveis que permaneceram no modelo nº2 foram as que definem o tipo de ambiente (quarto, sala, sala-cozinha) e a adjacência, p-valor<0,05.

Quanto aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo nº2 transformado (49) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,18 μ T. De forma semelhante ao que aconteceu com o modelo nº 1 transformado, esse valor supera em 0,78 μ T o valor de referência de 0,4 μ T, de exposição a ELF MF proposto por Ahlbom *et al.* (2000), que encontraram razão da chance de 1,08, 1,11 e 2,00 para as categorias de exposição de 0,1 a 0,2 μ T, 0,2 a 0,4 μ T e acima de 0,4 μ T, respectivamente.

De acordo com o modelo (49) e a Tabela 5, os ambientes “sala” foram os que apresentaram uma menor tendência de níveis elevados de ELF MF a 60 Hz, se situando em torno de 7,31% abaixo dos níveis dos ambientes “cozinha”. Os ambientes “sala-cozinha” apresentaram valores de ELF MF 5,54% inferiores aos níveis dos ambientes “cozinha”. E os ambientes “quarto”, por sua vez, exibiram valores de ELF MF 4,11% menores que os níveis dos ambientes “cozinha”. Verifica-se uma tendência de valores mais altos de ELF MF na frequência de 60 Hz nos ambientes cozinha (que é o nível de referência do modelo, motivo pelo qual não é descrito na Tabela 5).

Essa tendência de valores maiores de ELF MF na cozinha, também verificada para o modelo transformado nº1, provavelmente deve-se ao número de equipamentos eletro eletrônicos em funcionamento ao longo do dia. Sobre a exposição causada por equipamentos eletrônicos, Brodić (2015) avaliou o campo magnético na vizinhança de computadores portáteis em condições normais, tendo encontrado valores máximos de ELF MF medido variaram de 0,5819 a 2,2011 μT nas partes superiores e de 0,5190 a 4,3959 μT nas partes inferiores dos dispositivos; e sob estresse, para os quais encontrou valores máximos do campo magnético na faixa de 1,0852 a 5,0557 μT nas partes superiores e de 0,8526 a 10,9167 μT nas partes inferiores dos dispositivos. Todos os valores encontrados pelos autores superaram 0,4 μT , de modo que demonstra-se que a intensidade de ELF MF pode elevar-se de forma local devido à presença de dispositivos elétricos.

Quanto à adjacência, verificou-se que os ambientes de apartamentos que são adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores mais altos de ELF MF a 60 Hz. No interior desses apartamentos, espera-se que o ELF MF a 60 Hz esteja 41,19% acima dos ambientes localizados em apartamentos não adjacentes.

Esse resultado está em conformidade com Rööslí *et al.* (2011), que afirmaram que alguns ambientes de apartamentos considerados como altamente expostos por estarem mais perto do transformador podem apresentar valor mais elevados do que os apartamentos mais afastados do transformador. Concluíram que a classificação da exposição com base na localização do apartamento em relação à sala do transformador é viável. Tal abordagem não necessita de contato com os participantes do estudo e, portanto, o viés de participação ou seleção, que foi motivo de preocupação em estudos anteriores, pode ser evitado.

Já com relação aos efeitos aleatórios, a Tabela 7 exhibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1 e 3, nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 7 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e apartamento.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,4042	0,16342
Apartamento	0,2206	0,04868

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância de cada um dos níveis hierárquicas expressa a variação da ELF MF na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22) e (24). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (50) a (52).

$$\text{var}(ELF MF_{60\text{Hz}})_{\text{modelo } n^{\circ}2} = \sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2 = 0,2121 \quad (50)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 1) = \frac{\sigma_{\text{nível } 1}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2} = 0,7705 \quad (51)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 3) = \frac{\sigma_{\text{nível } 3}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2} = 0,2295 \quad (52)$$

De acordo com a equação (51), cerca de 77,05% dos efeitos aleatórios devem-se a fatores associados às medições, que não são explicados pelo modelo, possivelmente quanto ao posicionamento do aparelho e sua proximidade a possíveis fonte de ELF MF de extrema baixa frequência durante o seu funcionamento. Pela expressão (52), identifica-se que os aspectos vinculados aos apartamentos, que são responsáveis por 22,95% dos efeitos aleatórios e que não são explicados pelo modelo matemático testado, podem constituir: quando adjacente ao transformador (ou seja, quando localizado no primeiro andar), a posição do apartamento (diretamente acima da estação de transformadores ou deslocado para as laterais); quando não adjacente ao transformador (localizado em qualquer outro andar que não o primeiro), a proximidade a transformadores externos e linhas de transmissão na via urbana; o número de apartamentos por andar; a área dos apartamentos, dentre outros.

Níveis medição e ambiente

O terceiro modelo elaborado foi o modelo com erros aleatórios nos níveis medições e ambiente, considerando apenas efeitos aleatórios no intercepto. Novamente testou-se o modelo contendo todas as variáveis descritas no Quadro 2. A Tabela 8 expõe as estimativas obtidas para os parâmetros fixos desse modelo.

Tabela 8 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e ambiente.

Variáveis	Coefficiente	Desvio padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	2,3917	0,8278	2,8889	0,0039
Adjacência (Sim)	0,9433	0,3103	3,0397	0,0052
Média das alturas das vizinhanças	-0,0070	0,0066	-1,0767	0,2911
Média das distâncias até as vizinhanças	0,0054	0,1345	0,4081	0,6864
Altura do apartamento	0,0052	0,0088	0,5971	0,5554
Altura do edifício	-0,0003	0,0072	-0,0390	0,9692
Vizinhanças	-0,3744	0,2459	-1,5221	0,1396
Quarto	0,1148	0,3015	0,3807	0,7064
Sala	0,3639	0,3538	1,0285	0,3128
Sala-cozinha	-0,1940	0,5043	-0,0384	0,9696

Fonte: Dados da pesquisa.

Observando a Tabela 8, verifica-se que apenas apresentou efeitos significativos sobre a intensidade de ELF MF a 60 Hz a adjacência, pois foi a única cujo parâmetro teve p-valor inferior a 0,05. Nesse modelo, diferentemente do que aconteceu nos anteriores, os parâmetros ligados às variáveis de tipo de ambiente (quarto, sala e sala-cozinha), assim como a média das alturas das vizinhanças, média das distâncias até as vizinhanças, altura do apartamento, altura do edifício e vizinhanças apresentaram parâmetros não significativos (p-valor>0,05).

Seguindo-se o procedimento de seleção de variáveis, assim como foi feito para os modelos (31) e (44), obteve-se o modelo selecionado nº3, conforme equações (53) a (56).

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (53)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (54)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,829ADJ \quad (55)$$

$$\theta_{000k} = 1,11 \quad (56)$$

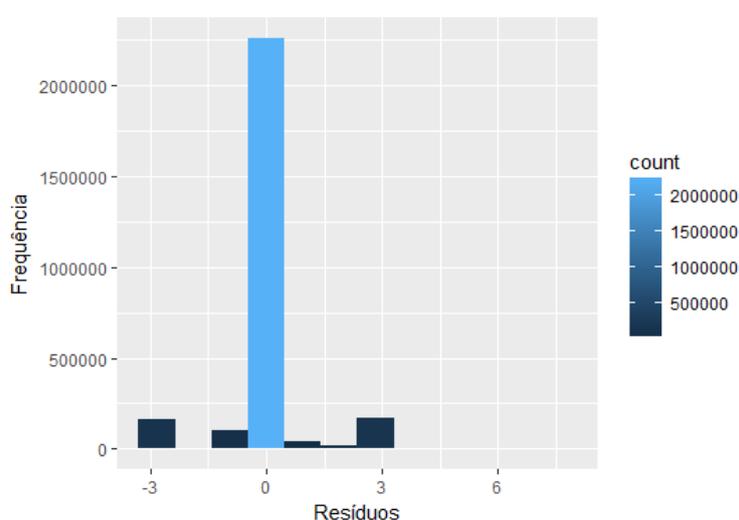
As equações (54) e (55) apresentam os efeitos fixos do modelo, e nas equações (53) e (54) os efeitos aleatórios são explicitados. O intercepto geral do modelo, que representa a intensidade esperada de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se os efeitos

fixos das variáveis, é dado pela equação (56), que contém o intercepto geral do modelo. A equação (57) é a expressão matemática geral do modelo selecionado nº2.

$$ELF MF_{60Hz} = 1,11 + 0,829ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (57)$$

Para avaliar os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 20) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº2 (Figura 21).

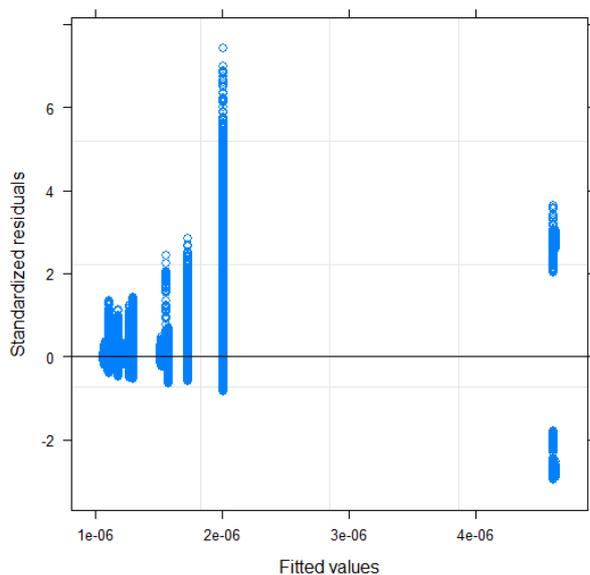
Figura 20 – Histograma dos resíduos do modelo nº 3.



Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 20 conclui-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico avaliado não pode ser aproximada para a distribuição normal.

Figura 21 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 2.



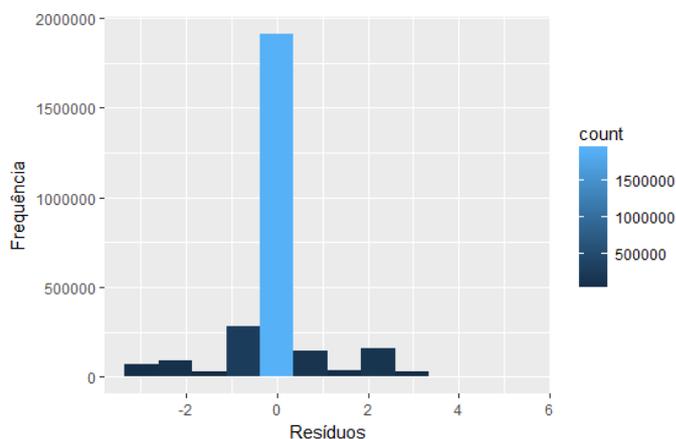
Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado mostrado na Figura 21 demonstra que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não há homogeneidade da variância dos erros. Portanto, pode-se considerar que o pressuposto da homocedasticidade não é obedecido. Conforme efetuou-se para o modelo nº 1 e nº2, conduziu-se uma transformação através da aplicação de logaritmo na variável dependente para o modelo nº3. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição e apartamento que anteriormente era tal qual a expressão (57), passa a ser descrito pela equação (58).

$$\log ELF MF_{60Hz} = 13,711 + 0,329 ADJ + \pi_{tijk} + e_{00jk} \quad (58)$$

Para verificar se os resíduos possuem distribuição normal, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 22).

Figura 22 – Histograma dos resíduos do modelo 2 transformado.

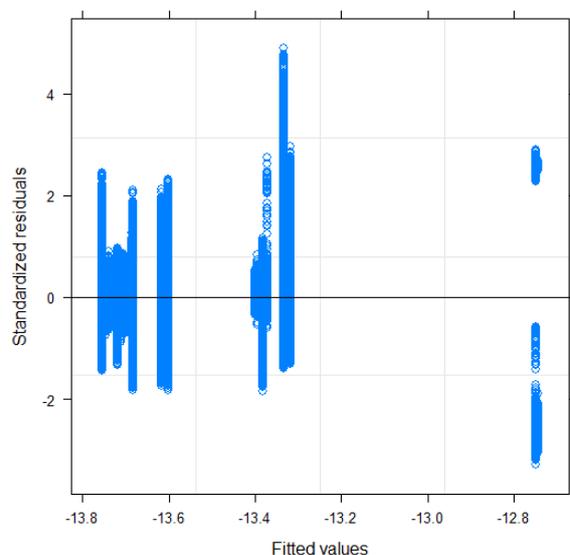


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 22 observa-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 23) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido para o modelo n^o3 transformado.

Figura 23 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo 2 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº3 selecionado (57) foi substituído pelo modelo nº3 transformado (58). A expressão do modelo nº3 transformado (58) pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (59) a (61), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 9.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,711+0,3290ADJ+\pi_{tijk}+\varepsilon_{0ijk}} \quad (59)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,711} e^{0,3290ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} \quad (60)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,711} (e^{0,3290})^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} \quad (61)$$

Tabela 9 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição e ambiente.

Variáveis	Coefficiente	t-value	p-value
Intercepto	-13,71089	-345,641	0,000
Adjacência (Sim)	0,32903	4,9171	0,000

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos coeficientes exibidos na Tabela 9, a equação (61) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (62).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,11 (1,389)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} \quad (62)$$

Quantos aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo nº3 transformado (61) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,11 μ T. Esse valor supera em 0,71 μ T o valor de ELF MF de 0,4 μ T, acima do qual Longyo *et al.* (2014) encontraram uma significativa associação estatística com a leucemia infantil.

Diferentemente do que ocorreu para os modelos nº1 e nº2, a única variável que permaneceu no modelo nº2 foi a adjacência (p-valor<0,05). Essa variável explicita que apartamentos adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores de ELF MF a 38,9% maiores que os apartamentos não adjacentes.

Sobre a elevação na intensidade de ELF MF verificada em apartamentos adjacentes a transformadores internos, em estudos desenvolvidos em Israel,

Hareuveny *et al.* (2011) verificaram que apartamentos localizados imediatamente acima das estações de transformadores apresentaram valor médio de ELF EMF de 0,40 μT , enquanto em apartamentos não-adjacentes, o ELF MF variou entre 0,06-0,12 μT .

Quanto aos efeitos aleatórios, a Tabela 10 exibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1 e 2, nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 10 – Desvio padrão e variância dos níveis medição e ambiente.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,4026	0,16208676
Apartamento	0,1942	0,03771364

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância de cada um dos níveis hierárquicas expressa a variação da ELF MF na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22) e (23). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (63) a (65).

$$\text{var}(ELF MF_{60\text{Hz}})_{\text{modelo } n^{\circ}3} = \sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 2}^2 = 0,1998 \quad (63)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 1) = \frac{\sigma_{\text{nível } 1}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 2}^2} = 0,8113 \quad (64)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 2) = \frac{\sigma_{\text{nível } 2}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 2}^2} = 0,1887 \quad (65)$$

De acordo com a equação (64), cerca de 81,13% dos efeitos aleatórios devem-se a fatores associados às medições, que não são explicados pelo modelo, possivelmente deve-se aos aspectos característicos do dispositivo analisador de espectro eletromagnético e do seu posicionamento no momento em que efetuava a mensuração do campo magnético de extrema baixa frequência, os quais o modelo não leva em consideração, como referido para os modelos anteriores. Pela expressão

(65), identifica-se que os aspectos vinculados aos ambientes, que são responsáveis por 18,87% dos efeitos aleatórios e que não são explicados pelo modelo matemático testado, podem estar associados a quantidade de dispositivos elétricos em funcionamento no interior dos ambientes, assim como a proximidade desses ambientes a fontes de área de ELF MF, como transformadores externos, fiação de alta e baixa tensão, as quais não estão inclusas no modelo matemático proposto.

Esse resultado mostra que, ainda que o efeito aleatório devido ao ambiente tenha sido menor do que os efeitos aleatórios do apartamento e da edificação (nos modelos nº1 e nº2), no modelo nº3 ele expressa a contribuição de fontes de emissão locais para a elevação da intensidade de ELF MF no interior das residências, que pode ter impacto a longo prazo na saúde dos moradores, sobretudo das crianças. Elwood (2017) ressalta que a leucemia infantil devido à exposição à ELF EMF exibe maiores evidências para níveis de ELF MF acima de 0,3 ou 0,4 μT , produzidos por sistemas de energia elétrica doméstica.

Qualidade do ajuste dos modelos nº1, nº2 e nº3 transformados

De posse dos três modelos finais selecionados denotados pelas equações (36), (49) e (62), os quais tem como característica comum o fato de se tomar apenas erros aleatórios em dois níveis; utilizou-se dois métodos de avaliação da qualidade do ajuste para tentar decidir, dentre eles, qual o que teve o melhor ajuste. As medias de ajuste utilizadas foram: o logaritmo da função de verossimilhança ($\log\text{Lik}$) e o Critério de Informação de Akaike (do inglês, *Akaike information criterion* - AIC). Os resultados são mostrados na Tabela 11

Tabela 11 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois níveis.

Nº	Modelo hierárquico	Níveis com termos aleatórios	Nº de termos fixos	LogLik	AIC
1 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,2655 (1,0419)^{ADJ} (0,9666)^{QUA} (0,9594)^{SAL} (0,9522)^{SAC0Z} e^{\pi_{tijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (36)$	Medições e edifício	5	-1431381	2862777
2 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,18 (1,41199)^{ADJ} (0,9588)^{QUA} (0,9268)^{SAL} (0,9446)^{SAC0Z} e^{\pi_{tijk}} e^{\epsilon_{00jk}} \quad (49)$	Medições e apartamento	5	-1415770	2831554
3 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,11 (1,389)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\epsilon_{0ijk}} \quad (62)$	Medições e ambiente	2	-1404916	2809840

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com o logLik, quanto maior o valor obtido melhor pode ser considerado o ajuste do modelo. Segundo esse critério, a partir da Tabela 11 identifica-se que o modelo com melhor ajuste é o modelo nº3, que apresenta erros aleatórios nos níveis medições e ambiente, seguido do modelo nº2, com erros aleatórios nos níveis medições e apartamento e, por último, o modelo nº1, com erros aleatórios nos níveis medições e edifício.

O AIC define que quanto menor o valor obtido, melhor o ajuste. Desse modo, a Tabela 11 revela que novamente o modelo com melhor ajuste é o nº3, seguido do modelo nº2, e, por fim, o modelo de nº1.

4.1.2 Modelos hierárquicos com erros aleatórios em três níveis hierárquicos

Conforme mencionado no item 3.4.3, o primeiro modelo elaborado foi o que contém erros aleatórios nos níveis medições (1º nível), apartamento (3º nível) e edifício (4º nível), tal qual o descrito pela equação (17), testando todas as variáveis descritas no Quadro 2.

Medição, apartamento e edifício

Tomando como bases os modelos nº1, nº2 e nº3, deu-se prosseguimento aos testes de novos modelos, dessa vez acrescentando um termo aleatório a cada um deles em um outro nível, totalizando três níveis com erros aleatórios.

Partindo-se primeiramente do modelo nº1, acrescentou-se o termo de erro aleatório vinculado ao intercepto no nível apartamento, com a finalidade de constatar se é possível admitir variações aleatórias atribuídas também às características dos apartamentos, além dos níveis medições e edifício como já previamente verificado.

O novo modelo, referido como modelo de nº4, descrito pelas equações (66) a (70), apresentou parâmetros significativos ($t\text{-valor} > 2$ ou $t\text{-valor} < -2$), como pode ser visto na Tabela 12, de modo que as conclusões relativas aos efeitos fixos para o modelo nº1 foram mantidas, embora os valores dos parâmetros tenham sofrido alterações.

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (66)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} - 0,0389QUA - 0,1497SAL - 0,05523SALCOZ \quad (67)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,9171ADJ + e_{00jk} \quad (68)$$

$$\theta_{000k} = 1,1920 + \xi_{000k} \quad (70)$$

As equações (67) e (68) apresentam os efeitos fixos do modelo, e nas equações (66), (68) e (69) os efeitos aleatórios são explicitados. O intercepto geral do modelo, que representa a intensidade esperada de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se os efeitos fixos das variáveis, é dado pela equação (70), que contém o intercepto geral do modelo. A equação (71) é a expressão matemática geral do modelo selecionado nº2.

$$ELF MF_{60Hz} = 1,1920 - 0,0389QUA - 0,1497SAL - 0,05523SALCOZ + +0,9171ADJ + \pi_{tijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (71)$$

Tabela 12 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, apartamento e edifício.

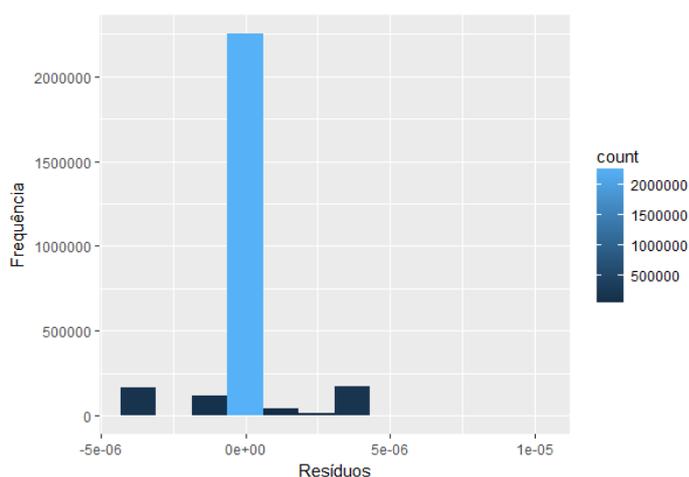
Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,1920	5,149
Adjacência (Sim)	0,9171	2,354
Quarto	-0,0389	-18,144
Sala	-0,1497	-48,082
Sala-cozinha	-0,05523	-12,470

Fonte: Dados da pesquisa.

O modelo nº4 da equação (71) se aproxima muito do modelo nº2 da equação (44), pois os parâmetros fixos encontrados foram extremamente próximos. Os dois modelos têm em comum a consideração do erro aleatório nos níveis medições e apartamento. Apesar de considerar o erro no nível edifício, a semelhança entre os parâmetros fixos com o modelo nº4 dá indícios de que quando considera-se a variação do ELF MF a 60 Hz explicado pelo nível apartamento, a variação explicada pelo nível edifício cai em relação ao modelo nº1, em que apenas os erros nos níveis medições e edifício são considerados.

Os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade foram avaliados através do histograma dos resíduos (Figura 24) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº4 (Figura 25).

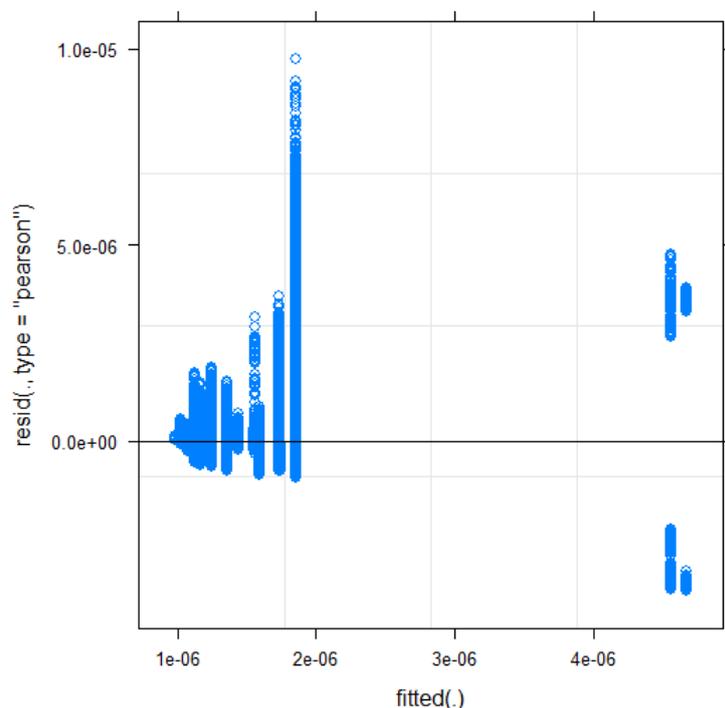
Figura 24 – Histograma dos resíduos do modelo nº 4.



Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando a Figura 24 conclui-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico avaliado não pode ser aproximada para a distribuição normal.

Figura 25– Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 4.



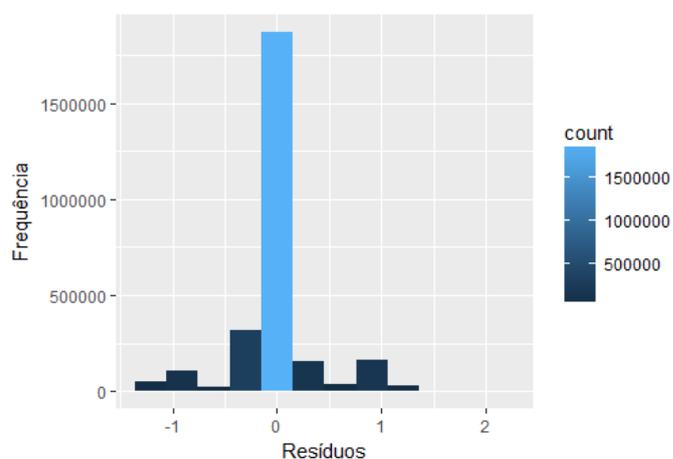
Fonte: Dados da pesquisa.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado mostrado na Figura 25 demonstra que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não há homogeneidade da variância dos erros. Portanto, pode-se considerar que o pressuposto da homocedasticidade não é obedecido. Conforme efetuou-se para os modelos anteriores, conduziu-se uma transformação através da aplicação de logaritmo na variável dependente. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição e apartamento que anteriormente era tal qual a expressão (71), passa a ser descrito pela equação (72).

$$\log ELF MF_{60Hz} = 1,1920 - 0,0389QUA - 0,1497SAL - 0,05523SALCOZ + 0,9171ADJ + \pi_{tijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (72)$$

Para verificar se os resíduos possuem distribuição normal, plotou-se o histograma dos resíduos (Figura 26).

Figura 26 – Histograma dos resíduos do modelo n^o4 transformado.

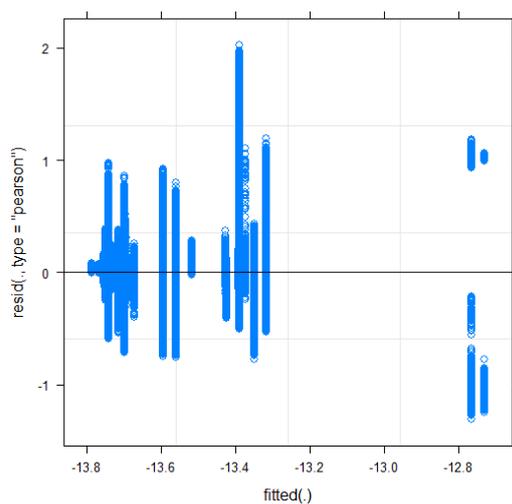


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 26 observa-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 27) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido para o modelo n^o4 transformado.

Figura 27 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo n^o4 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº4 selecionado (71) foi substituído pelo modelo nº4 transformado (73). A expressão do modelo nº4 transformado (73) pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (74) a (76), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 13.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650+0,345ADJ-0,0417QUA-0,0760 SAL-0,0566 SACOZ+\pi_{tijk}+e_{00jk}+\xi_{000k}} \quad (74)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650} e^{0,345ADJ} e^{-0,0417QUA} e^{-0,0760 SAL} e^{-0,0566 SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (75)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,650} (e^{0,345})^{ADJ} (e^{-0,0417})^{QUA} (e^{-0,0760})^{SAL} (e^{-0,0566})^{SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (76)$$

Tabela 13 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, apartamento e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,1800	-205,232
Adjacência (Sim)	1,4112	3,081
Quarto	0,9592	-62,342
Sala	0,9267	-78,293
Sala-cozinha	0,9445	-41,002

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos coeficientes exibidos na Tabela 13, a equação (76) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (77).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,18 (1,389)^{ADJ} (0,9591)^{QUA} (0,9268)^{SAL} (0,9449)^{SACOZ} e^{\pi_{tijk}} e^{e_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (77)$$

Quanto aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo nº4 transformado (77) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,18 μ T. Esse valor supera em 0,78 μ T o valor de referência de intensidade de ELF MF de 0,4 μ T para exposição do público em geral proposto por Ahlbom *et al.* (2000) e Greenland *et al.* (2000) e ratificado por Ilonen *et al.* (2008), Thuróczy *et al.* (2008), Calvente *et al.* (2010), Hareuveny *et al.* (2011); Sage

(2012), Huss *et al.* (2013), Kandel *et al.* (2013), Zaryabova (2013), Struchen *et al.* 2015; Brodić (2015), Brodić e Amelio (2015), Elwood (2017).

Grellier, Ravazzani e Cardis (2014) estimaram que entre 50,1 e 61,1 casos de leucemia infantil poderiam ser atribuídos a exposições ELF MF anualmente, em toda a União Européia, se a associação apresentada por evidências epidemiológicas for considerada causal, correspondendo a cerca de 1,5% ~ 2,0% de todos os casos de leucemia infantil na Europa.

Assim como no modelo nº1, as variáveis relacionadas ao tipo de cômodo e a adjacência permaneceram no modelo nº4, pois seus parâmetros apresentaram t-valor >2 ou t-valor <-2 . Logo, não foram observados efeitos fixos decorrentes das variáveis densidade de construções, distância média das construções presentes nas vizinhanças imediatas até a habitação considerada; altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas; altura do apartamento e altura do edifício, tendo em vista que para os seus respectivos parâmetros apresentaram $-2 < \text{t-valor} < 2$.

De acordo com o modelo (77) e a Tabela 13, os ambientes “sala” foram os que apresentaram uma menor tendência a intensidades maiores de ELF MF a 60 Hz, se situando em torno de 7,32% abaixo dos níveis dos ambientes “cozinha”. Os ambientes “sala-cozinha” apresentaram valores de ELF MF 5,05% inferiores aos níveis dos ambientes “cozinha”. E os ambientes “quarto”, por sua vez, exibiram valores de ELF MF 4,08% menores que os níveis dos ambientes “cozinha”. Verifica-se uma tendência de valores mais altos de ELF MF na frequência de 60 Hz nos ambientes cozinha (que é o nível de referência do modelo, motivo pelo qual não é descrito na Tabela 13).

O parâmetro fixo da variável adjacência indica que apartamentos adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores de ELF MF a 60 Hz 42,19% maiores que os apartamentos não adjacentes.

Huss *et al.* (2013) também verificaram que ocorre uma elevação da intensidade de ELF MF nos apartamentos localizados diretamente acima ou adjacentes a estação de transformadores, que apresentaram níveis consideravelmente maiores de campos magnéticos do que apartamentos mais distantes. Esse nível elevado nos apartamentos também se traduziu em maior exposição individual.

Ao comparar exposições individuais e locais na Holanda, Huss *et al.* (2013) verificaram que a exposição dos indivíduos aos campos magnéticos de extrema baixa frequência em apartamentos localizados acima ou nas adjacências de estações de transformadores foram aproximadamente 2 vezes menores em comparação com os

valores locais, obtidos no interior desses apartamentos. Mesmo assim constataram que o grau de exposição individual é bem superior ao daqueles que vivem em apartamentos mais afastados das estações, em que mensuraram valores de intensidade de ELF MF em torno de 0,23 μT e de 0,06 μT , respectivamente.

Quanto aos efeitos aleatórios, a Tabela 14 exhibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1, 3 e 4 nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 14 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, apartamento e edifício.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,4043	0,1634
Apartamento	0,2206	0,04867
Edifício	0,00002481	6,154E-10

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância de cada um dos níveis hierárquicos expressa a variação da ELF MF na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição, apartamento e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22), (24) e (25). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (78) a (81).

$$\text{var}(ELF MF_{60\text{Hz}})_{\text{modelo } n^{\circ}4} = \sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2 = 0,21207 \quad (78)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 1) = \frac{\sigma_{\text{nível } 1}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2} = 0,770500 \quad (79)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 3) = \frac{\sigma_{\text{nível } 3}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2} = 0,229499 \quad (80)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível } 4) = \frac{\sigma_{\text{nível } 4}^2}{\sigma_{\text{nível } 1}^2 + \sigma_{\text{nível } 3}^2 + \sigma_{\text{nível } 4}^2} = 0,0000000029 \quad (81)$$

A equação (81) confirma a evidência levantada ao comparar o modelo n^o4 antes da transformação com o modelo n^o 2 também antes da transformação, visto que

percebe-se que apenas 0,00000029% dos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo são explicados pelo nível edifício, que pode ser considerada irrisória ao comparar com os efeitos aleatórios do nível apartamento de 22,9499%, conforme mostrado pela equação (80). Cerca de 77,0500% dos efeitos aleatórios devem-se a fatores associados às medições, que não são explicados pelo modelo.

Esse resultado sugere que o efeito aleatório devido ao apartamento é mais pronunciado quando comparado aos efeitos aleatórios da edificação, o que dá indícios de que as fontes fixas de emissão de ELF MF, como as estações de transformadores externas, contribuem para a elevação da intensidade de ELF MF no interior das residências a longo prazo. Esses achados são consistentes com as investigações de Kandel *et al.* (2013), que destacaram que ao realizar medições nas proximidades e acima de três estações de transformadores internos em Israel estes consistiram em uma considerável fonte geradora de ELF MF. Para o ponto de corte de $0,4 \mu\text{T}$ utilizado em estudos epidemiológicos, os resultados encontrados pelos autores indicaram que logo acima das estações de transformadores a intensidade de campo magnético mensurada superou bastante esse valor.

Ao mesmo tempo, Kandel *et al.* (2013) discutiram que valores de ELF MF acima de $0,4 \mu\text{T}$ ocorreram de forma muito mais pontual em alturas maiores de 2 m acima das estações de transformadores. Os resultados dos autores, assim como do modelo nº 4 transformado expresso pela equação (80) suportam o método de avaliação da exposição utilizado no estudo epidemiológico TransExpo (EMFS.INFO, 2018), que indica o estabelecimento de uma classificação dos apartamentos localizados acima de uma estação de transformadores como altamente expostos a níveis de campo magnético de extrema baixa frequência.

Medição, ambiente e apartamento

Com a finalidade de constatar se é possível admitir variações aleatórias em virtude das características dos ambientes, além dos níveis medições e apartamento como já previamente verificado, incorporou-se ao modelo nº2 um termo de erro aleatório no nível ambiente, implementando-se um novo modelo. Este modelo apresentou parâmetro significativo ($t\text{-valor} > 2$) apenas para a variável adjacência, enquanto para as variáveis que descrevem o tipo de ambiente (quarto, sala e sala-cozinha) os parâmetros foram não significativos, pois $-2 < t\text{-valor} < 2$ (Tabela 15). O

mesmo foi verificado para o modelo nº3, o único modelo anterior no qual as variáveis quarto, sala e sala-cozinha também não apresentaram parâmetros significativos.

Tabela 15 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,1730	4,985
Adjacência (Sim)	0,8930	2,288
Quarto	-0,0199	-0,345
Sala	-0,1141	-1,575
Sala-cozinha	0,0416	-0,343

Fonte: Dados da pesquisa.

Com isso, implementou-se o novo modelo sem as variáveis quarto, sala e sala-cozinha, denominado modelo nº5, descrito pelas equações (82) a (85), cujos parâmetros são mostrados na Tabela 16.

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (82)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (83)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,8698 ADJ + e_{00jk} \quad (84)$$

$$\theta_{000k} = 1,138 \quad (85)$$

As equações (82), (83) e (84) demonstram os efeitos aleatórios considerados no modelo nº5 e a equação (84) também apresenta o efeito fixo da variável adjacência do modelo. O intercepto geral do modelo, que representa a intensidade esperada de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se o efeito fixo da variável adjacência, é dado pela equação (85). A expressão geral do modelo nº5 assemelha-se ao modelo descrito por (18), sendo descrita pela equação (86).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,138 + 0,8698 ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} \quad (86)$$

Tabela 16 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento selecionado nº5.

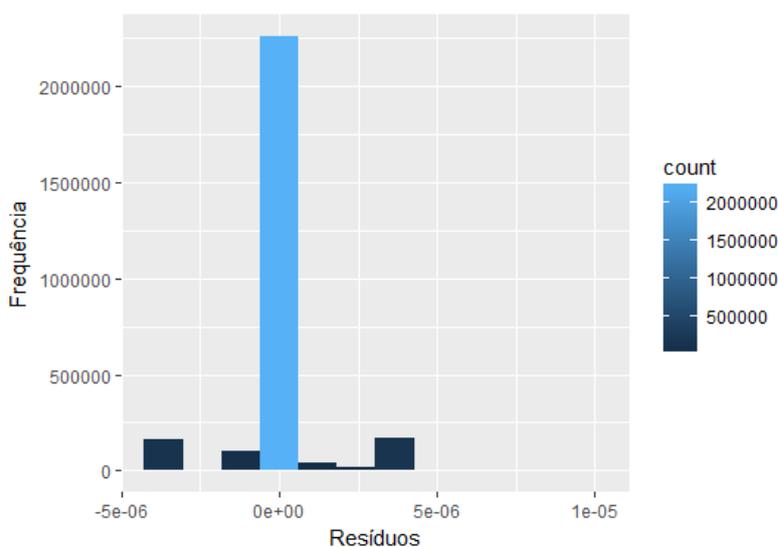
Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,1380	4.983
Adjacência (Sim)	0,8698	2,261

Fonte: Dados da pesquisa.

O fato da única variável remanescente ter sido a adjacência, tanto para os modelos nº3 e nº5 dá indícios de que a incorporação de efeitos aleatórios do nível ambiente no modelo hierárquico de regressão faz com que a variação da intensidade de campo magnético a 60 Hz que antes era explicada pelos efeitos fixos das variáveis quarto, sala e sala-cozinha passe a ser explicada pelos efeitos aleatórios desse nível, frente à sua predominância.

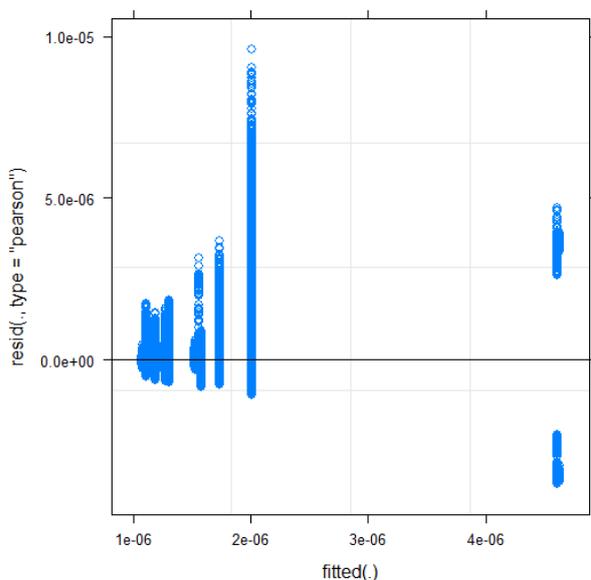
Os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade foram avaliados através do histograma dos resíduos (Figura 28) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº5 (Figura 29).

Figura 28 – Histograma dos resíduos do modelo nº 5.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 29 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 5.



Fonte: Dados da pesquisa.

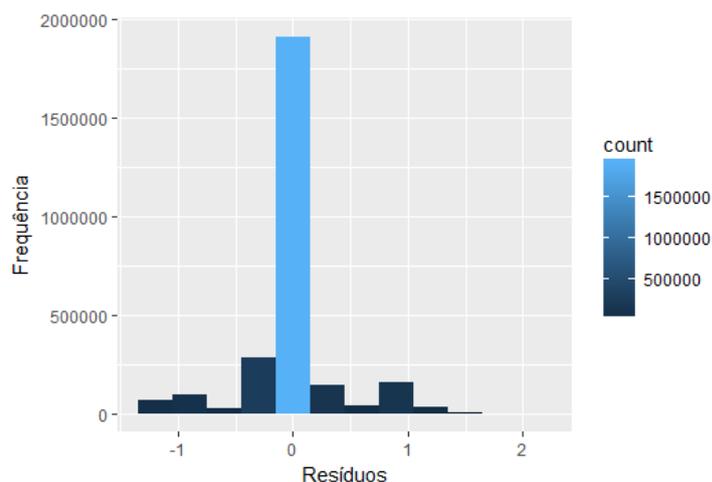
Analisando a Figura 28 percebe-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº5 avaliado não pode ser aproximada para a distribuição normal.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado mostrado na Figura 29 mostra que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não há homogeneidade da variância dos erros. Isso implica que o pressuposto da homocedasticidade não está sendo obedecido. Conforme efetuou-se para os modelos anteriores, conduziu-se uma transformação através da aplicação de logaritmo na variável dependente. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição, ambiente e apartamento que anteriormente era tal qual a expressão (86), passa a ser descrito pela equação (87).

$$\log ELF MF_{60Hz} = 1,138 + 0,8698 ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00}_{jk} \quad (87)$$

A fim de verificar se os resíduos do modelo nº5 transformado possuem distribuição normal plotou-se o histograma dos resíduos mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Histograma dos resíduos do modelo nº 5 transformado.

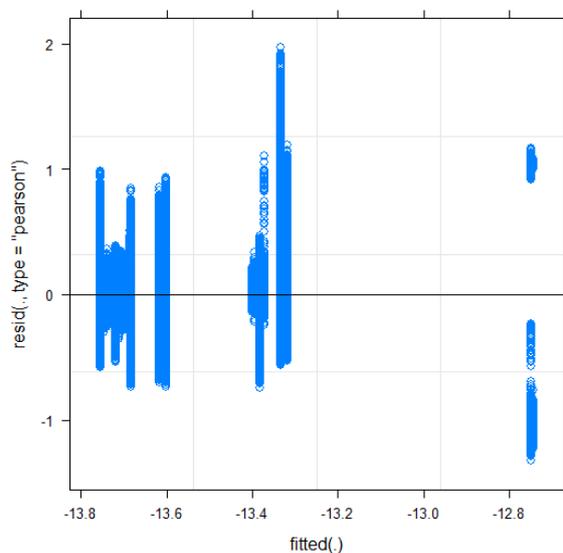


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 30 constata-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº5 transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo nº5 não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 31) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido para o modelo nº5 transformado.

Figura 31 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº5 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº5 (86) inicialmente selecionado foi substituído pelo modelo nº5 transformado (87), cuja expressão pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (88) a (90), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 17.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6938+0,3299ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk}} \quad (88)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6938} e^{0,3299ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{e_{00jk}} \quad (89)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6938} (e^{0,3299})^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{e_{00jk}} \quad (90)$$

Tabela 17 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e apartamento.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	-13,6938	-217,2060
Adjacência (Sim)	0,3299	3,1070

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos coeficientes exibidos na Tabela 17, a equação (90) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (91).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,129(1,391)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{e_{00jk}} \quad (91)$$

Quantos aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo nº5 transformado (91) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,13 μ T. Esse valor supera em 0,73 μ T o valor de referência de intensidade de ELF MF de 0,4 μ T, o qual London *et al.* (2003) utilizou como valor referência para testar a hipótese de que o risco de câncer de mama aumenta com maior exposição a campos magnéticos residenciais. Para isso, os autores efetuaram de medições de campo magnético extrema baixa frequência ao longo de um período de sete dias, tendo concluído que as exposições residenciais a ELF MF experimentadas pela maioria das mulheres dos EUA não desempenha um papel etiológico no câncer de mama.

O parâmetro fixo da variável adjacência indica que apartamentos adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores de ELF MF a 39,10% maiores que os apartamentos não adjacentes, o que corrobora com os achados de Szabo, Gabor e Thuroczy (2007), que desenvolveram uma avaliação sistemática da exposição ao ELF MF de residentes que vivem em apartamentos localizados acima das estações de transformadores na Hungria. Os autores encontraram nesse estudo que a exposição média a ELF MF durante 24 horas foi de 3,03 μT , excedendo a exposição residencial que consideraram como habitual ($<0,2 \mu\text{T}$). Ao mensurar a exposição pessoal, Szabo, Gabor e Thuroczy (2007) verificaram que para a maioria participantes (75% deles) a média ponderada de tempo da exposição pessoal excedeu 0,4 μT e encontraram médias de exposição de 11,8 μT nos pisos de apartamentos diretamente adjacentes as transformadores, reconhecendo que esses resultados são preocupantes porque as crianças pequenas costumam passar longos períodos no chão, onde podem estar expostas a valores elevados de ELF MF.

Quanto aos efeitos aleatórios, a Tabela 18 exhibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1, 2 e 3 nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 18 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente e apartamento.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,4027	0,1621
Ambiente	0,0619	0,0038
Apartamento	0,2045	0,0418

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância de cada um dos níveis hierárquicos que contêm erros aleatórios expressa a variação da ELF MF na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição, ambiente e apartamento. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22), (23) e (24). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (92) a (95).

$$\text{var}(ELF MF_{60Hz})_{\text{modelo n}^{\circ}5} = \sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 = 0,2077 \quad (92)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 1}) = \frac{\sigma_{\text{nível 1}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2} = 0,7804 \quad (93)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 2}) = \frac{\sigma_{\text{nível 2}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2} = 0,0183 \quad (94)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 3}) = \frac{\sigma_{\text{nível 3}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2} = 0,2013 \quad (95)$$

Através da equação (93), observa-se que 78,04% dos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo são explicados pelo nível medições, que assim como nos demais modelos representa o nível de percentual mais expressivo, que pode ser explicado pelas particularidades do procedimento de medição da intensidade de ELF MF. As equações (94) e (95) revelam que os percentuais dos efeitos aleatórios dos níveis ambiente (1,83%) e apartamento (20,13%), que referem-se a aspectos relacionados aos ambientes e aos apartamentos que não estão sendo levados em consideração pelo modelo n^o5 transformado, como as características dos apartamentos (para o nível apartamento) e a presença e quantidade de fontes emissoras de ELF MF nos ambientes avaliados (para o nível ambiente).

As equações (94) e (95) também evidenciam que quando são considerados os efeitos aleatórios do ambiente e do apartamento ao mesmo tempo, os efeitos aleatórios do nível apartamento predominam sobre os do nível ambiente, o que pode ser verificado comparando-se os coeficientes de correlação intraclasses encontrados para o modelo n^o 5 transformado (78,04% para o nível medições, 1,83% para o nível ambiente e 20,13% para o nível apartamento) com os dos modelos n^o2 transformado (77,05% para o nível medições e 22,95% para o nível apartamento) e o modelo n^o 3 transformado (81,12% para o nível medições e 18,87% para o nível ambiente).

Diante dos efeitos aleatórios expressivos que encontrou-se para o nível apartamento, reitera-se a relevância de estudos que avaliam a exposição a ELF MF em apartamentos localizados em edificações dotadas de estações de transformadores. Investigações desse tipo tem sido desenvolvidas nos últimos anos em diferentes países, dentre eles Finlândia (Ilonen *et al.*, 2008), Israel (Hareuveny *et al.*, 2011), Hungria (Szabo, Gabor e Thuroczy, 2007; Thuróczy *et al.* 2008) e Suíça (Röösli *et al.*, 2011), alguns deles utilizando a metodologia TransExpo, que consiste num estudo epidemiológico de leucemia infantil e campos magnéticos. O conceito central para estudos que seguem essa metodologia é o de que em edificações que

possuem transformador interno, o apartamento mais próximo do transformador pode ter uma exposição mais elevada a ELF MF do que os apartamentos mais afastados. Portanto, muitos desses estudos comparam as taxas de leucemia infantil entre diferentes apartamentos no mesmo prédio, a fim de constatar qualquer efeito dos campos magnéticos.

Mesmo sendo inferiores ao nível apartamento, vale ressaltar que os efeitos aleatórios do nível ambiente sugerem maiores investigações do ELF MF no interior de ambientes residenciais, pois é neles que as crianças permanecem durante a maior parte do seu tempo livre. Nesse contexto, verificar o efeito do ELF MF no desenvolvimento da leucemia infantil é de importância tal que Aboud e Anis (2009) discutiram, com base num compilado de estudos anteriores, que crianças com leucemia linfoblástica aguda apresentam risco quatro vezes maior (risco aumentado em 450%) de pior sobrevida quando se recuperam em ambientes com intensidade de ELF MF $0,3 \mu\text{T}$ e acima (razão da chance de 4,5, para o intervalo de confiança de 1,5–13,8). Também afirmaram que crianças com a mesma doença se recuperando em ambientes com intensidade de $0,2 \mu\text{T}$ apresentam três vezes mais chances de morte (risco aumentado em 300%) do que crianças que permanecem em ambientes com ELF MF de $0,1 \mu\text{T}$ (razão da chance de 3,0, intervalo de confiança de 0-9,8).

Medição, ambiente e edifício

Para constatar se é possível admitir variações aleatórias em virtude das características dos edifícios, além dos níveis medições e ambiente, inseriu-se ao modelo nº3 o erro aleatório do nível edifício, elaborando-se o modelo nº6, com efeitos aleatórios em três níveis: medições, ambiente e edifício.

O modelo nº6, assim como os modelos nº3 e nº5 apresentou parâmetros significativos ($t\text{-valor} > 2$ ou $t\text{-valor} < -2$) apenas para a variável adjacência, enquanto para as variáveis que descrevem o tipo de ambiente (quarto, sala e sala-cozinha) os parâmetros foram não significativos (Tabela 19).

Tabela 19 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,346	5,591
Adjacência (Sim)	0,313	2,270
Quarto	-0,009	-0,122
Sala	-0,007	-0,079
Sala-cozinha	-0,039	-0,239

Fonte: Dados da pesquisa.

Removendo os parâmetros não significativos do modelo nº6, encontrou-se o modelo nº6 selecionado, cujos parâmetros constam na Tabela 20, e que é descrito pelas equações (96) a (99).

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (96)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (97)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + 0,306 ADJ \quad (98)$$

$$\theta_{000k} = 1,339 + \xi_{000k} \quad (99)$$

Tabela 20 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício nº6 selecionado.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,339	5,727
Adjacência (Sim)	0,306	2,370

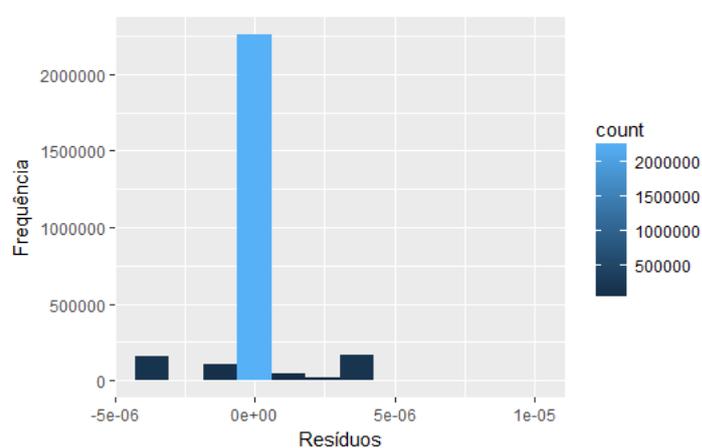
Fonte: Dados da pesquisa.

As equações (96), (97) e (99) demonstram os efeitos aleatórios considerados no modelo nº6 e a equação (98) apresenta o efeito fixo da variável adjacência, única do Quadro 2 que permaneceu no modelo. O intercepto geral do modelo, que representa a intensidade esperada de ELF MF a 60 Hz ao desconsiderar-se o efeito fixo da variável adjacência, é dado pela equação (99). A expressão geral do modelo nº6 assemelha-se ao modelo descrito por (19), sendo descrita pela equação (100).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,339 + 0,306 ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + \xi_{000k} \quad (100)$$

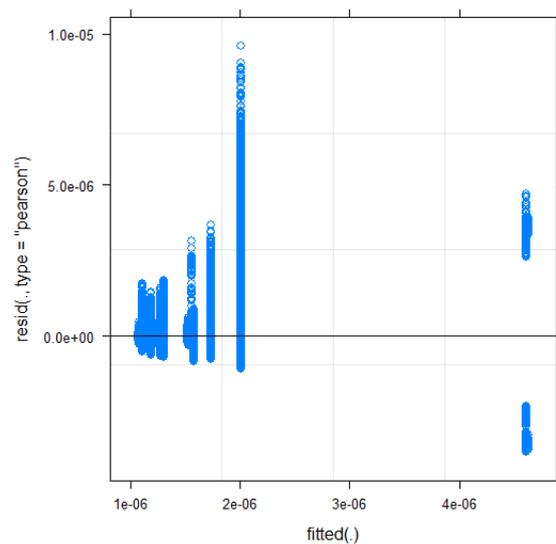
Assim como procedeu-se com os modelos anteriores, avaliou-se os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade através do histograma dos resíduos (Figura 32) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº6 (Figura 33).

Figura 32 – Histograma dos resíduos do modelo nº 6.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 33 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 6.



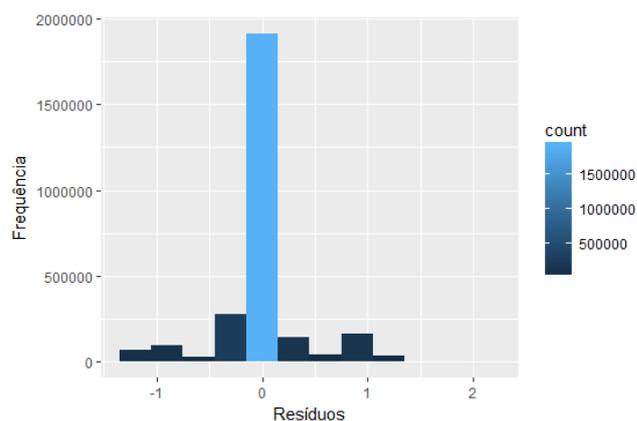
Fonte: Dados da pesquisa.

Assim como ocorreu com os demais modelos, a análise das Figuras 32 e 33, respectivamente, revelou que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº6 não pode ser aproximada para a distribuição normal e que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que não obedece o pressuposto da homocedasticidade. Desse modo, optou-se por conduzir uma transformação pela aplicação de logaritmo na variável dependente. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição, ambiente e edifício que anteriormente era tal qual a expressão (100), passa a ser descrito pela equação (101).

$$\log ELF MF_{60Hz} = 1,339 + 0,306 ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + \xi_{000k} \quad (101)$$

A fim de verificar se os resíduos do modelo nº6 transformado possuem distribuição normal plotou-se o histograma dos resíduos mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Histograma dos resíduos do modelo nº 6 transformado.

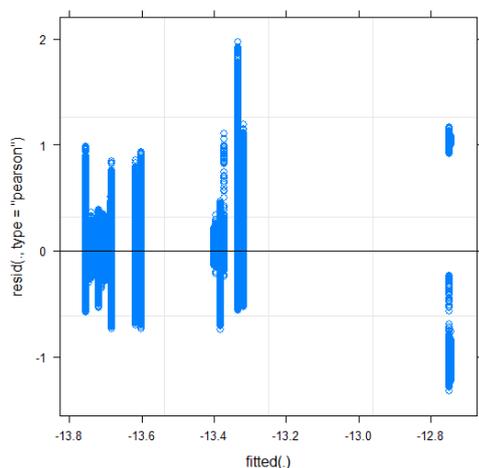


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 34 constata-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº6 transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo nº6 não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 35) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido para o modelo nº6 transformado.

Figura 35 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº6 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo nº6 (100) inicialmente selecionado foi substituído pelo modelo nº6 transformado (101), cuja expressão pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (102) a (104), de modo que possibilite a interpretação dos seus parâmetros fixos, descritos na Tabela 21.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6709 + 0,2112ADJ + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + \xi_{000k}} \quad (102)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6709} e^{0,2112ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (103)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,6709} (e^{0,2112})^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (104)$$

Tabela 21 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	-13,6709	-225,397
Adjacência (Sim)	0,2112	3,133

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos parâmetros exibidos na Tabela 21, a equação (104) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (105).

$$ELF\ MF_{60Hz} = 1,1555(1,2351)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\xi_{000k}} \quad (105)$$

Quantos aos efeitos fixos, o intercepto geral do modelo nº6 transformado (105) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,1555 μ T. Esse valor supera em 0,7555 μ T o valor de referência de intensidade de ELF MF de 0,4 μ T acima do qual o público pode estar susceptível a desenvolver a longo prazo doenças de maior seriedade, como câncer de mama.

Em um estudo de caso-controle de base populacional para investigar se a exposição a ELF MF está associada a um risco aumentado de câncer de mama em mulheres de 20 a 74 anos da região metropolitana de Seattle, Washington, Davis, Mirick e Stevens (2007) discutiram que a exposição a campos magnéticos na frequência de 60 Hz pode aumentar o risco de câncer de mama pelo fato de suprimir a produção noturna de melatonina. Segundo os autores, essa supressão pode provocar a elevação dos níveis de estrogênio circulante ou, devido a propriedade oncostática da própria melatonina, ser capaz de ocasionar o câncer de mama. Também evidenciaram que efeitos mais fortes da exposição a ELF MF foram observados durante os meses de verão, quando os níveis de melatonina decresciam.

O parâmetro fixo da variável adjacência indica que apartamentos diretamente adjacentes a transformadores internos tendem a apresentar valores de ELF MF a 23,51% maiores que os apartamentos não adjacentes, de modo que considerar a intensidade de ELF MF no interior dessas residências possibilita investigar a possível associação dessa exposição com o desenvolvimento de distúrbios a saúde, dentre eles o que apresenta um maior número de evidências na literatura: a leucemia infantil (FLODERUS *et al.*, 1993; MILLER *et al.*, 1996; AHLBOM *et al.*, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; CALVENTE, 2010; ELWOOD, 2017; GRELLIER; RAVAZZANI; ELISABETH, 2014).

A literatura também descreve outros distúrbios que podem ser desencadeados em consequência da exposição continuada a campos magnéticos de extrema baixa frequência produzidos por fontes fixas, como os transformadores. Wang *et al.* (2013), por exemplo, investigaram a associação da exposição a ELF MF com o risco de aborto na China, tendo verificado que o nível de exposição a ELF MF foi significativamente associado com os valores máximos de ELF MF mensurados em ruelas em frente às

casas das mulheres, nas quais permanecem por períodos consideráveis do seu dia, tendo encontrado um risco relativo de aborto espontâneo de 2,35 (para 95% de confiança, com intervalo de confiança de 1,18-4,71).

Quanto aos efeitos aleatórios, a Tabela 22 exibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os níveis hierárquicos 1, 2 e 4 nos quais admitiu-se termo de erro aleatório.

Tabela 22 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente e edifício.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,09905	0,009812
Ambiente	0,20431	0,041741
Edifício	0,40265	0,162129

Fonte: Dados da pesquisa.

Conforme já comentado, a variância de cada um dos níveis hierárquicos que contêm erros aleatórios expressa a variação da ELF MF na frequência de 60 Hz que independe das variáveis do modelo e que apresenta um comportamento aleatório. A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição, apartamento e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22), (23) e (25). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (106) a (109).

$$\text{var}(ELF MF_{60Hz})_{\text{modelo n}^{\circ}6} = \sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2 = 0,2136 \quad (106)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 1}) = \frac{\sigma_{\text{nível 1}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,7588 \quad (107)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 2}) = \frac{\sigma_{\text{nível 2}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,0459 \quad (108)$$

$$\text{cor}(y_{tijk} | \text{nível 4}) = \frac{\sigma_{\text{nível 4}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,1953 \quad (109)$$

Através da equação (107), observa-se que 75,88% dos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo são explicados pelo nível medições, que assim como nos demais modelos representa o nível de percentual mais expressivo, que pode ser explicado pelas características do local no qual o

procedimento de mensuração da intensidade de ELF MF foi realizado. As equações (108) e (109) revelam que os percentuais dos efeitos aleatórios dos níveis ambiente (4,59%) e edifício (19,53%), que referem-se a aspectos relacionados aos ambientes e aos edifícios que não estão sendo levados em consideração pelo modelo nº6 transformado, como a presença e quantidade de fontes emissoras de ELF MF nos ambientes avaliados (para o nível ambiente) e as características do entorno que circunda as edificações (para o nível edifício).

A fim de comparar os resultados dos coeficientes de correlação intraclasse referentes ao modelo transformado nº6, exibidos nas equações (107), (108) e (109), com os coeficientes de correlação intraclasse do modelo nº5 transformado, mostrado pelas equações (93), (94) e (95) e o modelo nº 4 transformado, obtido nas expressões (79), (80) e (81), reuniu-se todos os valores na Tabela 23.

Tabela 23 – Coeficientes de correlação intraclasse para os níveis contendo erros aleatórios dos modelos nº4, nº5 e nº 6 transformados.

Nível	Modelo nº 4 transformado	Modelo nº 5 transformado	Modelo nº 6 transformado
Medições	77,05%	78,04%	75,88%
Ambiente	---	1,83%	4,59%
Apartamento	22,94%	20,13%	---
Edifício	0,00000029%	---	19,53%

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 23 evidencia que o nível medições (1º nível) é responsável pelo maior percentual de efeitos aleatórios quando comparado aos níveis mais elevados considerados nos três modelos hierárquicos comparados, tendo sido mais pronunciado no modelo de nº5. O nível ambiente (2º nível) apresentou os menores percentuais dos efeitos aleatórios nos modelos nos quais o erro deste nível foi considerado (nº5 e nº6).

A partir da Tabela 23 identifica-se que o nível apartamento (3º nível) exibiu percentuais acima de 20% nos modelos nº4 e nº5, o que sugere que os efeitos aleatórios desse nível se sobressaem sobre os dos níveis ambiente e edifício, dando indícios de que estudos que levem em consideração um número maior de variáveis

nesse nível podem obter maior detalhamento acerca da variação na intensidade de ELF MF no interior de residências.

Considerando o potencial das estações de transformadores internos para provocar elevações nos ELF MF no interior das edificações verticais, Ilonen *et al.* (2008) realizaram medições de 24 horas em apartamentos diretamente adjacentes (DA) e não adjacentes (NA) aos transformadores, tendo encontrado uma média de $0,62 \mu\text{T}$ para os DA e $0,11 \mu\text{T}$ nos NA. Tais resultados expostos por Ilonen *et al.* (2008), assim como os resultados dos parâmetros associados à variável adjacência dos modelos n^o1 a n^o6 transformados indicam que os apartamentos podem ser classificados com segurança em duas categorias de exposição com base na sua localização em relação a estações de transformadores: alta exposição a ELF MF no caso dos adjacentes e baixa exposição a ELF MF para os não-adjacentes.

Ainda tomando como base a Tabela 23, destaca-se que o nível edifício (4^o nível) exprimiu um percentual de efeitos aleatórios relevante (acima de 20%) apenas para o modelo n^o6, no qual o nível ambiente também exibiu o maior percentual (4,59%) dentre os modelos n^o5 e n^o 6 em que foi considerado.

Em suma, quando são considerados os efeitos aleatórios do nível ambiente, medições e edifícios, os efeitos aleatórios do nível edifício podem ser julgados como relevantes. Já ao considerar-se os efeitos aleatórios dos níveis medições, apartamento e edifício, os efeitos aleatórios do nível edifício podem ser apontados como insignificantes.

Qualidade do ajuste dos modelos n^o4, n^o5 e n^o6 transformados

A fim de comparar a qualidade do ajuste dos modelos n^o4, n^o5 e n^o6 transformados, sendo o primeiro descrito pelas equações (77), (91) e (105), respectivamente, utilizou-se o logaritmo da função de verossimilhança (logLik) e o AIC. Os resultados são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois níveis.

Nº	Modelo hierárquico	Níveis com termos aleatórios	Nº de termos fixos	LogLik	AIC
4 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,18 (1,389)^{ADJ} (0,9591)^{QUA} (0,9268)^{SAL} (0,9449)^{SAC0Z} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{oijk}} e^{\xi_{000k}}$ (77)	Medições, apartamento e edifício	5	-1415770	2831556
5 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,129(1,391)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{oijk}} e^{\varepsilon_{00jk}}$ (91)	Medições, ambiente e apartamento	2	-1404900	2809809
6 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,1555(1,2351)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{oijk}} e^{\xi_{000k}}$ (105)	Medições, ambiente e edifício	2	-1404907	2809825

Fonte: Dados da pesquisa.

Como já referido anteriormente, quanto maior o valor de logLik melhor será o ajuste do modelo. Seguindo esse critério, a partir da Tabela 24 identifica-se que o modelo com melhor ajuste é o modelo nº5 transformado, que apresenta erros aleatórios nos níveis medições, ambiente e apartamento; seguido do modelo nº6 transformado, com erros aleatórios nos níveis medições, ambiente e edifício; e, por último, o modelo nº4 transformado, com erros aleatórios nos níveis medições, apartamento e edifício.

Já quanto menor o valor de AIC, melhor pode ser considerado o ajuste. Desse modo, a Tabela 24 mostra que novamente o modelo com melhor ajuste é o nº5, seguido do modelo nº6, e, por fim, o modelo de nº4.

Observa-se, no entanto, que a qualidade do ajuste dos modelos nº5 e nº6 transformados foi muito semelhante. Levando em consideração que a diferença entre esses dois modelos reside no fato do primeiro considerar o nível apartamento e o segundo o nível edifício, juntamente com os níveis medições e ambiente, há indícios de que os efeitos aleatórios desses níveis se confundem entre si. Recordando a mudança drástica que ocorreu com os percentuais de variação aleatória do modelo nº1 (contendo erros aleatórios nos níveis medições e edifício) após a introdução do erro aleatório do nível apartamento, para gerar o modelo de nº4 (contendo erros aleatórios nos níveis medições, apartamento e edifício), em que praticamente toda a

parcela de efeito aleatório que era atribuído ao nível edifício passou a ser devido ao nível apartamento, esse indício é reforçado.

Uma das possíveis explicações para essa dificuldade de diferenciação entre os efeitos aleatórios dos níveis apartamento e edifício é a quantidade semelhante de apartamentos e edifícios utilizados, 17 e 14, respectivamente. Isso ocorreu porque em apenas dois edifícios foram avaliados mais de um apartamento, de forma que a consideração de um número maior de apartamentos por edificação poderia evitar que isso ocorresse.

4.1.3 Modelos hierárquicos com efeitos aleatórios em quatro níveis hierárquicos

Para concluir os testes de efeitos aleatórios apenas no intercepto do modelo hierárquico de regressão, foi implementado o modelo contendo erros aleatórios em todos os quatro níveis, a fim de verificar se é possível admitir variações aleatórias no intercepto atribuídas simultaneamente às características das medições, dos ambientes, dos apartamentos e dos edifícios.

Com base nos resultados encontrados para os modelos nº3, nº5 e nº6 transformados, optou-se por elaborar o modelo contendo apenas a variável adjacência, uma vez que o erro aleatório no nível ambiente seria considerado nesse novo modelo. Com a inserção dos efeitos aleatórios nos quatro níveis, obteve-se o modelo de nº7. A Tabela 25 exibe os resultados referentes aos efeitos fixos para este modelo.

Tabela 25 – Parâmetros fixos do modelo de regressão hierárquica com erro aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	1,280	5,470
Adjacência (Sim)	0,530	1,859

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tabela 25 mostra que o t-valor do parâmetro fixo da variável adjacência se situa entre -2 e 2, sendo, portanto, caracterizado como não significativo. Seguindo o mesmo procedimento de seleção de variáveis utilizado em modelos anteriores, excluiu-se essa variável, com a finalidade de construir um modelo que contivesse

apenas parâmetros significativos. O modelo nº7 selecionado é descrito pelos submodelos (110) a (113). Os valores associados ao intercepto constam na Tabela 26.

$$ELF MF_{60Hz} = \alpha_{0ijk} + \pi_{tijk} \quad (110)$$

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00jk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (111)$$

$$\beta_{00jk} = \theta_{000k} + e_{00jk} \quad (112)$$

$$\theta_{000k} = 1,440 + \xi_{000k} \quad (113)$$

As equações (110) a (113) demonstram os efeitos aleatórios considerados no modelo nº7 e a equação (113) apresenta o intercepto geral do modelo. Com esse resultado, conclui-se que no modelo nº 7, que admite variações aleatórias em todos os quatro níveis, pelo fato de nenhuma das variáveis ter permanecido, supõe-se que todas as variações nos valores de ELF MF de 60 Hz são aleatórias e não podem ser explicadas pelas variáveis testadas do modelo, descritas no Quadro 2. A ausência de parâmetros significativos associados a estas variáveis pode ser uma consequência dos indicadores utilizados para descrever estas variáveis. A expressão geral do modelo selecionado nº7 é mostrada pela equação (114).

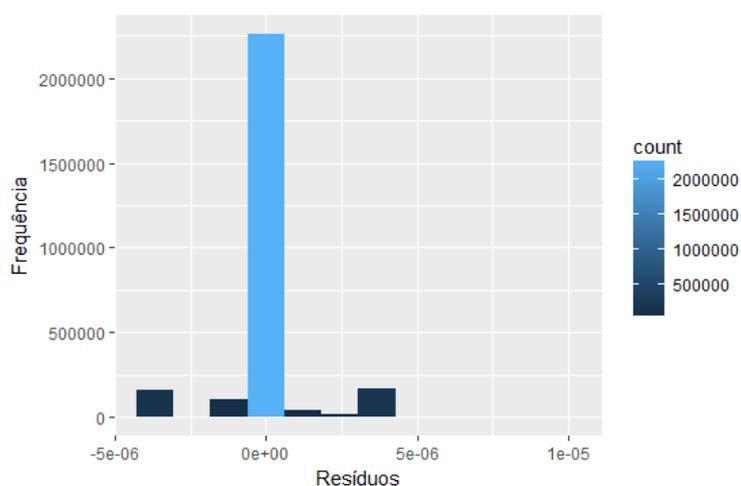
$$ELF MF_{60Hz} = 1,440 + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (114)$$

Tabela 26 – Parâmetros fixos do modelo final de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.

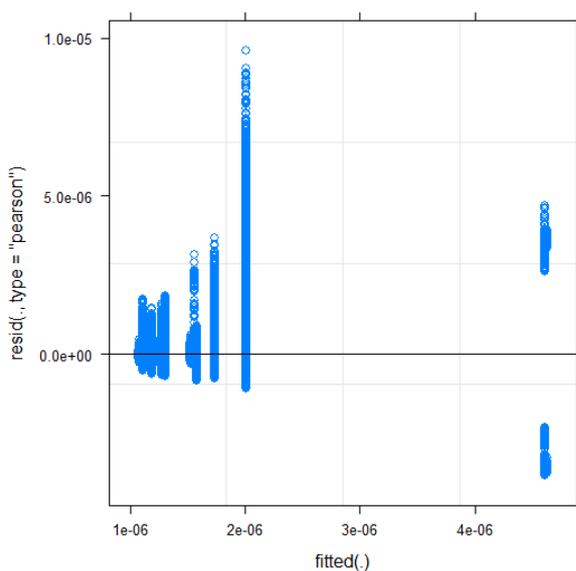
Variáveis	Coefficiente	t-value
Intercepto	1,440	5,825

Fonte: Dados da pesquisa.

Avaliou-se os pressupostos da normalidade dos resíduos e da homocedasticidade através do histograma dos resíduos (Figura 36) e do resíduo em função do valor ajustado do modelo nº6 (Figura 37).

Figura 36 – Histograma dos resíduos do modelo nº 7.

Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 37 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo nº 7.

Fonte: Dados da pesquisa.

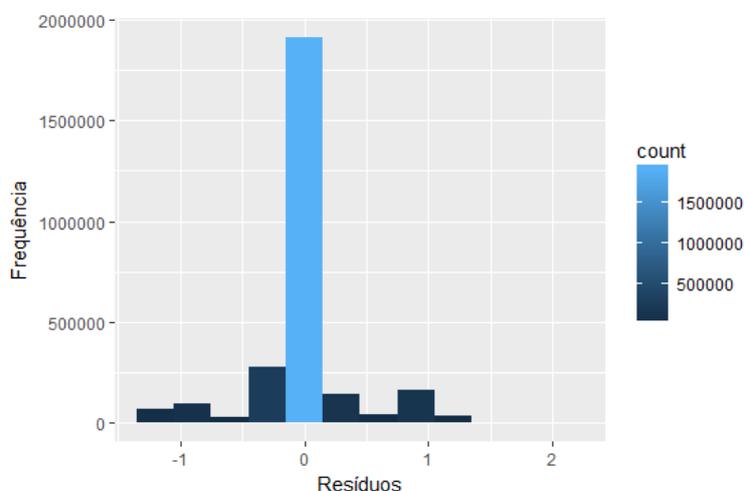
Assim como ocorreu com os demais modelos, a análise das Figuras 36 e 37, respectivamente, revelou que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº7 não pode ser aproximada para a distribuição normal e que os resíduos não apresentam uma oscilação uniforme para diferentes valores ajustados, de modo que o modelo nº 7 não obedece o pressuposto da homocedasticidade. Assim como realizado

com modelos anteriores, aplicou-se logaritmo na variável dependente como forma de transformação. Com isso, a equação geral do modelo hierárquico de regressão com erro nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício que era tal qual a expressão (114), passa a ser descrito pela equação (115).

$$\log ELF MF_{60Hz} = 1,440 + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} + \xi_{000k} \quad (115)$$

A fim de verificar se os resíduos do modelo nº7 transformado possuem distribuição normal plotou-se o histograma dos resíduos mostrado na Figura 38.

Figura 38 – Histograma dos resíduos do modelo nº 7 transformado.

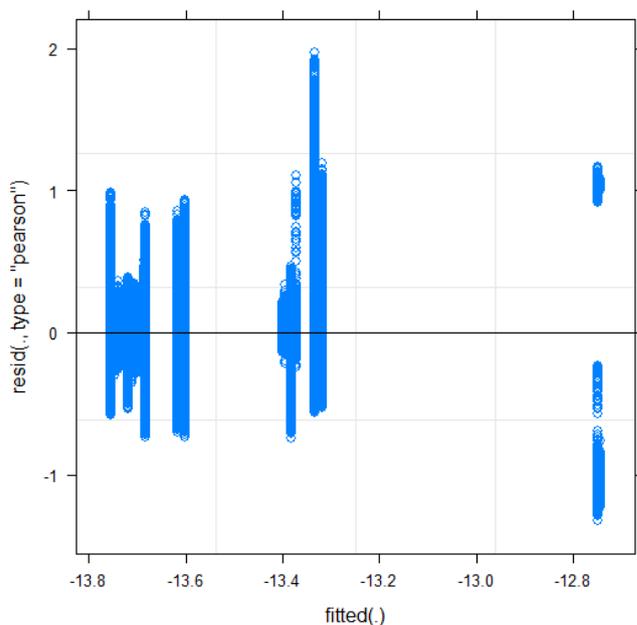


Fonte: Dados da pesquisa.

Pela Figura 38 constata-se que a distribuição dos valores de erro do modelo hierárquico nº7 transformado possui uma maior aproximação da distribuição normal do que o modelo nº7 não transformado.

O gráfico dos resíduos em função do valor ajustado (Figura 39) mostra que uma oscilação mais uniforme dos resíduos para diferentes valores ajustados, de modo que o pressuposto da homocedasticidade é obedecido para o modelo nº7 transformado.

Figura 39 – Resíduo em função do valor ajustado do modelo n°7 transformado.



Fonte: Dados da pesquisa.

Por não ter obedecido os pressupostos necessários para sua validade, o modelo n°7 (114) inicialmente selecionado foi substituído pelo modelo n°7 transformado (115), cuja expressão pode ser rearranjada, conforme mostrado pelas equações (116) a (118), sendo o intercepto descrito na Tabela 27.

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,592 + \pi_{tijk} + \varepsilon_{0ijk} + e_{00jk} + \xi_{000k}} \quad (116)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,592} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{e_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (117)$$

$$ELF MF_{60Hz} = e^{-13,592} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{e_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (118)$$

Tabela 27 – Intercepto do modelo de regressão hierárquica com erros aleatórios nos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.

Variáveis	Coefficiente	t-valor
Intercepto	-13,592	-199,8

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir dos valores dos parâmetros exibidos na Tabela 27, a equação (118) assume uma forma mais desenvolvida, conforme a expressão (119).

$$ELF MF_{60Hz} = 1,2504 e^{\pi t_{ijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\varepsilon_{00jk}} e^{\xi_{000k}} \quad (119)$$

O intercepto geral do modelo nº7 transformado (119) exprime que, independentemente do efeito fixo das variáveis, a média esperada de intensidade de ELF MF a 60 Hz é de 1,2504 μ T. Esse valor supera em 0,8504 μ T o valor de referência de intensidade de ELF MF de 0,4 μ T acima do qual os moradores de residências verticais podem ter sua saúde afetada. Jirik *et al.* (2012) propuseram que a exposição a campos magnéticos de extrema baixa frequência acima de 0,2 μ T, 0,3 μ T e 0,4 μ T pode estar associada a um risco ligeiramente aumentado de leucemia infantil, e, embora não tenham conseguido estabelecer uma associação significativa entre esses valores de ELF MF e a leucemia infantil em um estudo caso-controle desenvolvido na República, sugeriram que a consideração de um número maior de participantes, bem como a inclusão de seu status socioeconômico podem nortear investigações futuras.

Quanto aos efeitos aleatórios, a Tabela 28 exhibe os valores de desvio padrão e variância obtido para os quatro níveis hierárquicos.

Tabela 28 – Desvio padrão e variância dos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício.

Nível	Desvio padrão (σ)	Variância (σ^2)
Medições	0,40265	0,162129
Ambiente	0,06184	0,003824
Apartamento	0,19851	0,039408
Edifício	0,16873	0,028471

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância total do modelo foi obtida a partir da equação (21), constituindo a soma das variâncias dos níveis medição, ambiente, apartamento e edifício. A correlação intra-classe para cada um desses níveis foi calculada de acordo com as equações (22), (23), (24) e (25). Os resultados obtidos são descritos nas expressões (120) a (124).

$$var(ELF MF_{60Hz})_{modelo\ n^{\circ}7} = \sigma_{nível\ 1}^2 + \sigma_{nível\ 2}^2 + \sigma_{nível\ 3}^2 + \sigma_{nível\ 4}^2 = 0,2338 \quad (120)$$

$$cor(y_{tijk}|nível\ 1) = \frac{\sigma_{nível\ 1}^2}{\sigma_{nível\ 1}^2 + \sigma_{nível\ 2}^2 + \sigma_{nível\ 3}^2 + \sigma_{nível\ 4}^2} = 0,6934 \quad (121)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 2}) = \frac{\sigma_{\text{nível 2}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,0163 \quad (122)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 3}) = \frac{\sigma_{\text{nível 3}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,1685 \quad (123)$$

$$\text{cor}(y_{tijk}|\text{nível 4}) = \frac{\sigma_{\text{nível 4}}^2}{\sigma_{\text{nível 1}}^2 + \sigma_{\text{nível 2}}^2 + \sigma_{\text{nível 3}}^2 + \sigma_{\text{nível 4}}^2} = 0,1218 \quad (124)$$

Através da equação (121), observa-se que 69,34% dos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo são explicados pelo nível medições, que assim como nos demais modelos representa o nível de percentual mais expressivo, que pode ser explicado pelas características do local no qual o procedimento de mensuração da intensidade de ELF MF foi realizado. As equações (122), (123) e (124) revelam que os percentuais dos efeitos aleatórios dos níveis ambiente (1,63%), apartamento (16,85%) e edifício (12,18%), que referem-se a aspectos relacionados aos ambientes, aos apartamentos e aos edifícios que não estão sendo levados em consideração pelo modelo nº7 transformado, como a presença e quantidade de fontes emissoras de ELF MF nos ambientes avaliados (para o nível ambiente), a adjacência a estações de transformadores internas (para o nível apartamento) e as características do entorno que circunda as edificações (para o nível edifício).

4.1.4 Modelos selecionados

Os modelos nº3 e nº5 selecionados dentre os modelos considerando erros aleatórios em dois e em três níveis, respectivamente, tem como semelhanças o fato de levarem em conta o erro aleatório no nível ambiente e o fato do nível medições ser responsável pelo maior percentual da variação não explicada pelo modelo, 81,13% e 78,04%, respectivamente. Embora o modelo de nº7 não tenha sido comparado com nenhum outro modelo efeitos aleatórios no intercepto em quatro níveis, ele compartilha das semelhanças dos modelos nº3 e nº5, tendo o nível medições sido responsável por 69,34% dos efeitos aleatórios. O percentual dos efeitos aleatórios do nível ambiente modelos nº5 e nº7 é também são semelhantes, correspondendo a 1,83% e 1,63%, nessa ordem.

As principais diferenças entre esses três modelos residem nos seguintes aspectos: no modelo nº7 não permaneceram efeitos fixos de variáveis, enquanto que nos modelos nº3 e nº5 há efeitos fixos da variável adjacência; no modelo nº7, o único

dos três no que contém erro aleatório no nível edifício, este nível exibiu um valor de 12,18% de efeitos aleatórios, similarmente ao modelo nº6 (19,53%), cujo ajuste foi bem próximo do modelo nº5.

Comparando a qualidade do ajuste dos modelos nº 3, nº5 e nº7, utilizando como critério o logaritmo da função de verossimilhança (logLik) e o AIC (Tabela 29), conclui-se que o modelo nº5 é o que apresenta o melhor ajuste segundo os critérios de logLik (para o qual teve o maior valor) e AIC (para o qual teve o menor valor). Esse resultado pode constituir um indício de que o efeito aleatório do nível apartamento, assim como medições e ambiente pode provocar a elevação do ELF MF no interior de residências verticais. Reforçando a participação das características dos apartamentos na elevação do ELF MF, Rösli *et al.* encontraram no interior de edificações verticais na Suíça uma média máxima de ELF MF de 2,00 μ T em apartamentos localizados no primeiro pavimento, diretamente adjacentes a transformadores; 0,45 μ T em apartamentos vizinhos a apartamentos diretamente adjacentes e 0,26 μ T em apartamentos localizados em outros andares. Os valores médios de ELF MF constatados pelos autores foram foram 0,34 μ T para apartamentos adjacentes, 0,14 μ T para apartamentos vizinhos aos adjacentes e 0,07 μ T em apartamentos de outros pavimentos.

Tabela 29 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos hierárquicos considerando os erros aleatórios em dois, três e quatro níveis.

Nº	Modelo hierárquico	Níveis com termos aleatórios	Nº de termos fixos	LogLik	AIC
3 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,11 (1,389)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}}$ (62)	Medições e ambiente	2	-1404916	2809840
5 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,129(1,391)^{ADJ} e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\varepsilon_{00jk}}$ (91)	Medições, ambiente e apartamento	2	-1404900	2809809
7 transformado	$ELF MF_{60Hz} = 1,2504 e^{\pi_{tijk}} e^{\varepsilon_{0ijk}} e^{\varepsilon_{00jk}} e^{\xi_{000k}}$ (119)	Medições, ambiente, apartamento e edifício	1	-1404902	2809814

Fonte: Dados da pesquisa.

O modelo transformado nº 5 selecionado evidencia que, pelo fato de 20,13% dos efeitos aleatórios deverem-se a fatores associados aos apartamentos que não estão sendo levados em consideração pelo modelo e a presença de transformadores internos consiste num agravante para a elevação do ELF MF no interior de residências verticais, sobretudo naquelas localizadas no primeiro andar, por serem diretamente adjacentes.

Através da consideração de alguns parâmetros dos transformadores que são relevantes para a avaliação da exposição a ELF MF, tomando como base o resultado exibido pelo modelo nº 5, é possível desenvolver normativas que estabeleçam o uso de equipamentos, de modo que a exposição provocada aos moradores seja a menor possível. Conforme explicitado por Hareuveny *et al.* (2011), em geral, uma estação de transformadores interna é composta por três componentes principais: um comutador de alta tensão, que é caracterizado pelo tipo de isolamento, que caso seja a ar obriga o equipamento a ser instalado perto do teto, devido à segurança elétrica durante manutenções; um transformador, que se caracterizam principalmente por sua tensão de entrada (que comumente é de 22 kV, 33 kV ou de 12, 6 kV) e potência nominal (variando em valores em torno de 630 kVA, 500 kVA, 400 kVA, 250 kVA, 110 kVA) e um comutador de baixa tensão.

Dentre esses componentes, o isolamento do comutador de alta tensão e a potência nominal são os que apresentam um maior impacto sobre a elevação do ELF MF. O isolamento é relevante porque quanto mais próximo ao teto da instalação estiver o transformador, tanto maior será a exposição nos apartamentos diretamente adjacentes a esses equipamentos. Quanto à potência do transformador, quanto mais elevada, maior o seu impacto na ocorrência de oscilações (GRELLIER; RAVAZZANI; CARDIS, 2014). Além desses três componentes, as estações de transformadores internos incluem alguns pacotes de cabos de alimentação e cabos que conectam os diferentes componentes entre si.

De acordo com medições de intensidade de campo magnético de extrema baixa frequência realizadas em edificações verticais de Israel, Hareuveny *et al.* (2011) constataram que os cabos de baixa tensão constituem um dos principais colaboradores para a elevação da exposição em torno e acima das estações de transformadores internos.

Outros aspectos que podem ser decisivos para o nível de exposição provocado no interior dos apartamentos é o número de transformadores que compõe a estação

de transformadores internos, que varia de um até três equipamentos, a altura da instalação (normalmente em torno de 2,5 m), o sistema de aterramento e, finalmente, a localização exata do comutador baixa tensão e dos demais componentes necessários para a transmissão de eletricidade.

Pelo fato do modelo transformado de número 5 demonstrar que quando são considerados os efeitos aleatórios do ambiente e do apartamento ao mesmo tempo, os efeitos aleatórios do nível apartamento predominam sobre os do nível ambiente (visto que os coeficientes de correlação intraclasse mostraram que 78,04% dos efeitos aleatórios devem-se ao nível medições, 1,83% ao nível ambiente e 20,13% ao o nível apartamento), ele fornece evidências de que não apenas o número de transformadores que compõe a estação de transformadores interna localizada nas residências, como também sua configuração e seus componentes têm potencial para elevar a exposição dos residentes de edificações verticais, sobretudo aqueles de apartamentos diretamente adjacentes, a níveis de ELF MF passíveis de gerar efeitos negativos à saúde a curto e a longo prazo.

Dentre os efeitos de curto prazo, a literatura do tema cita possíveis alterações na atividade locomotora (DIMITRIJEVIĆ, D. *et al.* 2014), ansiedade (SALUNKE; UMATHE; CHAVAN, 2013; KITAOKA, K. *et al.*, 2012), comportamento semelhante à depressão (KITAOKA, K. *et al.* 2012) e aborto espontâneo (WANG *et al.*, 2013).

Os efeitos de longo prazo, de maior intensidade e que são passíveis de gerar consequências mais graves à saúde são mencionados em um grande número de artigos de alcance internacional, tais como: desenvolvimento de mal de Parkinson (KHEIFETS *et al.*, 2009), esclerose lateral amiotrófica (HUSS; PETERS; VERMEULEN, 2018); e diversos tipos de câncer, dentre eles a leucemia infantil (FLODERUS *et al.*, 1993; MILLER *et al.*, 1996; AHLBOM *et al.*, 2000; MICHELOZZI *et al.*, 2002; CALVENTE, 2010; ELWOOD, 2017; GRELLIER; RAVAZZANI; CARDIS, 2014), o glioma (KARIPIDIS *et al.*, 2007b), o linfoma não-Hodgkin (KARIPIDIS *et al.*, 2007a), tumor cerebral (KHEIFETS *et al.*, 2010; ORABY *et al.*, 2018) e o câncer de mama (LIBURDY *et al.*, 1993; LONDON *et al.*, 2003; MILHAM, 2004; WEST *et al.*, 2013).

Como a diferença entre o ajuste dos modelos nº 5 e nº 7 é muito pequena, verifica-se que levar em consideração os efeitos aleatórios do nível edifício, além dos níveis medições, ambiente e apartamento, pode ajudar a desvendar fatores inerentes

à geometria urbana que contribuem para a elevação da intensidade de ELF MF na frequência de 60 Hz.

4.2 Modelos hierárquicos de regressão com efeitos aleatórios nas variáveis

Após várias tentativas de implementação de modelos hierárquicos de regressão contemplando efeitos aleatórios nas variáveis, os quais se caracterizam como de maior complexidade do que os modelos contendo apenas efeitos aleatórios no intercepto, principalmente devido ao maior número de parâmetros envolvidos; detectou-se uma limitação de hardware. Isso ocorreu uma vez que os computadores disponíveis para a elaboração dos modelos hierárquicos de regressão não comportavam a elevada demanda de memória gerada pela quantidade exorbitante de iterações necessárias para que os modelos convergissem e o programa R Project 3.3.3 exibisse os seus parâmetros.

Um fator que reforçou ainda mais essa limitação foi o vasto número de dados provenientes das medições de ELF MF feitas com o equipamento analisador de espectro eletromagnético SPECTRAN NF-5035, o qual efetua mensurações a cada 6 segundos. Esse número elevado de dados tornou o tamanho das planilhas de tabulação excessivo, o que acabava por demandar ainda mais memória durante a elaboração dos modelos.

Portanto, embora se reconheça a importância da consideração de efeitos aleatórios nas variáveis do Quadro 2, avaliadas neste artigo, sugere-se que modelos com esse grau de complexidade sejam obtidos em trabalhos futuros, em que sejam utilizados micro computadores com as peculiaridades necessárias para tal tarefa.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

A construção de modelos hierárquicos de regressão para análise de ELF MF mostrou-se uma metodologia relativamente eficaz para a determinação dos fatores internos e externos às residências localizadas em edificações verticais, que são capazes de ocasionar valores de ELF MF que superam $0,4 \mu\text{T}$, marca utilizada por autores da literatura internacional.

Pelo fato de não ter sido utilizado por nenhum dos estudos do tema publicados anteriormente à essa dissertação, a utilização de modelos hierárquicos pode gerar subsídios para a compreensão da exposição das pessoas que habitam residências verticais a ELF MF, a curto e a longo prazo. Com isso, pode-se investigar de que forma é possível minimizar a ocorrência de distúrbios a saúde provocados por essa exposição, conforme tem-se discutido em estudos epidemiológicos dos últimos anos.

A partir dessa compreensão, é possível orientar a modificação de legislações de cunho nacional e internacional que versam sobre limites de exposição do público em geral a ELF MF, assim como normas que norteiam a construção de edificações verticais dotadas de estações de transformadores internos.

Quando submetidos ao procedimento de diagnóstico, os modelos hierárquicos de regressão de menor complexidade elaborados nessa dissertação, que contemplam o termo de erro aleatório em dois, três e quatro níveis hierárquicos não apresentaram distribuição normal dos valores de erro aleatório e nem obedeceram ao pressuposto da homocedasticidade. Por essa razão, recorreu-se a realização de uma transformação logarítmica da variável dependente, que corresponde à intensidade de ELF MF na frequência de 60 Hz, de modo que os modelos de nº1, nº2, nº3, nº4, nº 5, nº 6 e nº 7, inicialmente dados pela equações (31), (44), (57), (71), (86), (100) e (114), respectivamente, passaram a ser descritos pelas equações (36), (49), (62), (77), (91), (105) e (119).

Dentre as variáveis consideradas, expressas no Quadro 2, as variáveis altura do apartamento (associada ao nível apartamento – nível 3); densidade de construções, distância média das construções presentes nas vizinhanças até a habitação de considerada, altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas e

altura do edifício (associadas ao nível edifício – nível 4) não permaneceram em nenhum dos modelos selecionados. Isso pode ter acontecido por alguns motivos: outras variáveis cujos efeitos fixos são protuberantes para o nível hierárquico ao qual pertencem não foram consideradas nessa dissertação; as variáveis testadas foram mensuradas por meio de indicadores inadequados, que acabaram por camuflar os efeitos fixos destas variáveis.

Considerando todas as residências avaliadas não houve oscilações representativas do ELF MF, de modo que os fatores que podem estar associados a morfologia urbana não impactaram de forma proeminente sobre a intensidade de ELF MF.

Unger (2009) enfatiza que quanto maior a proporção da largura das construções do entrono com relação à sua altura, maior é a porção de céu visível a partir das edificações. Assim, o autor ressalta que o fator de céu visível é uma medida de análise da geometria da radiação sob um determinado local, ou seja, é a porcentagem de radiação recebida do sol em uma superfície plana em relação à toda a abóbada (UNGER,2009). Se ao invés de considerar de forma separada as variáveis densidade de construções, distância média das construções presentes nas vizinhanças até a habitação de considerada, altura média das edificações presentes nas vizinhanças imediatas e altura do edifício tivesse sido utilizado o fator de visão do céu visível, poderiam ter sido obtidos modelos hierárquicos com um maior número de termos de efeito fixo.

Em contrapartida, com exceção do modelo nº 7 transformado, em que nenhuma variável permaneceu, a variável adjacência permaneceu em todos os demais modelos hierárquicos, com erros aleatórios em dois (nº1, nº2, nº3 transformados) e três níveis (nº4, nº5, nº6 transformados), indicando que apartamentos localizados no primeiro pavimento de edificações verticais dotadas de estações de transformadores internas (adjacentes) podem ser considerados como de alta exposição a ELF MF quando comparados aos apartamentos localizados em outros andares (não adjacentes). O valor do parâmetro fixo associado a essa variável nos modelos nº1 a nº6 transformados apontou a ocorrência de valores de ELF MF em apartamentos adjacentes de 4% e 40% mais elevados do que os não adjacentes.

Sobre essa gradação de valores de ELF MF em edificações com transformadores internos, em um estudo desenvolvido na Hungria, Szabo, Gabor e Thuroczy (2007) encontraram que a exposição média a ELF MF no interior de

apartamentos localizados diretamente acima de estações de transformadores foi de 3,03 μ T, durante 24 horas. Para as medições efetuadas no estudo, os autores observaram um aumento de aproximadamente duas vezes da exposição a ELF MF à noite, em comparação com o nível matinal.

Autores de outras investigações em edificações verticais com estações de transformadores internos, em diferentes regiões do mundo, como Szabo *et al.* (2007), Ilonen *et al.* (2008), Thuroczy *et al.* (2008), Hareuveny *et al.* (2011), Rössli *et al.* (2011) e Huss *et al.* (2013) também demonstraram que é possível identificar como população altamente exposta os residentes de apartamentos diretamente adjacentes aos transformadores, que consiste num dos motivos pelos quais alguns desses estudos identificam-se metodologicamente como TransExpo.

As variáveis descritivas do tipo de ambiente (quarto, sala, sala-cozinha e cozinha) permaneceram nos modelos nº1, nº 2 e nº4 transformados, que apresentam em comum o fato de não ter sido incluso o termo de erro aleatório do nível ambiente, ao qual as variáveis estão vinculadas. É provável que nos modelos em que o erro aleatório do nível ambiente foi incluído (nº 3, nº 5 e nº6) este tenha se sobressaído de tal modo que todo o efeito fixo dessas variáveis nos modelos nº1, nº2 e nº4 tenha sido revertido em efeitos aleatórios.

Com base nas semelhanças e diferenças constatadas entre os modelos nº1, nº4, nº5 e nº6 transformados no tocante ao percentual de efeitos aleatórios que não são explicados pelos modelos matemático, e que são advindos dos níveis apartamento e/ou edifício, nota-se que não foi possível definir qual dos dois níveis predomina um sobre o outro, uma vez que o nível medições é o que detém o maior percentual de efeitos aleatórios de todos os modelos elaborados e o nível ambiente apresentou percentuais menos expressivos no geral (tendo variado de cerca de 1% até aproximadamente 19% dos efeitos aleatórios).

Embora no modelo nº 4 transformado, que contém erros aleatórios nos níveis medições, apartamento e edifício, o percentual de erros aleatórios não explicado pelo modelo atribuído ao nível apartamento tenha sido 22,94%, contra apenas 0,00000029% do nível edifício; no modelo nº 7, que inclui erros aleatórios em todos os quatro níveis, os percentuais foram próximos, uma vez que o nível apartamento foi responsável por 16,85% e o nível edifício por 12,18% dos efeitos aleatórios que não são explicados pelas variáveis do modelo.

Comparando os modelos nº3 e nº5 transformados selecionados através dos critérios adotados para avaliação do ajuste, AIC e logaritmo da função de verossimilhança (logLik), com o modelo nº7 transformado (único modelo que obteve-se com erro nos quatro níveis hierárquicos), o modelo nº 5, que considera erro aleatório nos níveis medições, ambiente e apartamento, descrito pela equação (91), foi o que apresentou o melhor ajuste. Portanto, o modelo nº5 transformado é, dentre todos os modelos elaborados nessa dissertação, o que apresentou o melhor ajuste.

Esse modelo evidencia que 20,13% dos efeitos aleatórios deverem-se a fatores associados aos apartamentos que não estão sendo levados em consideração pelo modelo, o que implica no fato de que a presença de transformadores internos, assim como o número de transformadores e a sua configuração constituem agravantes para a elevação do ELF MF no interior de residências verticais, principalmente naquelas localizadas no primeiro andar, por serem diretamente adjacentes.

O modelo transformado de nº 5 demonstra, portanto, que os residentes de habitações dotadas de transformadores internos, por estarem constantemente expostos a campos magnéticos de extrema baixa frequência em níveis acima de 0,4 μT , estão mais propensos a desenvolver efeitos negativos à saúde de curto prazo (como alterações na atividade locomotora, ansiedade, comportamento semelhante à depressão e aborto espontâneo) e de longo prazo (desenvolvimento de mal de Parkinson, esclerose lateral amiotrófica, leucemia infantil, glioma, o linfoma não-Hodgkin, tumor cerebral e câncer de mama).

Considerando todas as residências avaliadas não houve oscilações representativas do ELF MF, de modo que os fatores que podem estar associados a morfologia urbana não impactaram de forma proeminente sobre a intensidade de ELF MF no interior das mesmas.

5.2 Limitações e sugestões para estudos futuros

Este estudo limita-se basicamente quanto à utilização de hardware que esteve disponível para a elaboração dos modelos matemáticos de regressão hierárquica, que inviabilizou a elaboração de modelos de maior complexidade do que os discutidos nessa dissertação, principalmente os modelos que incluem o efeito aleatório das variáveis do Quadro 2, que são de grande interesse tendo em vista as conclusões que podem ser obtidas de posse dos mesmos. Isso ocorreu porque um grande número de

dados de ELF MF obtidos nas residências, sobretudo para as coletas que superaram as 12 horas de duração. Esse número elevado de dados refletiu no tamanho excessivo dos arquivos de tabulação, o que demandava muita memória, tornando o procedimento de elaboração dos modelos demasiadamente lento.

Portanto, para estudos futuros, sugere-se a elaboração de modelos hierárquicos de regressão mais complexos, incluindo erros nos quatro níveis hierárquicos e mais efeitos aleatórios nas variáveis. Também sugere-se que sejam utilizados outros indicadores para mensurar e avaliar as variáveis testadas nessa dissertação e que se promova a inclusão de outras possíveis variáveis associadas aos níveis hierárquicos medições, ambiente, apartamento e edifício.

REFERÊNCIAS

33 WAYS TO SAVE THE WORLD, 2010. **Conserve Eletricidy**. 2010. Disponível em: <<https://33ways.wordpress.com/2010/11/20/12- conserve-electricity/>>. Acessado em 28 de novembro de 2017.

AARONIA AG. **Aaronia SPECTRAN NF-XXXX Manual**. 2010. Disponível em: <<https://aaroniausa.com/wp-content/uploads/2015/10/manual-NFXXXX-V1.31.pdf>>. 2010. Acessado em 29 de outubro de 2018.

AARONIA AG. **EMC Spectrum Analyzer SPECTRAN® NF Series**. 2009. Disponível em: <http://www.aaronia.com/Datasheets/Spectrum_Analyzer/Spectran-NF-Series.pdf>. Acessado em 29 de outubro de 2018.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE TELECOMUNICAÇÕES. **Resolução nº 303, de 02 de julho de 2002**. Aprova o Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>>. Acesso em 04 de dezembro de 2017.

AHLBOM, A. *et al.* A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. **British Journal of Cancer**, v. 83, n.5, p. 692–698, 2000.

ALLEN, S. G. *et al.* Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. **Physica Medica**, v.7, n.2, p. 77–89. 1991.

ARENDT, J. Melatonin: a new probe in psychiatric investigation? **The British Journal of Psychiatry**, v.155, n.5, p. 585-590, 1989.

BALBANI A. P.; KRAWCZYK, A. L. Efeitos da exposição aos campos eletromagnéticos do telefone celular. **Revista Brasileira de Medicina**, v.4, p.87-96. 2009.

BALBANI, A. P. S.; KRAWCZYK, A. L. Impacto do uso do telefone celular na saúde de crianças e adolescentes. **Revista Paulista de Pediatria**, v.29, n.3, p.430-436, 2011.

BELARDO, C. A. *et al.* Exposição humana a campos elétricos e magnéticos gerados por instalações elétricas 50 e 60 Hz. 2004. Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081117111935-41.pdf>> .

BERRIDGE, D. M.; CROUCHLEY, R. **Multivariate generalized linear mixed models using R**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011.

BEZERRA, M. I. L.; SANTOS, J. S.; AGUIAR, A. P. Ilhas de calor: importância da vegetação na amenização climática em João Pessoa/PB. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1499-1516. 2013.

BLANK, M.; GOODMAN, R. Comment: a biological guide for electromagnetic safety: the stress response. **Bioelectromagnetics**, v. 25, n. 8, p. 642-648. 2004.

BLANK, M. *et al.* International appeal: scientists call for protection from non-ionizing electromagnetic field exposure. **European Journal of Oncology**, v. 20, n. 3/4, p. 180-182. 2015.

BLANK, M. Section 7 - Evidence for stress response (stress proteins) - health risk of electromagnetic fields: research on the stress response. In: SAGE, C; CARPENTER, D. O. **BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2007.

BRASIL. **Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009**. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos; altera a Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l11934.htm>. Acesso em 04 de dezembro de 2017.

BRASIL. **Portaria nº 3214, de 08 de junho de 1978**. Aprova as Normas Regulamentadoras do Ministério de Estado do Trabalho, no uso de suas atribuições legais, considerando o disposto no art. 200, da Consolidação das Leis do Trabalho, com redação dada pela Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977. Brasília, 1978. Disponível em: <[http://acesso.mte.gov.br/data/files/FF8080814FF112E801529E4EFC2C655F/Portaria%20n.%C2%BA%203.214%20\(aprova%20as%20NRs\).pdf](http://acesso.mte.gov.br/data/files/FF8080814FF112E801529E4EFC2C655F/Portaria%20n.%C2%BA%203.214%20(aprova%20as%20NRs).pdf)>. Acesso em 04 de dezembro de 2017.

BRASIL. **Norma regulamentadora de Segurança e Saúde no Trabalho 09 (NR-09)** - Programa de Prevenção de Riscos Ambientais – PPRA. Brasília, 2017. Disponível em <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR09/NR-09-2016.pdf>>. Acesso em 04 de dezembro de 2017.

BRASIL. **Norma regulamentadora de Segurança e Saúde do Trabalho 15. (NR-15)** – Atividades e operações insalubres. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR15/NR-15.pdf>>. Acesso em 04 de dezembro de 2017.

BRITO, F. B. R. **Estudo da temperatura de globo em relação à temperatura do ar durante atividades cognitivas em ambientes de ensino com alterações climáticas em áreas das regiões brasileiras**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2017. 171 p.

BRODIĆ, D.; AMELIO, A. Classification of the extremely low frequency magnetic field irradiation measurement from the laptop computers. **Measurement Science Review**, v. 15, n. 4, p. 202-209. 2015.

BRODIĆ, D. Measurement of the extremely low frequency magnetic field in the laptop neighborhood. **Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia**, n. 76, p. 39-45, 2015.

BROWN, R. P. *et al.* A depressed mood and reality disturbance correlate with decreased nocturnal melatonin depressed patients. **Acta Psychiatrica Scandinavica**, v. 76, n.3, p. 272-275, 1987.

BRYK, S. A, RAUDENBUSH, W. **Hierarchical Linear Models**. Califórnia: Sage Publications, Inc., Newbury Park, 1992.

CABRITA, C. M. P. Efeitos biológicos dos campos electromagnéticos e da radiação. 2008. Universidade da beira interior unidade científica e pedagógica de ciências de engenharia - Departamento de engenharia electromecânica. 319 p. Disponível em: <<http://webx.ubi.pt/~catalao/livro.pdf>>.

CALVENTE, I.; FERNANDEZ, M. F.; VILLALBA, J.; OLEA, N.; NUÑEZ, M. I. Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: A systematic review. **Science of the Total Environment**, v. 408, n.16, p. 3062–3069, 2010.

CÂMARA, P. R. S. Effect of exposure to non-ionizing radiation (electromagnetic fields) on the human system: A literature review. **Jornal of Interdisciplinary Histopathology**, v.2, n.4, p. 187-190. 2014.

CARPENTER, D. O. **BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2007.

COMISSÃO INTERNACIONAL DE PROTEÇÃO CONTRA RADIAÇÕES NÃO-IONIZANTES (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). **Health Physics**, v. 74, n.4, p. 494-522. 1998.

CONSELHO NACIONAL DE PESQUISA DOS EUA. Comitê sobre os possíveis efeitos de campos eletromagnéticos em sistemas biológicos. **Possíveis efeitos na saúde da exposição a campos elétricos e magnéticos residenciais**. Washington, D. C.: *National Academies Press*, 1997.

COUTINHO, A. S. Proteção contra o calor. In: MATTOS, U. A. O.; MÁSCULO, F. S. (Eds.) *Higiene e segurança do trabalho*. Rio de Janeiro: Elsevier. 2011.

CUNHA, L. Densidade de ocupação do solo e Planeamento Urbano. Disponível em: <<http://analisesocial.ics.ul.pt/documentos/1224162116F0aLH6qb5Uq88WD9.pdf>>. Acesso em 05 de dezembro de 2017.

CUNNINGHAM, A. M. Electromagnetic Fields: In Search of the Truth. **Popular Science**, v.239, n.6, p.86-90. 1991.

DAVIS, S.; MIRICK, D. K.; STEVENS, R. G. Residential magnetic fields, medication use, and the risk of breast cancer. **Epidemiology**, v. 18, n. 2, 2007.

DIMITRIJEVIĆ, D. *et al.* Extremely low frequency magnetic field (50 Hz, 0.5 mT) modifies fitness components and locomotor activity of *Drosophila subobscura*. **International Journal of Radiation Biology**, v. 90, n.5, p. 337–343, 2014.

DRAPER, G.; VINCENT, T.; KROLL, M. E.; SWANSON, J.. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. **British Medical Journal**, v. 330, p.1-5. 2005.

ELWOOD, M. **Epidemiological studies of low-intensity ELF fields and diseases in humans**. In: WOOD, Andrew W.; KARIPIDIS, Ken. Non-ionizing – Radiation protection. USA: Wiley, cap. 20, p.313-321, 2017.

EMFS.INFO, Electric and magnetic fields and health. **Transexpo: a study based on transformers inside buildings**. Disponível em: <<http://www.emfs.info/research/studies/transexpo/>>. Acessado em 29 de janeiro de 2018.

FARAWAY, J. J. **Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FERREIRA, C. C. M. Modelo para análise das variáveis de cobertura da terra e a identificação de microclimas, em centros urbanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, p. 50-75. 2014.

FLODERUS, B. *et al.* Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. **Cancer Causes Control**, v. 4, n. 5, p. 465-476. 1993.

GARCIA, R. V. *et al.* **Technologies and innovation**. Second International Conference, CITI: Guayquil, Ecuador. Proceedings 2016. 280 p.

GENUIS, S.; LIPP, C. Electromagnetic hypersensitivity: fact or fiction?. **Science of the Total Environment**, v. 414, p. 103-112. 2012.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Unidade 2 – A pesquisa científica. In: GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS, Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. p.31-41.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOLDSTEIN, H. **Multilevel Statistical Models**. 2^a ed. New York: John Wiley & Sons. 1995.

GREENLAND, S. *et al.* A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. **Epidemiology**, v. 11, n.6, p. 624 – 634. 2000.

GRELLIER, J.; RAVAZZANI, P.; CARDIS, E. Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe. **Environment international**, v. 62, p. 55-63, 2014.

HA, M. *et al.* Radio-frequency radiation exposure from AM radio transmitters and childhood leukemia and brain cancer. **American Journal of Epidemiology**, v. 166, n. 3, p. 270-279. 2007.

HAGSTRÖM, M.; AURANEN, J.; EKMAN, R. Electromagnetic hypersensitive finns: symptoms, perceived sources and treatments, a questionnaire study. **Pathophysiology**, v. 20, n.2, p. 117-122, 2013.

HAREUVENY, R. *et al.* Exposure to 50Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations in Israel. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 21, n.4, p. 365–371, 2011.

HARRINGTON, J. M. *et al.* Leukaemia mortality in relation to magnetic field exposure: findings from a study of United Kingdom electricity generation and transmission workers, 1973–97. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 58, n. 5, p. 307–314. 2001.

HAVAS, M. Biological effects of non-ionizing electromagnetic energy: a critical review of the reports by the US National Research Council and the US National Institute of Environmental Health Sciences as they relate to the broad realm of EMF bioeffects. **Environmental Reviews**, v. 8, n. 3, p. 173-253. 2000.

HAVAS, M. Radiation from wireless technology affects the blood, the heart, and the autonomic nervous system. **Reviews on Environmental Health**, v. 28, n.2-3, p. 75-84. 2013.

HAVAS, M. When theory and observation collide: Can non-ionizing radiation cause câncer? **Environmental Pollution**, 221, 501-505, 2017.

HENSHAW, D. L. Does our electricity distribution system pose a serious risk to public health? **Medical Hypotheses**, v.59, n.1, p. 39–51, 2002.

HUSS, A. *et al.* Does apartment's distance to an in-built transformer room predict magnetic field exposure levels?. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 23, n. 5, p. 554-558, 2013.

HUSS, A.; PETERS, S.; VERMEULEN, R. Occupational Exposure to Extremely Low-Frequency Magnetic Fields and the Risk of ALS: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Bioelectromagnetics**, v.39, n.2, p.156-163, 2018.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. **Non-ionizing radiation** - Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon: IARC, v.80. 2002..

ILONEN, K. *et al.* Indoor Transformer Stations as Predictors of Residential ELF Magnetic Field Exposure. **Bioelectromagnetics**, v. 29, n.3, p. 213-218, 2008.

INSTITUTO EDUMED PARA EDUCAÇÃO EM MEDICINA E SAÚDE. **Revisão científica sobre radiação eletromagnética no espectro de radiofrequência e seus efeitos na saúde humana**. Comissão de Especialistas Latino-Americanos em Campos Eletromagnéticos de Alta Frequência e Saúde Humana. Disponível em: <<http://www.wireless-health.org.br/downloads/LASR2010-PadreesPolíticasProtecao-Port.pdf>>. Acesso em 03 de dezembro de 2017.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). **Health Physics**, v. 74, n.4, p. 494-522. 1998.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100 kHz). **Health Physics**, v.99, n.6, p.818-836. 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Statement on diagnostic devices using non-ionizing radiation: existing regulations and potential health risks. **Health Physics**, v.12, n.3, p. 305-321. 2017.

ISRAEL, M.; IVANOVA, M.; ZARYABOVA, V. Criticism of the philosophy for development of standards for non-ionizing radiation. **Environmentalist**, v. 31, n.2, p. 121–129, 2011.

JOHANSEN, C. *et al.* Risk for leukaemia and brain and breast cancer among Danish utility workers: a second follow-up. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 64, n. p. 782–784. 2007.

JOHANSSON, O. Electrohypersensitivity: state-of-the-art of a functional impairment. **Electromagnetic Biology and Medicine**, v. 25, n. 4, p. 245-258. 2006.

JOHANSSON, O. Section 08 - Evidence for effects on the immune system. In: SAGE, C.; CARPENTER, D. O. **BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2007.

JOHANSSON, O. Disturbance of the immune system by electromagnetic fields — a potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment. **Pathophysiology**, v. 16, n.2, p. 157–177. 2009.

KANDEL, S. *et al.* Magnetic Field Measurements near Stand-Alone Transformer Stations. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 157, n.4, p. 619–622, 2013.

KARIPIDIS, K. K. *et al.* Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of non-Hodgkin lymphoma. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, v. 80, n.8, p. 663–670. 2007a.

KARIPIDIS, K. K. *et al.* Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma. **Occupational Medicine**, v. 57, n.7, p. 518–524. 2007b.

KHEIFETS *et al.* A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. **American Journal of Epidemiology**, v.172, n.7, p. 752-761, 2010

KHEIFETS, L, *et al.* Epidemiologic study of residential proximity to transmission lines and childhood cancer in California: description of design, epidemiologic methods and study population. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, v.25, n.1, p.45-52. 2015

KHEIFETS, L. *et al.* Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. **Occupational & Environmental Medicine**, v. 66, n.2, p.72–80, 2009.

KITAOKA, K. *et al.* Chronic exposure to an extremely low-frequency magnetic field induces depression-like behavior and corticosterone secretion without enhancement of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis in mice. **Bioelectromagnetics**, v. 34, n.1, p. 43–51, 2012

LAI, H. Section 6. Evidence for genotoxic effects. In: SAGE, C.; CARPENTER, D. O. **Bioinitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2007. Disponível em: <http://www.bioinitiative.org/report/wp-content/uploads/pdfs/sec06_2007_Evidence_For_Genotoxic_Effects.pdf>. Acessado em 23 de novembro de 2017.

LAMBERTS, R. **Conforto e Stress Térmico**. Apostila do curso de Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Laboratório de Eficiência Energética. 2014. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila%20Conforto%20T%C3%A9rmico_2016.pdf>. Acesso em 05 de dezembro de 2017.

LAZAR, I. M. *et al.* Morphological changes during germination and growth of rapeseed samples (*brassica napus*) exposed to non-ionizing radiation. **Scientific Study & Research**, v.12, n.4, p. 401-408, 2011.

LEE, J. M. *et al.* **Electrical and biological effects of transmission lines: a review**. Bonneville Power Administration Portland, Oregon. 1996.

LEVITT, B. B.; LAI, H. Biological effects from exposure to electromagnetic radiation emitted by cell tower base stations and other antenna arrays. **Environmental Reviews**, v.18, n.a., p. 369-395. 2010.

LIBURDY, R.P. *et al.* ELF magnetic fields, breast cancer, and melatonin: 60 Hz fields block melatonin's oncostatic action on ER+ breast cancer cell proliferation. **Journal of Pineal Research**, v. 14, n. 2, p. 89-97, 1993.

LIN, H. *et al.* Electromagnetic field exposure induces rapid, transitory heat shock factor activation in human cells. **Journal of Cellular Biochemistry**, v. 66, n.4, p. 482-488. 1997.

LLAURADO, J. G. Highlights: biological effects of non-ionising electromagnetic radiations: fact or fiction? **Environmental Management and Health**, v 1, n. 1, p. 6- 8. 1990.

LONDON, S. J. *et al.* Residential Magnetic Field Exposure and Breast Cancer Risk: A Nested Case- Control Study from a Multiethnic Cohort in Los Angeles County, California. **American Journal of Epidemiology**, v. 158, n. 10, p. 969-980, 2003.

LONGYU, Z.; XIAODONG, L.; CHUNPENG, W.; KANGKANG, Y.; XUEJUN, L.; SHUANG, L.; HONGHONG, B.; XIN, L. Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: A meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls. **Leukemia Research**, v. 38, n.1, p. 269-274, 2014.

MARINO, A. A.; BECKER, R. O. High voltage lines. **Environment**, V.20, N.9, P.6-12, 1978.

MATTOS, I.; KOIFMAN, S. Capítulo 1 - Campos eletromagnéticos e câncer: contribuições da epidemiologia. In: ESCOLA SUPERIOR DO MINISTÉRIO PÚBLICO DE SÃO PAULO (ESMP). **Poluição eletromagnética. Saúde pública, meio ambiente, consumidor e cidadania: impactos das radiações das antenas e dos aparelhos celulares**. São Paulo: Caderno Jurídico, v 6, nº 2, p 288. 2004.

MATTOS, U.; MÁSCULO, F. **Higiene e Segurança do trabalho**. Rio de Janeiro: Elsevier/ Abrepo, 2011.

MCCOLL, N. *et al.* European Code against Cancer 4th Edition: Ionising and non-ionising radiation and cancer. **Cancer Epidemiology**, v. 39, n.1, p. 93-100. 2015.

MCINTYRE, I. M. *et al.* Plasma melatonin levels in affective states. **International Journal of Clinical Pharmacology Research**, v.9, n.2, p.159-164,1989.

MICHELOZZI, P. *et al.* Adult and childhood leukemia near a high-power radio station in Rome, Italy. **American Journal of Epidemiology**, v. 155, n. 12, p. 1096-1103, 2002.

MILHAM, S. Brief report a cluster of male breast Cancer in office workers. **American Journal of Industrial Medicine**, v. 46, n. 1, p. 86-87. 2004.

MILLER, A.B.; TO, T.; AGNEW, D.A; WALL, C.; LOIS, M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. **American Journal of Epidemiology**, v.144, n. 2, p. 150-160. 1996.

MINELLA, F. O.; ROSSI, F. A.; KRÜGER, E. L. Influência do fator de visão do céu no conforto térmico em duas situações urbanas distintas. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. Anais... Natal: 2009, p. 208- 217.

MIYAZAKI, V. K. **Estruturação da cidade e morfologia urbana: um estudo sobre cidades de porte médio da rede urbana paulista**. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013. 305 p.

MOFRECOLA, G.; MOFFA, G.; PROCACCINI, E. M. Non-ionizing electromagnetic radiations, emitted by a cellular phone, modify cutaneous blood flow. **Dermatology**, v. 207, n. 1, p. 10–14. 2003.

OKOKON, E. O. *et al.* Indoor transformer stations and ELF magnetic field exposure: use of transformer structural characteristics to improve exposure assessment. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 24, n. 1, 100–104, 2014.

OKUNO, E. Epidemiologia do câncer devido a radiações e a elaboração de recomendações. **Revista Brasileira de Física Médica**, v.3, n.1, p. 43-55. 2009.

ORABY, T. *et al.* Berkson error adjustment and other exposure surrogates in occupational case-control studies, with application to the Canadian INTEROCC study. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 28, p. 251–258, 2018.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). Estabelecendo um diálogo sobre riscos de campos eletromagnéticos. **Radiação e saúde ambiental, Departamento de proteção do ambiente humano**. Genebra: 2002. Tradução de Hortencio A. Borges, providenciada pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL).

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE / Programa das nações unidas para o meio ambiente / Associação Internacional de Proteção contra Radiação. **Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)**. Environmental Health Criteria, n. 137. Genebra: 1993.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Extremely low frequency fields**. Environmental Health Criteria Monograph, n. 238. Genebra: 2007. 519 p.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE / Programa das nações unidas para o meio ambiente / Associação Internacional de Proteção contra Radiação. **Extremely low frequency (ELF) fields**. Environmental Health Criteria, n. 35. Genebra: 1984.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE / Programa das nações unidas para o meio ambiente / Associação Internacional de Proteção contra Radiação. **Magnetic fields**. Environmental Health Criteria, n. 69. Genebra: 1987.

PADILHA, F. C. **Radiação não ionizante estudo de causas e efeitos diretos e indiretos no ser humano**. Monografia (Especialização) - Universidade do Alto Vale

do Rio do Peixe (UNIARP), Curso de Pós-graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho. Caçador, Santa Catarina, 2011.

PAVLÍK, M. *et al.* The mapping of electromagnetic fields in the environment. **Acta Technica Corviniensis - Bulletin of Engineering**, v. 10, n. 2. 2017.

PORSIUS, J. T. *et al.* Symptom reporting after the introduction of a new high-voltage powerline: A prospective field study. **Environmental Research**, v. 138, p. 112–117, 2015.

RÖÖSLI *et al.* Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 19, p. 3364–3369, 2011.

SAGE, C.; CARPENTER, D. O. **BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2007.

SAGE, C.; CARPENTER, D. O. **BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RFR)**. 2012.

SAHL, J. D.; KELSH, M. A.; GREENLAND, S. Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers. **Epidemiology**, v. 4, n. 2, p. 104–114. 1993.

SALUNKE, B. P.; UMATHE, S. N.; CHAVAN, J. G. Involvement of NMDA receptor in low-frequency magnetic field-induced anxiety in mice. **Electromagnetic Biology and Medicine**, v. 33, n.4, p. 312–326, 2013

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. Capítulo 1 - Definições dos enfoques quantitativo e qualitativo, suas semelhanças e diferenças. In.: SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5.ed. Porto Alegre: Penso, 2013, p. 28-48.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. Capítulo 3 - Formulação do problema quantitativo. In.: SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5.ed. Porto Alegre: Penso, 2013. p.60-72.

SANTOS, J. S. *et al.* Campo Térmico Urbano e a sua Relação com o Uso e Cobertura do Solo em Cidade Tropical Úmida. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.5, n. 3, p. 540-557. 2012.

SAVITZ, D. A.; LOOMIS, D. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. **American Journal of Epidemiology**, v. 141, n.2, p. 123–134. 1995.

SAVITZ, D. A.; CHECKOWAY, H.; LOOMIS, D. P. Magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality among electric utility workers. **Epidemiology**, v. 9, n. 4, p. 398–404. 1998.

SCHUZ, J.; ERDMANN, F. Environmental exposure and risk of childhood leukemia: an overview. **Archives of Medical Research**, v. 47, n.8, p. 607-614, 2016.

SCHUZ, J. *et al.* Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia: results from a German population-based case-control study. **International Journal of Cancer**, v. 91, n. 5, p. 728–735, 2001.

SILVA, D. F. *et al.* Exposição a radiações eletromagnéticas não ionizantes da telefonia celular e sintomas psiquiátricos. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 31, n.10, 2110-2126, 2015.

SHEATHER, S. J. **A Modern Approach to Regression with R**. Nova Iorque: Springer, 2009.

SOARES, T. M.; MENDONÇA, M. C. M. Construção de um modelo de regressão hierárquico para os dados do SIMAVE-2000. **Pesquisa Operacional**, v. 23, n.3, p. 421-441. 2003.

SORAHAN, T. *et al.* Occupational exposure to magnetic fields relative to mortality from brain tumours: updated and revised findings from a study of United Kingdom electricity generation and transmission workers, 1973–97. **Occupational and Environmental Medicine**, v.58, n. 10, p. 626–630. 2001.

SOUZA, L. C. L. *et al.* Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 155-167. 2010.

STRUCHEN, B. *et al.* Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. **Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology**, v. 26, n.6, p. 586 -596. 2015.

SZABO, J.; GABOR, J; THUROCZY, G. Survey of residential 50 Hz EMF exposure from transformer stations. **Bioelectromagnetics**, v. 28, n. 1, p. 48-52, 2007.

THERIAULT, G. *et al.* Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970–1989. **American Journal of Epidemiology**, v. 139, n.6, p. 550–572. 1994.

THOMAS, R. P. **Modern regression methods**. 2^a ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

THURÓCZY, G. *et al.* Exposure to 50 Hz magnetic field in apartment buildings with built-in transformer stations in Hungary. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 131, n. 4, p. 469–473. 2008.

TOKALOV, S. V.; GUTZEIT, H. O. Weak electromagnetic fields (50 Hz) elicit a stress response in human cells. **Environmental Research**, v. 94, n.2, p. 145–151. 2004.

TOMITSCH, J.; DECHANT, E.; FRANK, W. Survey of Electromagnetic Field Exposure in Bedrooms of Residences in Lower Austria. **Bioelectromagnetics**, v. 31, n. 3, p. 200-208, 2010.

UNGER, J. Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database. **Environment and Pollution**, v. 36, n. 1/2/3, p.59-80, 2009.

VALENZUELA, P. M. et al. Pediatria ambiental: um tema emergente. **Jornal de Pediatria**, v. 87, n. 2, p. 89-99. 2011.

WANG, Q. *et al.* Residential exposure to 50 Hz magnetic fields and the association with miscarriage risk: a 2-year prospective cohort study. **PLOS ONE**, v. 8, n.12, p.1-6, 2013.

WESSELING, L. A. E. **Monitoramento** de radiações eletromagnéticas não ionizantes no Brasil – Realidade e Possibilidades. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP) - Trabalho de conclusão do curso de Engenharia de Computação. 2014. 61 p.

WEST, J. G.; *et al.* Multifocal breast cancer in young women with prolonged contact between their breasts and their cellular phones. **Case Reports in Medicine**, v. 2013, n. 2013, 2013.

WÜNSCH-FILHO, V. *et al.* Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in São Paulo, Brazil. **Cancer Epidemiology**, v. 35, n. 6, p. 534-539, 2011.

YEGOROV, A. M. *et al.* Non-ionizing electromagnetic radiation and ecology. **Telecommunications and Radio Engineering**, v. 69, n.8, p. 733-750, 2010.

YU, H.; JIANG, S.; LAND, K. C. Multicollinearity in hierarchical linear models. **Social Science Research**, v. 53, p.118–136, 2015.

ZARYABOVA, V.; SHALAMANOVA, T.; ISRAEL, M. Pilot study of extremely low frequency magnetic fields emitted by transformers in dwellings. Social aspects. **Electromagnetic biology and medicine**, v. 32, n. 2, p. 209-217, 2013.

ZIEGELBERGER, G. *et al.* International commission on non-ionizing radiation protection. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, v. 92, n.1, p.1-3. 2006

ANEXOS

Anexo 01 - Modelo hierárquico de regressão de dois níveis

No modelo hierárquico de regressão de dois níveis, sendo eles “ambiente” (1º nível) e “apartamento” (2º nível), o primeiro submodelo diz respeito ao nível “ambiente”, e é descrito pela equação (125).

$$y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j}x_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (125)$$

Onde β_{0j} é o intercepto do submodelo (1A) do nível 1, x_{ij} é uma variável do nível “ambiente”, β_{1j} é o coeficiente de inclinação vinculada à variável x_{ij} e ε_{ij} é a componente de erro aleatório associado ao “ambiente”. Os índices i e j representam cada unidade “ambiente” e “apartamento”, respectivamente.

Os termos β_{0j} e β_{1j} do submodelo do nível 1 são escritos pelas equações (126) e (127), respectivamente, que constituem os submodelos do nível 2.

$$\beta_{0j} = \gamma_{00} + \gamma_{01}w_j + u_{0j} \quad (126)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} + \gamma_{11}w_j + u_{1j} \quad (127)$$

Em que γ_{00} é o intercepto do submodelo (126) do nível 2, w_j é uma variável do nível 2, u_{0j} é a componente de erro aleatório do “apartamento” associado ao intercepto do nível 2, u_{1j} é a componente do erro aleatório do nível “apartamento” vinculado ao coeficiente de inclinação da variável w_j .

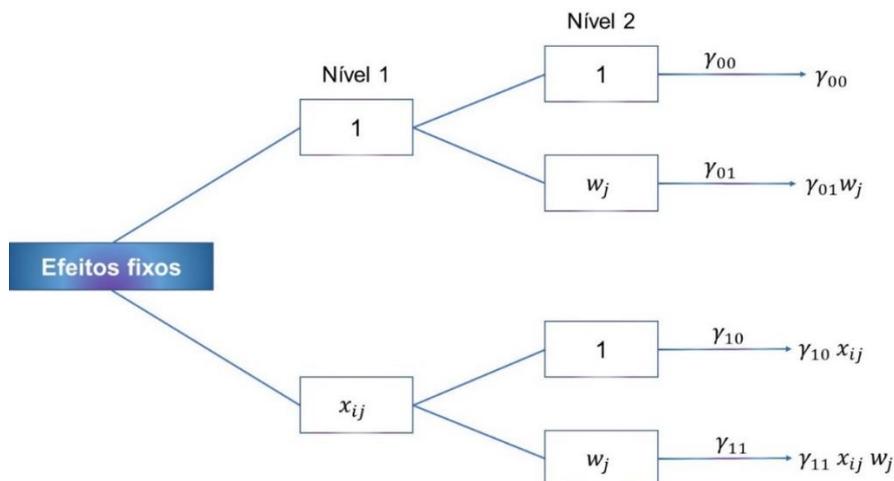
Substituindo as equações (126) e (127) na equação (125), obtém-se a expressão final do modelo de dois níveis, dada pela equação (128)

$$y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{10}x_{ij} + \gamma_{01}w_j + \gamma_{11}w_jx_{ij} + u_{1j}x_{ij} + u_{0j} + \varepsilon_{ij} \quad (128)$$

Observando a equação (128), quanto aos efeitos fixos (Figura 40), verifica-se que o termo γ_{00} é o intercepto geral do modelo; γ_{01} é o parâmetro fixo associado à

variável w_j ; γ_{10} é o parâmetro fixo associado à variável x_{ij} ; o coeficiente γ_{11} constitui o efeito fixo de interação entre as variáveis x_{ijk} e w_{jk}

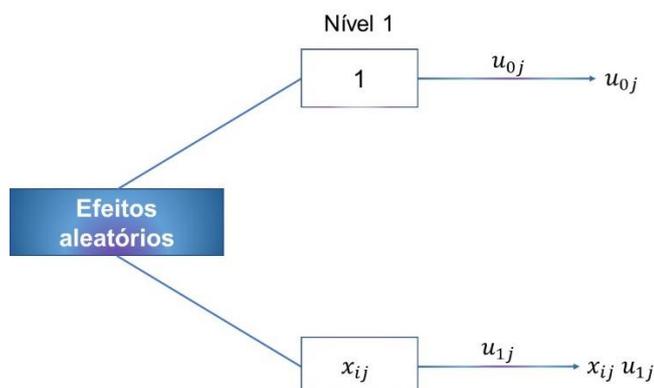
Figura 40 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de dois níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Quanto aos efeitos aleatórios (Figura 41), através da equação (128) identifica-se que o termo u_{1j} representa o efeito aleatório da variável do nível 1 e os coeficientes ε_{ij} e u_{0j} por sua vez, constituem as componentes do erro aleatório associados aos níveis “ambiente” e “apartamento”, respectivamente, relativos a fatores desses níveis que não estão sendo considerados no modelo multinível.

Figura 41– Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de dois níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Anexo 02 - Modelo hierárquico de regressão de três níveis

No modelo hierárquico de regressão de três níveis, sendo eles “ambiente” (1º nível), “apartamento” (2º nível) e edifício (3º nível), o primeiro submodelo diz respeito ao nível “ambiente”, e é descrito pela equação (129).

$$y_{tij} = \pi_{0ij} + \pi_{1ij}z_{tij} + e_{tij} \quad (129)$$

Onde π_{0ij} é o intercepto do submodelo (1) do nível 1, z_{tij} é uma variável do nível “ambiente”, e_{tij} é a componente de erro aleatório associado a “medição” e π_{1ij} é o parâmetro associado à variável z_{tij} . Os índices t, i, j representam cada unidade “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente.

Cada coeficiente do nível 1 torna-se uma variável dependente do modelo do nível 2. Dessa forma, π_{0ij} e π_{1ij} são descritos pelas equações (130) e (131) do submodelo do nível 2.

$$\pi_{0ij} = \beta_{00j} + \beta_{01j}x_{ij} + \varepsilon_{0ij} \quad (130)$$

$$\pi_{1ij} = \beta_{10j} + \beta_{11j}x_{ij} + \varepsilon_{1ij} \quad (131)$$

Em que β_{00j} é o intercepto do submodelo (130) do nível 2, ε_{0ij} é a componente de erro aleatório do “apartamento” associado ao intercepto do nível 2, x_{ijk} é uma variável do nível 2 e β_{01jk} é o parâmetro associado à variável x_{ijk} .

Os termos β_{00jk} , β_{01jk} , β_{10j} e β_{11j} do submodelo do nível 2 são escritos pelas equações (132) a (135), respectivamente, que constituem os submodelos do nível 3.

$$\beta_{00j} = \gamma_{000} + \gamma_{001}w_j + u_{00j} \quad (132)$$

$$\beta_{01j} = \gamma_{010} + \gamma_{011}w_j + u_{01j} \quad (133)$$

$$\beta_{10j} = \gamma_{100} + \gamma_{101}w_j + u_{10j} \quad (134)$$

$$\beta_{11j} = \gamma_{110} + \gamma_{111}w_j + u_{11j} \quad (135)$$

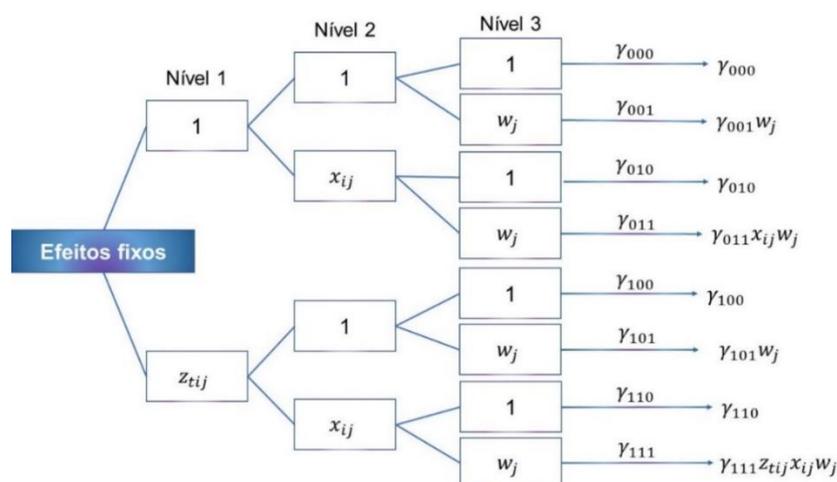
Onde γ_{0000} é o intercepto do submodelo (132) do nível 4, w_j é uma variável do nível 4, ξ_{000k} é a componente de erro aleatório do “edifício” associado ao intercepto do nível 4.

Substituindo as equações (132) a (135) nas equações (130) e (131), e posteriormente (130) e (131) na equação (129), obtém-se a expressão final do modelo de três níveis mostrada pela equação (136).

$$y_{tij} = \gamma_{000} + \gamma_{001}w_j + \gamma_{010}x_{ij} + \gamma_{011}w_jx_{ij} + \gamma_{100}z_{tij} + \gamma_{101}w_jz_{tij} + \gamma_{110}x_{ij}z_{tij} + \gamma_{111}w_jx_{ij}z_{tij} + \varepsilon_{1ij}z_{tij} + u_{01j}x_{ij} + u_{10j}z_{tij} + u_{11j}x_{ij}z_{tij} + u_{00j} + \varepsilon_{0ij} + e_{tij} \quad (136)$$

Esse modelo é constituído pelos efeitos multiníveis fixos e aleatórios de interação entre os níveis 1, 2 e 3. Pela equação (136), com relação aos efeitos fixos (Figura 42), verifica-se que o termo γ_{000} é o intercepto geral do modelo; γ_{001} é o parâmetro fixo associado à variável w_{jk} ; γ_{100} é o parâmetro fixo associado à variável z_k ; γ_{010} é o parâmetro fixo associado à variável x_{ijk} ; o coeficiente γ_{011} constitui o efeito fixo de interação entre as variáveis do segundo e terceiro níveis; o termo γ_{101} expressa o efeito fixo de interação entre as variáveis do primeiro e terceiro níveis; γ_{110} é o efeito fixo de interação entre as variáveis do primeiro e segundo níveis; o termo γ_{111} é o efeito fixo de interação entre as três variáveis, x_{ij} , w_j e z_{tij} .

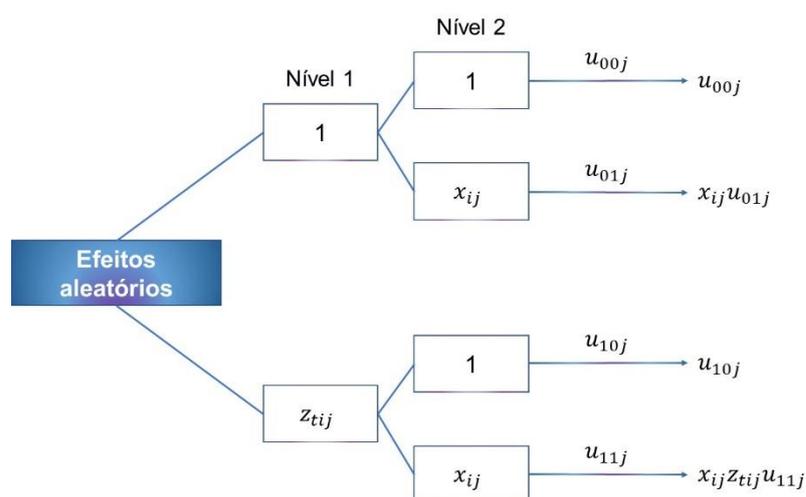
Figura 42 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de três níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Quanto aos efeitos aleatórios (Figura 43), por meio da equação (136) identifica-se que o termo u_{10j} representa o efeito aleatório da variável do nível 1; os coeficientes ε_{1ij} e u_{01j} constituem os efeitos aleatórios da variável do nível 2; o termo u_{11j} consiste no efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 1 e 2. Os coeficientes u_{00j} , ε_{0ij} e e_{tij} por sua vez, constituem as componentes do erro aleatório associados aos níveis “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente, relativos a fatores desses níveis que não estão sendo considerados no modelo multinível.

Figura 43– Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de três níveis.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Anexo 03 - Modelo hierárquico de regressão de quatro níveis contendo uma variável explicativa no primeiro nível

Caso seja definida uma variável associada ao equipamento analisador de espectro magnético, por meio do qual foram efetuadas as “medições” de campo magnético de extrema baixa frequência, o submodelo do primeiro nível que compõe o modelo de quatro níveis hierárquicos, descrito pela equação (137), terá a seguinte configuração:

$$y_{tijk} = \alpha_{0ijk} + \alpha_{1ijk} \cdot s_{tijk} + \pi_{tijk} \quad (137)$$

Onde α_{0ijk} é o intercepto do submodelo (137) do nível 1, π_{tijk} é a componente de erro aleatório associado a “medição” e s_{tijk} é uma variável do nível 1 e α_{1ijk} é o parâmetro associação à variável s_{tijk} .

Os índices t, i, j, k , representam cada unidade “medição”, “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente.

Os termos α_{0ijk} e α_{1ijk} tornam-se variáveis dependentes do submodelo do nível 2, sendo descritos pelas equações (138) e (139), respectivamente.

$$\alpha_{0ijk} = \beta_{00} + \beta_{01ijk} \cdot x_{ijk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (138)$$

$$\alpha_{1ijk} = \beta_{10} + \beta_{11jk} \cdot x_{ijk} + \varepsilon_{1ijk} \quad (139)$$

Em que β_{00jk} é o intercepto do submodelo (138) do nível 2, x_{ijk} é uma variável do nível 2, ε_{0ijk} é a componente de erro aleatório do “ambiente” associado ao intercepto do nível 2, ε_{1ijk} é a componente do erro aleatório do nível “ambiente” vinculado ao coeficiente de inclinação da variável x_{ijk} e β_{01jk} é o parâmetro associação à variável x_{ijk} .

Os coeficientes $\beta_{00jk}, \beta_{01jk}, \beta_{10jk}, \beta_{11jk}$ do submodelo do nível 2 são descritos pelas equações (140) a (143), respectivamente, que correspondem aos submodelos do nível 3.

$$\beta_{00jk} = \theta_{000} + \theta_{001} \cdot w_{jk} + e_{00jk} \quad (140)$$

$$\beta_{01jk} = \theta_{010} + \theta_{011} \cdot w_{jk} + e_{01jk} \quad (141)$$

$$\beta_{10jk} = \theta_{100} + \theta_{101} \cdot w_{jk} + e_{10jk} \quad (142)$$

$$\beta_{11jk} = \theta_{110} + \theta_{111} \cdot w_{jk} + e_{11jk} \quad (143)$$

Em que θ_{000} é o intercepto do submodelo (140) do nível 3, e_{00jk} é a componente de erro aleatório do “apartamento” associado ao intercepto do nível 3 e w_{jk} é uma variável do nível 3.

Por fim, os submodelos do nível 4, “edifício”, são descritos pelas equações (144) a (151).

$$\theta_{000k} = \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \xi_{000k} \quad (144)$$

$$\theta_{001k} = \gamma_{0010} + \gamma_{0011} \cdot z_k + \xi_{001k} \quad (145)$$

$$\theta_{010k} = \gamma_{0100} + \gamma_{0101} \cdot z_k + \xi_{010k} \quad (146)$$

$$\theta_{011k} = \gamma_{0110} + \gamma_{0111} \cdot z_k + \xi_{011k} \quad (147)$$

$$\theta_{100k} = \gamma_{1000} + \gamma_{1001} \cdot z_k + \xi_{100k} \quad (148)$$

$$\theta_{101k} = \gamma_{1010} + \gamma_{1011} \cdot z_k + \xi_{101k} \quad (149)$$

$$\theta_{110k} = \gamma_{1100} + \gamma_{1101} \cdot z_k + \xi_{110k} \quad (150)$$

$$\theta_{111k} = \gamma_{1110} + \gamma_{1111} \cdot z_k + \xi_{111k} \quad (151)$$

Onde γ_{0000} é o intercepto do submodelo (144) do nível 4, z_k é uma variável do nível 4, ξ_{000k} é a componente de erro aleatório do “edifício” associado ao intercepto do nível 4.

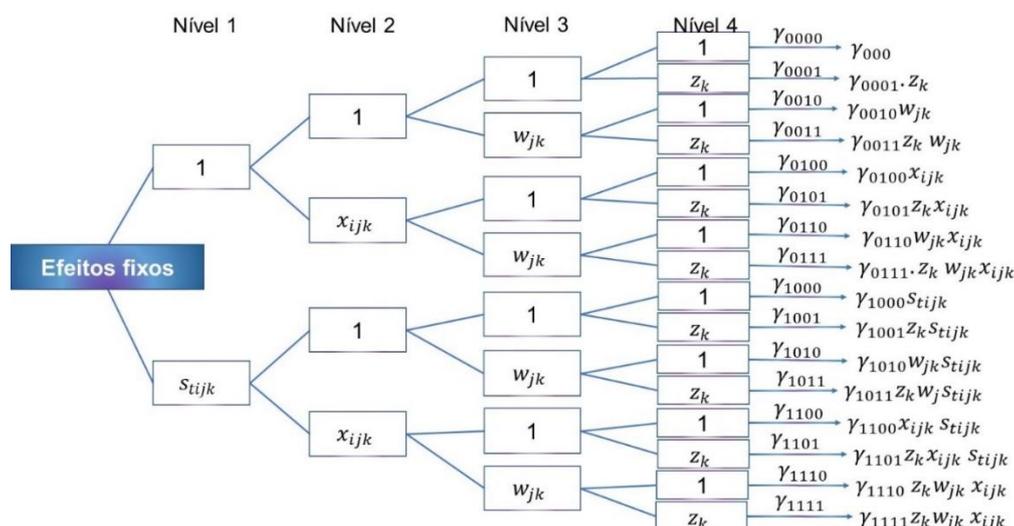
Substituindo as equações (144) a (151) nas expressões (140) a (143), depois (140) a (143) nas equações (138) e (139) e, por fim (138) e (139) na equação (137), obtém-se a expressão final do modelo de quatro níveis com variável no primeiro nível, dada pela equação (152).

$$\begin{aligned} y_{tijk} = & \gamma_{0000} + \gamma_{0001} \cdot z_k + \gamma_{0010} w_{jk} + \gamma_{0100} x_{ijk} + \gamma_{1000} s_{tijk} + \gamma_{0011} \cdot z_k w_{jk} + \\ & \gamma_{0101} \cdot z_k x_{ijk} + \gamma_{0110} w_{jk} x_{ijk} + \gamma_{0111} \cdot z_k w_{jk} x_{ijk} + \gamma_{1001} \cdot z_k s_{tijk} + \gamma_{1010} w_{jk} s_{tijk} + \\ & \gamma_{1011} \cdot z_k w_{jk} s_{tijk} + \gamma_{1110} w_{jk} x_{ijk} s_{tijk} + \gamma_{1100} x_{ijk} s_{tijk} + \gamma_{1101} \cdot z_k x_{ijk} s_{tijk} + \\ & \gamma_{1111} \cdot z_k w_{jk} x_{ijk} s_{tijk} + \xi_{101k} \cdot w_{jk} s_{tijk} + e_{01jk} x_{ijk} + \xi_{001k} w_{jk} + \xi_{010k} x_{ijk} + e_{10jk} s_{tijk} + \end{aligned}$$

$$\xi_{100k}S_{tijk} + \xi_{011k} \cdot w_{jk}x_{ijk} + \xi_{110k}x_{ijk}S_{tijk} + \xi_{111k}w_{jk}x_{ijk}S_{tijk} + e_{11jk}x_{ijk}S_{tijk} + \varepsilon_{1ijk}S_{tijk} + \pi_{tijk} + \xi_{000k} + e_{00jk} + \varepsilon_{0ijk} \quad (152)$$

Observando a equação (152), quanto aos efeitos fixos (Figura 44), verifica-se que o termo γ_{0000} é o intercepto geral do modelo; γ_{0010} é o parâmetro fixo associado à variável w_{jk} ; γ_{0001} é o parâmetro fixo associado à variável z_k ; γ_{0100} é o parâmetro fixo associado à variável x_{ijk} ; γ_{1000} é o parâmetro fixo vinculado à variável S_{tijk} ; o coeficiente γ_{0011} constitui o efeito fixo de interação entre as variáveis do terceiro e quarto níveis; o termo γ_{0101} expressa o efeito fixo de interação entre as variáveis do segundo e quarto níveis; γ_{0110} é o efeito fixo de interação entre as variáveis do segundo e terceiro níveis; γ_{1001} é o efeito fixo de interação entre as variáveis do primeiro e quarto níveis; γ_{1010} corresponde ao efeito fixo de interação entre as variáveis do primeiro e terceiro níveis; o termo γ_{1100} consiste no efeito fixo de interação entre as variáveis do primeiro e segundo níveis; o termo γ_{0111} é o efeito fixo da interação entre as três variáveis, x_{ijk} , w_{jk} e z_k ; o coeficiente γ_{1101} é o efeito fixo da interação entre as variáveis z_k , x_{ijk} e S_{tijk} ; γ_{1011} é o efeito fixo da interação entre as variáveis z_k , w_{jk} e S_{tijk} ; γ_{1110} consiste no efeito fixo da interação entre as variáveis w_{jk} , x_{ijk} e S_{tijk} ; e γ_{1111} consiste no efeito fixo de interação entre quatro variáveis z_k , w_{jk} , x_{ijk} e S_{tijk} .

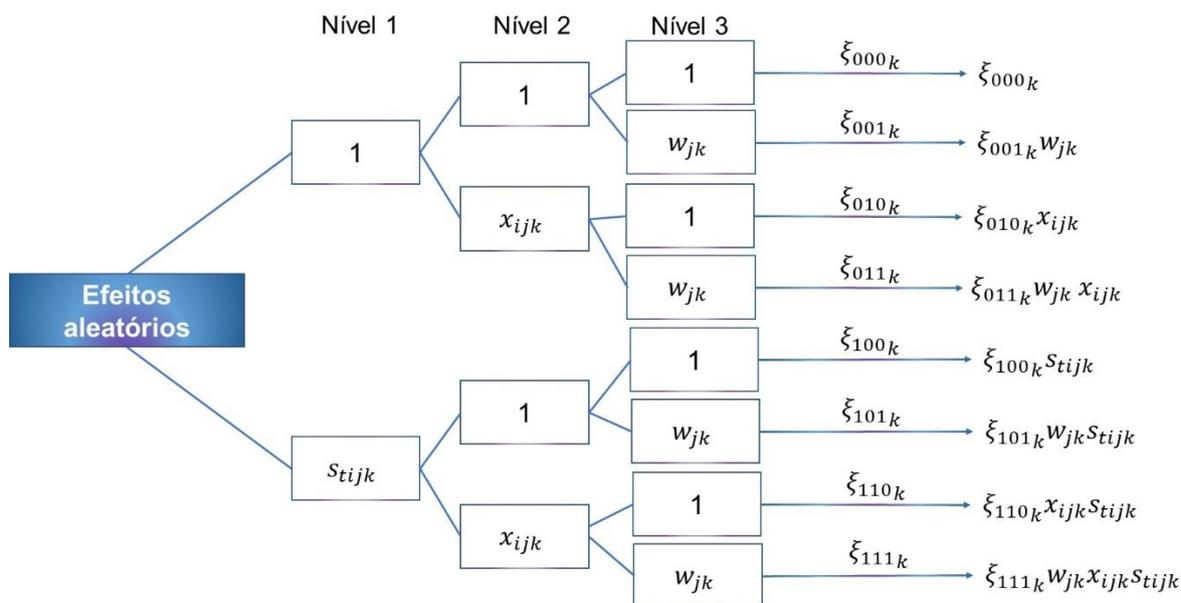
Figura 44 – Efeitos fixos em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis com variável no primeiro nível.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).

Quanto aos efeitos aleatórios (Figura 45), através da equação (152) identifica-se que o termo ξ_{001} representa o efeito aleatório da variável do nível 3; os coeficientes ξ_{010}, e_{01} expressam os efeitos aleatórios da variável do nível 2; ξ_{100} e e_{10} correspondem aos os efeitos aleatórios da variável do nível 1; ξ_{001} expressam os efeitos aleatórios da variável do nível 3; ε_{1ijk} é o efeito aleatório da variável do nível 1; o termo ξ_{011} consiste no efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 2 e 3; o coeficiente ξ_{011} se refere ao efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 2 e 3; ξ_{110} e e_{11} expressa o efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 1 e 2; ξ_{101} consiste no efeito aleatório de interação entre as variáveis dos níveis 1 e 3; e ξ_{111} consiste no efeito aleatório da interação entre as três variáveis w_{jk} , x_{ijk} e s_{tijk} . Os coeficientes $\pi_{tijk}, \varepsilon_{0ijk}, e_{00jk}, \xi_{000k}$, por sua vez, constituem as componentes do erro aleatório associados aos níveis “medição”, “ambiente”, “apartamento” e “edifício”, respectivamente, relativos a fatores desses níveis que não estão sendo considerados no modelo multinível.

Figura 45 – Efeitos aleatórios em modelos de regressão hierárquica de quatro níveis com variável no primeiro nível.



Fonte: Adaptado de YU, JIANG e LAND (2015).