

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA**

LORENZO CAMPOS COIADO

**ANÁLISE DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
EDIFICAÇÕES URBANAS**

**CAMPINAS
2015**

LORENZO CAMPOS COIADO

**ANÁLISE DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM
EDIFICAÇÕES URBANAS**

Dissertação apresentada como exigência para a obtenção do Título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Assis
Mota

PUC-CAMPINAS

2015

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação – SBI – PUC-CAMPINAS

**Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Centro de Ciências Exatas Ambientais e de Tecnologias
Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana**

Autor: COIADO, Lorenzo Campos

Título: ANÁLISE DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM EDIFICAÇÕES URBANAS

Dissertação de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana
Área de concentração: Planejamento Integrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana

Dissertação defendida e aprovada em ____ de _____ de ____ pela
Comissão Examinadora constituída dos presentes professores:

Prof. Dr. Alexandre de Assis Mota.
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota.
Membro Interno Examinador.
Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho.
Membro Externo Examinador.
Universidade Estadual de Campinas.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais

AGRADECIMENTOS

À Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pela estrutura de Pós Graduação e ao excelente corpo docente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da pesquisa.

Ao professor doutor Alexandre de Assis Mota, pela orientação a dissertação e pela confiança depositada em todas as etapas do desenvolvimento.

À professora doutora Lia Toledo Moreira Mota, pelo apoio em todos os trabalhos científicos.

*“Sou o senhor de meu destino,
Sou o capitão de minha alma ”.– Nelson Mandela*

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise das emissões de campos eletromagnéticos em edificações urbanas tendo como motivação a busca pela sustentabilidade de edificações. O estudo de certificações que avaliam o desempenho ambiental realçou a necessidade de estudar os campos eletromagnéticos dispersos no ar, sendo este um dos fatores de conforto humano. O estudo dos campos eletromagnéticos permite o desenvolvimento de metodologias de análise do “Campo Energia” (com frequência em torno de 60 Hz) e “Campo Telecomunicações” (com frequências na faixa entre 915 MHz e 2.4GHz). A análise das emissões torna possível identificar onde estão localizadas as fontes causadoras das emissões eletromagnéticas e possibilita sua mitigação. Como solução de sustentabilidade foi desenvolvido um sensor não destrutivo para monitoramento da eficiência energética de edificações, possibilitando uma solução simples e barata para o levantamento do consumo de energia de uma edificação sem destruir construções já existentes.

Palavras - chave: Emissões Eletromagnéticas, Edificações Urbanas, Certificações, Campo Energia, Campo Telecomunicações.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the electromagnetic field in urban buildings having as motivation the search for buildings sustainability. The study of certifications that evaluate buildings environmental performance raises the need to study the electromagnetic fields, which is considered one factor of human comfort. The study of electromagnetic fields allows the development of analytical methodologies of the "Field Energy" (around 60 Hz) and "Field Communication" (with frequencies in the range between 915 MHz and 2.4 GHz). The analysis of the emissions makes possible to identify the sources causing electromagnetic emissions and their mitigation. As sustainability solution, it was developed a non-destructive sensor for monitoring the energy efficiency of buildings, enabling a simple and inexpensive solution to assess the energy consumption of a building without destroying existing installations.

Key - words: Electromagnetic Emissions, Urban Buildings, Certifications, Energy Field, Telecommunications Field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bancada de testes.	30
Figura 2: Medição sem obstáculos (primeiro experimento).	31
Figura 3: Uma pessoa como obstáculo (segundo experimento).	32
Figura 4: Um muro como obstáculo (terceiro experimento).	32
Figura 5: Sensor proposto instalado dentro do quadro de um edifício.	40
Figura 6: Solenoides concêntricos	42
Figura 7: O fluxo magnético que não está concatenado pela bobina secundária do transformador.	43
Figura 8: Circuito eletrônico do estágio de amplificação/filtragem ligado ao atual sensor (transformador de ar).	47
Figura 9: Protótipo do sensor proposto	48
Figura 10: Esquema elétrico do banco de ensaio utilizado nos ensaios de caracterização do sensor de corrente	48
Figura 11: Bancada de ensaio para a caracterização do sensor.	50
Figura 12: If versus Ii para o condutor de 2.5 mm ² com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).	51
Figura 13: If versus Ii para o condutor de 4mm ² com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).	52
Figura 14: If versus Ii para o condutor de 6mm ² com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).	52
Figura 15: If versus Ii para 5 espiras com condutores de 2.5mm ² (preto), 4 mm ² (rosa) e 6 mm ² (azul)	54
Figura 16: If versus Ii para 10 espiras com condutores de 2.5mm ² (preto), 4 mm ² (rosa) e 6 mm ² (azul)	54
Figura 17: If versus Ii para 15 espiras com condutores de 2.5mm ² (preto), 4 mm ² (rosa) e 6 mm ² (azul)	55
Figura 18: Relação entre o If e a tensão de saída do sensor depois do estágio de amplificação e filtragem	57
Figura 19: Localização do primeiro ponto de monitoramento.	62
Figura 20: Imagem de satélite do ponto 1.	62
Figura 21: Distância do ponto 1 em relação ao ambiente construído.	63
Figura 22: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 1	63
Figura 23: Localização do segundo ponto de monitoramento.	63
Figura 24: Imagem de Satélite do ponto 2.	63
Figura 25: Distância do ponto 2 em relação ao ambiente construído e a casa de transformadores	64
Figura 26: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 2	64
Figura 27: Localização do terceiro Ponto de monitoramento	65
Figura 28: Imagem de Satélite do Ponto 2	65
Figura 29: Distância do Ponto 3 em relação ao ambiente construído.	65
Figura 30: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 3	65
Figura 31: Antena de medição do campo eletromagnético.	66
Figura 32: Osciloscópio modelo DSO1072B - Agilent	67
Figura 33: Perspectiva dos equipamentos de calibração.	67
Figura 34: Antena desligada	69
Figura 35: Antena ligada.	69
Figura 36: Sinal do osciloscópio a 20 metros da cabine de transformador.	70

Figura 37: Sinal do osciloscópio a 10 metros da cabine de transformador.....	70
Figura 38: Sinal do osciloscópio no ponto 2 de monitoramento.....	70
Figura 39: Sinal do osciloscópio no ponto 3 de monitoramento.....	71
Figura 40: Sinal interferindo no ponto 3 de monitoramento.....	71
Figura 41: Mapa 1 – Localização do Empreendimento. Fonte: <i>Google Earth Mapping Service</i>	72
Figura 42: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba. Fonte: <i>Google Earth Mapping Service</i>	73
Figura 43: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba. Destaque para a Subestação de Energia. Fonte: <i>Google Earth Mapping Service</i>	73
Figura 44: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba. Destaque para o Hospital da UNIMED. Fonte: <i>Google Earth Mapping Service</i>	74
Figura 45: Bancada de calibração da antena receptora de energia.....	75
Figura 46: Circuito receptor ligado. Corrente circulante de zero Ampere.	75
Figura 47: Reação da antena para corrente circulante de um Ampere.	75
Figura 48: Reação da antena para corrente circulante de cinco Amperes.	76
Figura 49: Reação da antena para corrente circulante de dez Amperes.	76
Figura 50: Reação da antena para corrente circulante de quinze Amperes.....	76
Figura 51: Reação da antena para corrente circulante de vinte Amperes.....	76
Figura 52: Identificação dos Pontos de medição do campo energia.....	77
Figura 53: Ponto 9 de medição. Sinal observado no osciloscópio.	77
Figura 54: Ponto 9 de medição. Medição do campo energia.	77
Figura 55: campo energia dominante.....	78
Figura 56: Campo energia relevante secundário.....	79
Figura 57: Identificação das áreas de medição do campo telecomunicações.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias analisadas pela AQUA.....	20
Tabela 2: Categorias analisadas pelo LEED.....	21
Tabela 3: Comparação entre a certificação LEED e a certificação AQUA.....	22
Tabela 4: Comparação da gestão de vários assuntos comparando os méritos da AQUA e LEED v2.2.....	24
Tabela 5: Comparação da escolha de produtos em diversos assuntos comparando os métodos AQUA e LEED v2.2.....	24
Tabela 6: Informação a respeito das melhores práticas para evitar campos eletromagnéticos na certificação AQUA.....	25
Tabela 7: Energia irradiada para os três experimentos.....	33
Tabela 8: Características dos solenoides concêntricos para condutores de 2.5mm ² , 4 mm ² e 6 mm ²	50
Tabela 9: Eficiência de transformador com núcleo de ar	55
Tabela 10: Modelos matemáticos para I_i versus I_f	56
Tabela 11: Medição do campo telecomunicações	80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. METODOLOGIAS DE CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL PARA EDIFICAÇÕES BRASILEIRAS	17
2.1. Metodologias de certificação para edificações sustentáveis.....	19
2.2. Comparações entre AQUA e LEED V2.2	22
2.2.1. Arredores	22
2.2.2. Interior	22
2.2.3. Qualidade do meio ambiente.....	23
2.2.4. Materiais de construção e manutenção.....	23
2.2.5. Processo de certificação	25
2.2.6. Campos eletromagnéticos	25
2.3. Discussão	26
3. ESTIMAÇÃO DA ENERGIA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM EDIFICAÇÕES PELA RADIODIFUSÃO PROVENIENTE DE REDES SEM FIO IEEE 802.11	27
3.1. Campos eletromagnéticos	28
3.1.1. Equações de Maxwell.....	28
3.1.2. Energia e potência	29
3.2. Metodologia para Estimação da Energia.....	29
3.2.1. Hardware	29
3.2.2. Software.....	30
3.2.3. Script de acesso	30
3.2.4. Access point	30
3.3. Coleta de dados.....	31
3.3.1. Primeiro experimento.....	31
3.3.2. Segundo experimento.....	31
3.3.3. Terceiro experimento	32
3.4. Resultados da estimação da energia.....	32
3.5. Discussão	33
4. SENSOR NÃO DESTRUTIVO PARA O MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES COM CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL.....	34
4.1. Sessão experimental	38
4.1.1. Avaliação da potência e energia.....	39

4.1.2.	Sensor proposto	40
4.1.3.	Transformador de núcleo de ar	40
4.1.4.	Estágio de amplificação e filtragem	47
4.1.5.	Microcontrolador	47
4.2.	Descrição dos testes de laboratório	48
4.3.	Resultados da Aplicação do Sensor	49
4.3.1.	Influência do número de espiras	51
4.3.2.	Influência da área transversal dos condutores	53
4.3.3.	Eficiência do Transformador com núcleo de ar	55
4.3.4.	Modelos matemáticos	56
4.3.5.	Resultados do estágio de amplificação e filtragem	56
4.3.6.	Discussão	57
5.	MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM AMBIENTES CONSTRUÍDOS	60
5.1.	Etapas da medição	61
5.2.1.	Etapa de monitoramento de edificações	61
5.2.2.	Etapa de calibração da antena	67
5.2.3.	Etapa de análise da sensibilidade da antena	68
5.2.	Testes e Resultados	69
5.3.1.	Teste no ponto 1 de monitoramento	69
5.3.2.	Teste no Ponto 2 de monitoramento	70
5.3.3.	Teste no Ponto 3 de monitoramento	70
5.3.	Discussão	71
6.	PESQUISA DE CAMPO DE FONTES EMISSORAS DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM EDIFICAÇÕES	72
6.1.	Local das medições	72
6.2.	Identificação de fontes de emissão externas ao empreendimento	72
6.1.1.	Energia	72
6.1.2.	Telecomunicações	74
6.3.	Calibração e análise das medições de campo energia	74
6.3.1.	Calibração da antena	74
6.3.2.	Curvas de reação da antena durante calibração	75
6.3.3.	Pontos de medição do campo produzido pelo sistema de energia elétrica .	76
6.3.4.	Curvas de medição do campo produzido pelo sistema de energia elétrica.	77
6.3.5.	Discussão sobre o campo produzido pelo sistema de energia elétrica	78

6.3.6.	Áreas de medição do campo telecomunicações.....	79
6.3.7.	Medição do campo telecomunicações.....	80
6.3.8.	Discussão campo Telecomunicações.....	81
7.	CONCLUSÕES.....	82
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
9.	PUBLICAÇÕES.....	89

1. INTRODUÇÃO

A busca da sustentabilidade está ganhando força no cenário mundial, uma vez que os recursos naturais estão cada vez mais escassos [1]. Neste sentido, existem certificações que buscam a sustentabilidade das edificações urbanas no que tange a sustentabilidade energética e o conforto humano sendo que as emissões eletromagnéticas representam um dos fatores de conforto humano. O estudo da radiação dos campos eletromagnéticos tem como objetivo o desenvolvimento de metodologias para análise e mitigação das emissões eletromagnéticas e de soluções (sensores) para o monitoramento da eficiência energética das edificações urbanas.

Os termos “sustentabilidade” e “ecologicamente correto” têm sido usados na indústria da construção civil com certo apelo comercial. As certificações ambientais utilizadas para avaliar em que nível de sustentabilidade uma edificação se encontra no Brasil ainda são pouco difundidas e aplicadas no país. Em contrapartida, diversos países (considerados como desenvolvidos) têm seu próprio método de certificação em se tratando de construções sustentáveis [2,3]. Alguns desses métodos poderiam ser adaptados para países em desenvolvimento.

Nesse sentido, o Capítulo 2 deste trabalho estuda os processos de certificação ambiental nas construções no Brasil, comparando seus parâmetros com o Projeto de Liderança em Energia e Design Ambiental (LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*), desenvolvido nos Estados Unidos [2] e a certificação Alta Qualidade Ambiental (AQUA) adaptada do HQE (*High Environmental Quality*), desenvolvido na França [2], sendo que ambas as metodologias foram importadas e adaptadas para a realidade da construção brasileira. Além disso, esse capítulo destaca como essas certificações lidam com a questão da emissão de campos eletromagnéticos das edificações.

O Capítulo 3 apresenta um método de medição dos campos eletromagnéticos para a faixa de telecomunicações, focados em um sistema de comunicação sem fio no padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi – *Wireless Fidelity*) [3]. Este

estudo levanta a preocupação acerca das radiações eletromagnéticas e os malefícios que podem vir a prejudicar a saúde dos seres humanos.

O Capítulo 4 apresenta um método não destrutivo, com o desenvolvimento de um sensor para o monitoramento da corrente elétrica utilizando-se de princípios de eletromagnetismo e consequente validação de iniciativas propostas para aumentar a eficiência energética em construções com certificação ambiental [4].

O Capítulo 5 apresenta o desenvolvimento de um método para o monitoramento de campos eletromagnéticos, na faixa de 60 Hertz, em edificações.

O Capítulo 6 apresenta um estudo de emissões dos campos eletromagnéticos, tanto do campo de telecomunicações (2,4 GHz), quanto do campo energia (60 Hz).

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as principais conclusões deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. METODOLOGIAS DE CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL PARA EDIFICAÇÕES BRASILEIRAS

Construções, atividades e serviço de transporte dentro da cidade podem contribuir para mudanças climáticas, pois requerem fontes de energia e um grande volume de matéria prima. Numa edificação os princípios de sustentabilidade podem ser incorporados mesmo em se tratando de um projeto ou mesmo se a mesma estiver em processo de construção. O consumo desenfreado de recursos naturais e sua conseqüente escassez tem sido a causa pela qual a sustentabilidade de edificações tem ganhado valor no mercado de construção. Pode-se observar como resultado o efeito estufa e a produção de resíduos os quais tem diminuído a qualidade de vida das pessoas [5].

As empresas de construção têm feito muitas mudanças em seu comportamento no intuito de acrescentar valor ambiental desenvolvendo novas práticas, como o aproveitamento de resíduos de construção e otimização dos recursos energéticos. [6].

Com a crise do petróleo nos anos 70, muitos países foram forçados a achar alternativas para suprir a demanda de energia. O plano sustentável dentro da construção civil começou com o objetivo de reduzir produção de resíduos, consumo de recursos não renováveis e consumo de energia. O conceito da análise do ciclo de vida requereu o desenvolvimento de metodologias para a avaliação das construções. Este fato forçou os países a terem uma atitude ecológica nas construções no começo dos anos 1990 principalmente na Europa e na América do Norte [7].

A avaliação das construções sustentáveis auxilia os construtores a atingir o desempenho exigido para que edificações tenham o mínimo dano ecológico possível, tendo em conta a melhoria sócio econômica e cultural nos níveis local, regional e global [8]. Na média, as edificações LEED usam entre 18-39% menos energia por área útil que as edificações sem esta certificação ambiental. As construções ecológicas podem contribuir substancialmente para a economia de energia, mas um trabalho adicional precisa ser feito para definir regimes de classificação de construções ecológicas para assegurar um sucesso mais

consistente na questão do plano de construção individual [9]. Pesquisas conduzidas por Bodach e Hamhaber [10] mostram um alto potencial para aumentar a eficiência da energia em habitações sociais em países emergentes como o Brasil. A implementação e análise do consumo eficiente de energia bem como as recomendações de procedimentos de controle do consumo podem contribuir dramaticamente para atenuar a demanda do aumento de energia nesses países.

As construções sustentáveis usam recursos naturais (materiais, água e energia) de maneira prudente a fim de proporcionar conforto para os usuários, reduzindo custos ao longo da existência da edificação. Essas construções também tendem a minimizar as mudanças do meio ambiente ao seu redor. O primeiro ponto a se considerar em se tratando desse tipo de construção, é que as considerações devem começar a partir dos primeiros estágios de planejamento e projeto e devem continuar durante os estágios de construção, operação e manutenção. O projeto de edificação é um passo importante para que os construtores discutam soluções integradas a fim de atingir um alto desempenho da construção em sua vida útil, considerando os fatores da gestão de recursos do meio ambiente, social e econômico bem como a especificação de materiais. A introdução dos mecanismos de sustentabilidade numa construção pode representar para o projeto muitas mudanças ambientais dentro da área da construção, permitindo oportunidades de desenvolvimento para o setor [11].

Cada sistema de certificação ambiental das construções tem suas características predominantes e requerimentos específicos de desempenho [12]. Muitos métodos para certificação ambiental começaram nos anos 1990, foram desenvolvidos, tornando sua comparação necessária a fim de que arquitetos e engenheiros pudessem ter uma base melhor para um desenvolvimento de projetos sustentáveis. Lee e Burnett [13] relataram sessenta edificações e compararam a avaliação nos parâmetros de energia através dos métodos de certificação HK-BEAM [13], BREEAM [13] e LEED concluindo que a diferença nos métodos de avaliação do uso de energia, ferramentas de simulação e critérios de desempenho não afetam os resultados de avaliação e edificações que tiveram excelente desempenho de energia nas certificações HK-BEAM, como BREEAM e LEED e estão entre 5% as melhores do mercado.

2.1. Metodologias de certificação para edificações sustentáveis

A metodologia *High Environmental Quality* (HEQ) ou Alta Qualidade Ambiental (AQUA) foram importadas da *Haute Qualité Enviromentale* (HQE) da França para o Brasil. A AQUA tem quatro grandes categorias: “Construção-ecológica”, “Gestão-ecológica”, “Conforto” e “Saúde”. Os métodos da AQUA estão baseados em quantidades (avaliação dos métodos, medidas, cálculos) e elementos qualitativos (descrições das medidas adotadas). A AQUA não tem competência para aplicação da certificação relacionada ao uso e ocupação da construção. No guia de certificação, existem alguns fatores que podem auxiliar a atingir o desempenho ecológico depois da entrega de uma construção. A referência técnica para essa edificação é baseada no EMS (*Enterprise Management System*) ou SGE (Sistema de Gestão Empresarial) o qual permite ao acesso da empresa no sistema de gestão do meio ambiente e, assim, definir QAE (*Environmental Quality of Development*) que mede o desempenho técnico e o projeto arquitetônico [14].

A AQUA avalia a edificação através de quatro categorias com subdivisões como mostradas na tabela 1. A categoria 1 (“Relação da construção com seus arredores”). Pode receber uma avaliação positiva quando a edificação tem um acesso fácil para ônibus, bicicletas e carros. As categorias 4 e 5 são atingidas quando há equipamento elétrico específico e banheiro econômico com objetivo de reduzir energia e consuma de água respectivamente. A sexta categoria (“Gestão de resíduos”) é atingida quando o canteiro de obras é organizado de maneira simples, evitando perdas de materiais de embalagem o qual é fundamental para coleta seletiva de lixo e o seu descarte apropriado e a possibilidade da recuperação do reuso do resíduo no próprio local de trabalho. As famílias “Saúde”, “Qualidade sanitária do ar” e “Qualidade sanitária do meio ambiente” indica os parâmetros necessários para as diversas edificações se adequarem as diferentes categorias da certificação AQUA ou para elevar seu nível de relevância. Hoje em dia existem categorias para adequar três tipos de edificações: “Construções de escolas e escritórios”, “Hotéis” e “Construções residenciais”.

Tabela 1: Categorias analisadas pela AQUA

Família	Categoria	Descrição
Eco-construção	1	Relação da edificação com seus arredores
	2	Escolhas dos produtos, sistemas e processos de construção
	3	Canteiro de obras com baixo impacto ambiental
Eco-Gestão	4	Gestão de energia
	5	Gestão hídrica
	6	Gestão do uso de resíduos e operação da edificação
	7	Manutenção permanente do desempenho ambiental
Conforto	8	Bem estar térmico
	9	Bem estar acústico
	10	Bem estar visual
	11	Bem Estar olfativo
Saúde	12	Qualidade sanitária do meio ambiente
	13	Qualidade sanitária do ar
	14	Qualidade hídrica sanitária

O programa LEED impõe seis categorias para edificações com créditos e subcréditos com número pré-estabelecido como mostradas na tabela 2. Existem categorias com pré-requisitos que devem ser cumpridos. Existe uma certificação simples quando a edificação recebe entre 26 pontos e 32 pontos; entre 33 e 38 pontos obtêm a certificação prata; entre 39 e 51 pontos recebe certificação ouro e entre 52 e 69 obtêm a certificação de platina.

A primeira categoria é “Canteiros sustentáveis”. Ela tem um pré-requisito de mais de 14 subcategorias tais como “Seleção de canteiro”, “Conectividade da comunidade e Densidade do desenvolvimento”, “Transporte alternativo”, “Planejamento urbano”, “Efeito das ilhas de calor”, “Redução da poluição luminosa” e “Canalização de águas pluviais”. Esta primeira categoria fornece 14 pontos no total para a edificação e o pré-requisito “Prevenção da poluição na atividade da construção” deve ser cumprido. A segunda categoria é “Eficiência hídrica”. Esta tem 3 créditos principais incluindo “Paisagismo com eficiência em água”, “Tecnologias inovadoras de águas residuais” e “Redução do uso de água”. Estas categorias não têm pré-requisitos e fornecem 5 pontos no total para a edificação.

A terceira categoria é “Energia e Atmosfera”, a qual tem três pré-requisitos: “Comissionamento do sistema de energia da edificação”, “Desempenho mínimo de energia” e “Gestão fundamental de refrigeração” e os créditos são “Otimização do desempenho de energia”, “Energia renovável in loco”, “Melhoria do

comissionamento”, “Melhoria da gestão de refrigeração”, “Medidas e verificação”, “Energia ecológica”. Esta categoria fornece 17 possíveis pontos para a edificação. A quarta categoria é “ Materiais e Recursos” o qual tem um pré-requisito (“Estocagem e coleta de recicláveis”) e outros sete créditos tais como “Reutilização do edifício”, “Conteúdo reciclável” “Materiais regionais”, “ Materiais Renováveis facilmente” e “Madeira certificada”. Esta categoria acrescenta 13 possíveis pontos a edificação. A quinta categoria é “Qualidade do ambiente interior” o qual tem 2 pré-requisitos (“Desempenho Mínimo do Índice da Qualidade do Ar (IAQ)” e “Controle ambiental da fumaça do tabaco”). Os créditos são “Monitoramento da distribuição do ar externo”, “ Aumento de ventilação”, “Gestão do planejamento de construção do IAQ” ”Materiais de baixa emissão”, “Controle interno de fontes químicas e poluentes”, “Controle dos sistemas”, “conforto térmico” e “Luz natural e vistas “ adicionando 15 possíveis pontos a edificação. Não há pré-requisitos para a sexta categoria e isso abre oportunidades ao construtor para que ele possa implementar incrementos de sustentabilidade a construção. Existem quatro subcategorias a respeito de “Inovação em projeto” e Profissional LEED acreditado” para divulgar a Certificação LEED[15].

Tabela 2: Categorias analisadas pelo LEED

Família	Categoria	Pré-requisitos
Canteiros sustentáveis	1	Seleção de canteiro Conectividade da comunidade Densidade do desenvolvimento Conectividade da comunidade Transporte alternativo Planejamento urbano Efeito das ilhas de calor Redução da poluição luminosa Canalização de águas pluviais Prevenção da poluição
Eficiência Hídrica	2	Paisagismo com eficiência em água Tecnologias inovadoras de águas residuais Redução do uso de água
Energia e Atmosfera	3	Comissionamento do sistema de energia da edificação Desempenho mínimo de energia Gestão fundamental de refrigeração
Materiais e Recursos	4	Estocagem e coleta de recicláveis
Qualidade do ambiente interior	5	Desempenho mínimo do IAQ Controle ambiental da fumaça do tabaco
Inovação e Processos	6	

2.2. Comparações entre AQUA e LEED V2.2

De forma generalista tanto a certificação LEED quanto a certificação AQUA se preocupam com fatores de sustentabilidade focados na ideal utilização da água, controle de emissões, gestão de resíduos e conforto humano. As principais diferenças entre as certificações é que o LEED foca sua liderança na sustentabilidade energética de edificações enquanto a AQUA é pioneira nas tratativas de conforto humano voltado para as emissões eletromagnéticas, como mostrada na tabela 3.

Tabela 3: Comparação entre a certificação LEED e a certificação AQUA

Comparação	LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)	AQUA (Alta Qualidade Ambiental)
Pontos em comum	A ideal utilização da água, controle da emissão de gás carbônico, gestão de resíduos e conforto para os usuários.	
Principais diferenças	Desenvolvida nos Estados Unidos	Baseada na certificação Francesa HQE (Haute Qualité Environnementale)
	Foca sua liderança na sustentabilidade energética de edificações	Pioneira nas tratativas de conforto humano voltado para emissões de campos eletromagnéticos

2.2.1. Arredores

A certificação AQUA exige a criação de escoamento de água a fim de controlar as enchentes, gerenciar a inconveniência dos canteiros de obra tais como resíduos e barulho e garantir o acesso da vizinhança a região. A construção deve afetar o mínimo possível o ambiente já existente antes da mesma. Por outro lado, a certificação LEED requer a redução da impermeabilização de solos, da poluição luminosa e os efeitos das ilhas de calor.

2.2.2. Interior

A metodologia da AQUA propõe um sistema de ventilação interno que não interfira na economia e conforto. Também se propõe a assegurar a qualidade da coleta da água da chuva e isolar os depósitos de resíduos e equipamentos que possam ter contato com os mesmos. A metodologia LEED propõe o controle de emissão de gases e fumaça de cigarro. A sugestão é proibir o fumo dentro de recintos fechados exceto em áreas designadas exclusivamente para esse fim, no

mínimo quatro quilômetros distante da entrada das construções. Essa certificação propõem, ainda, o controle fácil dos sistemas de iluminação e térmico, proporcionar visibilidade externa do prédio, quantificar a economia dos equipamentos e melhorar o desempenho da energia da edificação reduzindo a dependência da mesma da rede de energia elétrica.

2.2.3. Qualidade do meio ambiente

A metodologia AQUA estimula transportes menos poluentes, o uso de energia renovável, a preservação do ecossistema; a construção necessita de uma infraestrutura para coletar, separar e descartar o resíduo final de uma maneira higiênica e segura. A certificação LEED requer fácil acesso a coleta de lixo reciclável não perigoso, a redução da dependência do carro, o uso de combustíveis alternativos; a redução de 50 ou 100% do uso da água potável para irrigação (o reuso da água da chuva seria a solução para a redução da água potável) não construir em áreas de alta importância ecológica e proteger os recursos naturais.

2.2.4. Materiais de construção e manutenção

A certificação LEED encoraja o uso de materiais recicláveis antes e depois da ocupação, o reuso de paredes, pisos e telhados; dar preferência para madeiras regionais e certificadas; escolher produtos livres de CFC ou que não contribuam com o aquecimento global ou que possam apresentar algum risco a saúde como tintas, carpetes, colas e selantes. A metodologia AQUA tem como objetivo selecionar produtos que possam auxiliar o meio ambiente, a durabilidade, conforto, saúde e economia da água e energia; escolher produtos de fácil manutenção e acessibilidade e repará-los constantemente. As tabelas 4 e 5 mostram os parâmetros das metodologias AQUA e LEED v2.2 separados em grupos de produtos indicando o objetivo de cada uma nesse processo de avaliação.

Tabela 4: Comparação da gestão de vários assuntos comparando os méritos da AQUA e LEED v2.2

	AQUA	LEED NC v2.2	Objetivos
Gestão do canteiro de obras	<ul style="list-style-type: none"> >Escolha dos produtos sistemas e processos >Canteiros de obras com baixo impacto ambiental >Conforto acústico 	<ul style="list-style-type: none"> >Planejamento da qualidade de ar 	<ul style="list-style-type: none"> >AQUA: Gerenciar poluição sonora e de resíduo no canteiro de obras >LEED: Trata assuntos que possam apresentar riscos à saúde, reuso de materiais de construção existente
Gestão hídrica.	<ul style="list-style-type: none"> >A edificação e seus arredores >Gestão de resíduo em uso e operação da edificação >Qualidade da saúde do ambiente 	<ul style="list-style-type: none"> >Depósito e coleta de materiais recicláveis >Reuso de materiais >Gestão do resíduo da construção >Conteúdo reciclado 	<ul style="list-style-type: none"> >AQUA: Infraestrutura de coletas, limitação distribuição e descarte seguro dos resíduos e higiene >LEED: Acesso fácil ao coletor de resíduo reciclável, reutilizar paredes forros e telhados para reparar e reformar atividades, manutenção dos elementos não estruturais interior da construção resíduo destinado para reuso, recuperar e reutilizar materiais no canteiro encorajar o uso de recicláveis antes e depois da ocupação

Tabela 5: Comparação da escolha de produtos em diversos assuntos comparando os métodos AQUA e LEED v2.2

	AQUA	LEED NC v2.2	Objetivos
Escolha de produtos	<ul style="list-style-type: none"> >Escolha de produtos sistemas e processos >Gestão da manutenção de energia. >Conforto hidrotérmico. >Conforto acústico. >Conforto visual. >Conforto olfativo. >Qualidade dos ambientes. de saúde. >Saúde da qualidade do ar. >Qualidade sanitária hídrica. 	<ul style="list-style-type: none"> >Redução do efeito ilha >Desuso do efeito CFCs* >Melhoria do uso de gases refrigerados. >Materiais de baixa emissão (tintas, carpetes, colas, madeira compósita e agro fibras). >Controle de poluentes e produtos químicos. >Reuso de Materiais. >Material Reciclável. >Materiais Regionais. >Materiais de fácil Reutilização. >Madeira Certificada. 	<ul style="list-style-type: none"> >AQUA: Produtos que colaboram com o meio ambiente durabilidade conforto e saúde >LEED: Uso de produtos que reduzem a absorção de calor e não colocam CFCs na atmosfera que não colaboram com a aquecimento global. Reutilizar materiais de construção existentes e encorajar o uso de reciclados pré e pós ocupação. Dar preferencias para produtos locais que são de matérias primas renováveis.

2.2.5. Processo de certificação

A certificação AQUA trata da melhoria do processo de certificação à medida que o empreendedor relata o desempenho ambiental desejado e o alcançado pelo SGE e a Fundação Vanzolini conclui a certificação através dos parâmetros qualitativos. Por outro lado, a versão LEED v2.2 tem 69 créditos que equivalem a 69 pontos, não havendo peso com os créditos embora haja mais concentração de pontos em uma categoria que em outra para completar a certificação final. O construtor pode inovar seus tópicos de certificação.

2.2.6. Campos eletromagnéticos

A AQUA foi a pioneira em relação à preocupação com a poluição eletromagnética em edificações no processo de certificação. Na documentação técnica para edificações em processo de construção os aspectos comportamentais relacionados à emissão eletromagnética estão presentes. Essas características não estão diretamente relacionadas ao ambiente construído, mas sim em uma melhor utilização do equipamento e boas práticas em relação a manter os aparelhos plugados na rede de elétrica [13]. Nas áreas de sistemas de comunicações, a preocupação com relação a radiação eletromagnética gerada pelas redes de Wi-Fi e telefones comuns é reportada, principalmente por redes de sem fio, considerando o seu crescimento rápido. No sistema de energia elétrica, a preocupação principal é a iluminação fluorescente. A certificação recomenda, aos usuários das edificações, manter uma distância segura dessas lâmpadas, mas há uma ausência da especificação dessa distância mínima. A tabela 6 sintetiza as melhores práticas para que seja evitada a emissão excessiva nas edificações.

Tabela 6: Informação a respeito das melhores práticas para evitar campos eletromagnéticos na certificação AQUA

AQUA	
Campo Eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> > Evitar o uso de lâmpadas compactas fluorescentes e lâmpadas de mesa (Manter uma distancia segura da lâmpada) >Desligar redes sem fio (Wi-Fi) e aparelhos elétricos quando não estão sendo usados. >Telefones convencionais com tecnologia DECT para o modo ECO se disponível. >Priorizar o uso de aparelhos que gerem menor campo magnético possível.

2.3. Discussão

Tanto a metodologia AQUA quanto a LEED incluem parâmetros sustentáveis na edificação com algumas diferenças. Essas metodologias precisam ser adaptadas nos países em que forem utilizadas, considerando suas condições climáticas específicas, bem como sua legislação. Ambos os processos de certificação avaliam os parâmetros específicos qualitativamente, tais como energia, água, gestão de resíduos, entre outros. A principal diferença entre LEED e AQUA é a ênfase dada a esses parâmetros. Pode-se observar que os parâmetros de sistemas analisados são similares apesar de divididos em diferentes categorias. A certificação LEED requer pontuação diferenciada entre os parâmetros e alguns deles devem ser compulsoriamente alcançados, enquanto a metodologia AQUA permite a escolha de quais parâmetros devem ser alcançados. Todos os critérios para ambas as certificações devem ser adaptados à edificação, tendo cautela para que um parâmetro não interfira negativamente no outro. Atualmente, existem certificações específicas da AQUA e do LEED para cada tipo de construção, de acordo com sua futura ocupação. As edificações certificadas podem ser reconhecidas por seu compromisso social, econômico e ambiental.

3. ESTIMAÇÃO DA ENERGIA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM EDIFICAÇÕES PELA RADIODIFUSÃO PROVENIENTE DE REDES SEM FIO IEEE 802.11

O ritmo de crescimento da população está cada vez mais acelerado e as cidades passaram a acomodar grande parte da população mundial, criando centros urbanos com alta concentração demográfica. Esse aumento da concentração demográfica tornou-se um grande problema para a gestão das cidades e para as políticas locais. Existe, atualmente, uma grande pressão para a otimização de recursos e para tornar as cidades mais eficientes. Iniciativas por parte do setor privado e governo passaram a investir em tecnologia de informação e comunicação (TIC) para tentar minimizar os problemas de infraestrutura urbana. Nos dias atuais, a Internet prevê a conexão de sensores a serem utilizados como um recurso eficiente em Cidades Inteligentes [16].

A disseminação da informação veio acompanhada de uma tecnologia de rede que se expandiu também em grande proporção: o padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi). Esse padrão proporciona grande mobilidade e conectividade a uma vasta quantidade de dispositivos, tais como: tablets, televisores, palmtops, impressoras, câmeras de segurança. A tecnologia Wi-Fi veio otimizar recursos e facilitar a interatividade dos usuários com a rede [17]. Por ser uma tecnologia sem fio permite uma grande redução de custos em projetos, uma vez que elimina a necessidade de pontos cabeados, e permite que infraestruturas prediais obsoletas possam ter uma solução de acesso à Internet sem a necessidade de transpor cabos.

Assim, um agente invisível e que pode causar danos à saúde humana está cada vez mais presente em nossas vidas: o campo eletromagnético em edificações pela radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11. Todas as redes sem fio Wi-Fi lançam radiações eletromagnéticas no ambiente de sua atuação. E com a disseminação desta tecnologia, houve um aumento significativo de pontos de acesso nas edificações. Nesse contexto, este capítulo tem como objetivo desenvolver uma metodologia de medição desses campos irradiados, através do levantamento da potência (em dBm) gerada por uma rede IEEE 802.11, com a

preocupação de observar a energia absorvida pelo corpo humano ao ser exposto a este agente.

3.1. Campos eletromagnéticos

3.1.1. Equações de Maxwell

A base teórica para estudo de campos eletromagnéticos corresponde às equações publicadas, em 1864, pelo físico escocês James Clerk Maxwell, que em seu trabalho intitulado “Dynamical Theory of Eletromagnetic Field” unificou as equações de campo elétrico e campo magnético [18], reproduzidas nas equações (1), (2), (3) e (4).

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (4)$$

Onde “E” é o campo elétrico, “B” é a densidade de fluxo magnético, “q” é a carga elétrica, “ ϵ_0 ” é a permissividade do vácuo, “ μ_0 ” é a permeabilidade do vácuo, “I” é a corrente elétrica, “ $\oint \mathbf{B}$ ” é o fluxo magnético e “ $\oint \mathbf{E}$ ” é o fluxo elétrico.

A Equação (1) é a Lei de Gauss e afirma que, para uma superfície fechada, o campo elétrico é proporcional à carga resultante contida no volume fechado pela superfície.

A Equação (2) afirma que, a densidade de fluxo do campo magnético para uma superfície fechada é zero, não existindo o análogo para a carga elétrica.

A Equação (3) é a Lei de Faraday, e afirma que a integral de linha do campo elétrico ao longo de um trajeto fechado é proporcional à taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético para uma superfície delimitada por este trajeto.

A Equação (4) é uma forma modificada da Lei de Ampère e afirma que a

integral de linha do campo magnético ao longo de um trajeto fechado é proporcional à soma de dois termos. O primeiro contém a corrente resultante que flui através de uma superfície delimitada pelo trajeto fechado. O segundo termo contém a taxa de variação, no tempo, do fluxo do campo elétrico para uma superfície delimitada pelo trajeto.

Assim, as equações de Maxwell fazem uma correlação entre os campos elétricos e magnéticos [18].

3.1.2. Energia e potência

Os campos eletromagnéticos (medidos em V/m) têm a capacidade de transportar energia, sendo que a potência (P) corresponde à energia desenvolvida ou dissipada em um certo intervalo de tempo. Essas grandezas são fundamentais para que as redes sem fio funcionem, uma vez que os receptores necessitam de uma potência mínima para reconhecimento do sinal [19].

A potência contida no campo elétrico é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico [19].

3.2. Metodologia para Estimação da Energia

3.2.1. Hardware

Para os testes realizados neste capítulo, foi utilizado um computador desktop, com sistema operacional Linux Ubuntu e placa de rede configurada como Access Point (AP) numa rede Wi-Fi de 2.4GHz (padrão IEEE 802.11). Para o acesso remoto ao computador, foi utilizado um notebook DELL Inspiration, Intel Core i5. A bancada de testes está ilustrada na Figura 1.



Figura 1: Bancada de testes.

3.2.2. Software

No computador desktop foi utilizado o Linux Ubuntu, por ser um sistema operacional que permite acesso ao hardware da placa de rede e com maiores funções do que um sistema operacional comercial. Foram utilizados scripts de visualização da potência recebida no AP em dBm. Para o acesso remoto ao computador, foi utilizado um notebook com sistema operacional Windows 7 e um software que permite o acesso remoto ao Access Point.

3.2.3. Script de acesso

O script permite a visualização da potência recebida em dBm por um AP, de um laptop conectado na rede Wi-Fi desta base. Com o afastamento ou aproximação do laptop ao AP, é possível verificar a variação da potência do sinal recebido. O script foi definido para coletar dados a cada um segundo.

3.2.4. Access point

Em um link padrão IEEE 802.11, a potência é medida em miliwatts ou dBm. As medidas tomadas com o AP têm como saída a potência em dBm. Para transformá-la em energia, são utilizadas as seguintes equações.

$$M = 10 \log \frac{P}{1mW} \quad (5)$$

$$P = 10^{M/10} \cdot 1mW \quad (6)$$

As equações (5) e (6) têm como objetivo a transformação da potência em dBm, fornecida pelo Access Point, para miliWatt. Sendo que o “M” é a medida da potência recebida no AP, coletada no experimento e “P” é a potência em miliWatt. Sabendo-se que 1 Watt é igual a 1 Joule/segundo, é possível determinar a Energia irradiada por determinado período de tempo.

3.3. Coleta de dados

3.3.1. Primeiro experimento

Em um primeiro momento foi realizada a medição da potência recebida no AP durante 5 minutos, com intervalo de 1 segundo entre as medidas. A figura 2 ilustra o esquema utilizado para o primeiro experimento (sem obstáculos entre laptop e AP). Neste primeiro experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $7,88 \times 10^{-7}$ Joules.

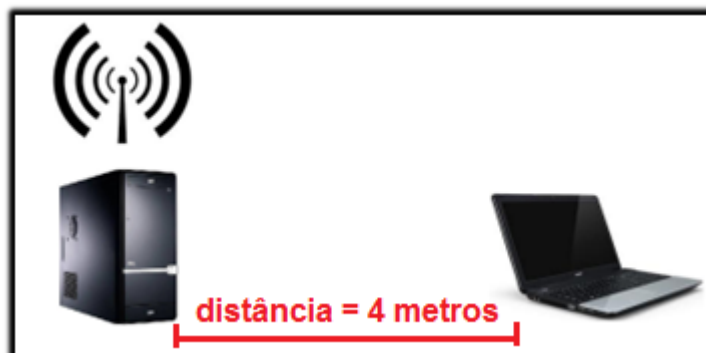


Figura 2: Medição sem obstáculos (primeiro experimento).

3.3.2. Segundo experimento

No segundo experimento foi realizada a medição da potência do AP durante o mesmo período de tempo, com uma pessoa servindo de obstáculo. A figura 3 ilustra o esquema utilizado para o segundo experimento. Neste segundo experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $5,74 \times 10^{-8}$ Joules.



Figura 3: Uma pessoa como obstáculo (segundo experimento).

3.3.3. Terceiro experimento

No terceiro experimento foi realizada a medição da potência do AP durante o mesmo período de tempo, com um muro como obstáculo. A Figura 4 ilustra o esquema utilizado para o terceiro experimento (com um muro como obstáculo entre laptop e AP). Neste terceiro experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $2,98 \times 10^{-9}$ Joules.

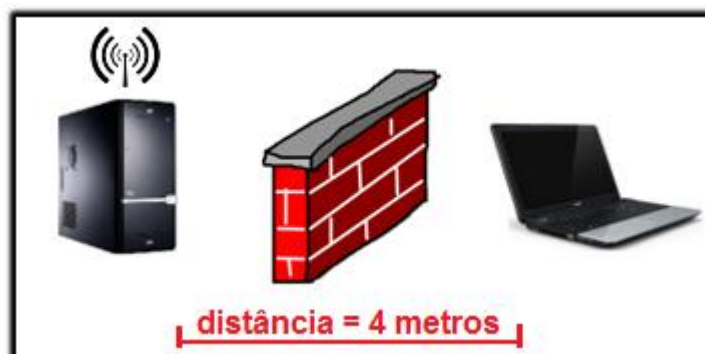


Figura 4: Um muro como obstáculo (terceiro experimento).

3.4. Resultados da estimativa da energia

A colocação de barreiras (corpo humano no segundo experimento e muro no terceiro experimento) entre o AP e o notebook teve como objetivo estimar a quantidade de energia absorvida por esses obstáculos, comparando os resultados do segundo e do terceiro experimentos com o caso base sem nenhum obstáculo (primeiro experimento).

Os resultados dos três experimentos podem ser sintetizados de acordo com a Tabela 7.

Tabela 7: Energia irradiada para os três experimentos

Experimento	Energia Irradiada (J)
Primeiro	$E_1 = 7,88 \times 10^{-7}$
Segundo	$E_2 = 5,74 \times 10^{-8}$
Terceiro	$E_3 = 2,98 \times 10^{-9}$

Mais especificamente, a partir dos resultados coletados, pode-se estimar a quantidade de energia absorvida pelo corpo humano (E_{CH}) ao ser exposto a uma rede Wi-Fi durante 5 minutos, de acordo com a Equação (7).

$$E_{CH} = E_1 - E_2 = (7,88 \times 10^{-7}) - (5,74 \times 10^{-8}) = 7,30 \times 10^{-7} J \quad (7)$$

A título de comparação, pode-se estimar a quantidade de energia absorvida por um muro (E_M) ao ser exposto a uma rede Wi-Fi durante 5 minutos, de acordo com a Equação (8).

$$E_{CH} = E_1 - E_3 = (7,88 \times 10^{-7}) - (2,98 \times 10^{-9}) = 7,85 \times 10^{-7} J \quad (8)$$

Cabe ressaltar que, neste trabalho, não foi considerada a quantidade de energia que pode ser refletida pelos corpos.

3.5. Discussão

Como conclusões pode-se destacar que foi possível estimar a energia associada aos campos eletromagnéticos em edificações pela radiodifusão proveniente de redes Wi-Fi padrão IEEE 802.11. A partir dos resultados obtidos, pôde-se concluir que o corpo humano absorve energia proveniente das redes Wi-Fi IEEE 802.11 e, mais ainda, pôde-se estimar essa energia absorvida. É de se esperar que a quantidade de energia absorvida pelo corpo esteja relacionada com o tempo de exposição do mesmo, com a quantidade de APs no ambiente e com possíveis danos à saúde, aspectos que deverão ser tratados em trabalhos futuros.

4. SENSOR NÃO DESTRUTIVO PARA O MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES COM CERTIFICAÇÃO AMBIENTAL

A preocupação internacional a respeito da escassez de recursos ambientais data de 1970, quando convenções internacionais aconteceram com o objetivo de reduzir o consumo de recursos naturais [20]. Entre essas convenções, uma a ser citada é a Conferência das Nações Unidas do Meio Ambiente Humano que aconteceu em Estocolmo em 1972. Mais tarde, outras conferências ao redor do mundo ocorreram com o mesmo objetivo. Por exemplo, a convenção de Viena em prol da proteção da camada de ozônio, em 1985; o protocolo de Montreal em 1987; a conferência do meio ambiente e desenvolvimento das Nações Unidas ECO 92, em 1992; a conferência das Nações Unidas em 1996, o protocolo de Kyoto em 1997 e no Brasil pode-se destacar o RIO 92 e o Rio +20.

O conceito de “desenvolvimento sustentável” foi introduzido, primeiramente, em 1987 pela UN (Nações Unidas) e enfatizou que todo o desenvolvimento tem a obrigação de atender as demandas sem prejudicar a capacidade das futuras gerações de satisfazer suas próprias necessidades [21, 41, 42]. Esse conceito foi diretamente aplicado à indústria da construção, como definido na Segunda Conferência do Assentamento Humano (Habitat II) das Nações Unidas em Istanbul em 1996. Desde essa conferência, a indústria europeia da construção começou a considerar o conceito de desenvolvimento da sustentabilidade para edificações e algumas regulamentações e padrões surgiram na França (RT 2000), Suíça (Minergie), e Alemanha (Habitat Passivo) [20, 47].

A comissão europeia desenvolveu, em 2006, um plano com objetivo de reduzir o consumo de energia em 20 % até 2020. Esse plano é chamado “Plano de Ação para Energia Eficiente” e é apoiado por diretrizes. Nesse contexto, o EPDB (Diretiva do Desempenho da Eficiência Energética de Edificações) possibilitou o desenvolvimento de alguns padrões referentes ao método do cálculo de energia em edificações. Um exemplo desses padrões é o EN 15232 “Desempenho de Energia de Edificações – Impacto da Automação em Edificações, Controle, e Gestão de Edificações” [56], o qual apresenta metodologias para acessar/calcular a influência da automação em uma edificação

e a gestão do consumo de energia das construções. Além disso, o padrão ISO 50001 “Padrão de Gestão de Energia” permite as organizações (dependências industriais, institucionais, comerciais e governamental) estabelecerem os requerimentos e sistemas necessários para melhorar o desempenho energético [57].

Hoje, muitos países estão estabelecendo padrões e regulamentações com o objetivo de aplicar o conceito de desenvolvimento sustentável em construções. Alguns desses países (por exemplo, França, Alemanha, Suíça, Japão, México, Austrália, Estados Unidos e Canadá) já possuem sua própria certificação ambiental, considerando alguns critérios de sustentabilidade. Entre esses sistemas de certificação pode ser citado o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*, dos Estados Unidos) [22, 43, 46], BREEAM and ECOHOMES (BRE *Environmental Assessment Method for the United Kingdom*; Métodos de Avaliação Ambiental [23, 44, 46], CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*, do Japão (Sistema de Avaliação Extensiva para Edificações Ambientais Eficientes) [24, 45, 46], HQE (*Haute Qualité Environnementale des Bâtiments*, da França) [6] e GREEN STAR (da Austrália) [26, 46].

No Brasil, o conceito de desenvolvimento sustentável é também aplicado na indústria civil, usando o sistema de certificação de edificações. Esses sistemas correspondem ao LEED e ao AQUA (Alta Qualidade Ambiental) que é baseado no HQE da França [49].

Além disso, desde 1970, a indústria da energia mundial tem mudado por causa da crise do petróleo e das pressões ambientais. Portanto, nas últimas décadas, o incentivo para o uso de fontes de energia renováveis e a elaboração de leis com o objetivo de proteger o meio ambiente tem sido grande, além de lançamento de programas que encorajem a redução do consumo da eletricidade. Com relação ao segmento brasileiro da construção houve, em 2001, o desenvolvimento e a aprovação da lei nº. 10.295 [50], determinando a criação de mecanismos para o desenvolvimento de edificações mais eficientes (do ponto de vista da geração e consumo de energia). Após anos envolvendo várias instituições, um padrão de energia eficiente em edificações foi regulamentado.

Esse padrão corresponde a uma etiquetagem voluntária dos níveis de eficiência de energia em prédios comerciais, de serviço e governamentais. Essa regulamentação classifica as construções com base no nível de eficiência energética e está fundamentada em três requisitos principais, de acordo com o programa do governo chamado Procel Edifica. Esses requisitos são: eficiência e capacidade instalada do sistema de iluminação, eficiência do sistema de ar condicionado e desempenho térmico da envoltória [27, 50].

Ambas as certificações LEED e AQUA bem como o processo de etiquetagem do Procel Edifica promovem a implementação de iniciativas objetivando o aumento da eficiência energética nas edificações a serem construídas e já em operação. Por essa razão, o uso de fontes de energia renováveis, tais como, energia eólica e solar (painéis fotovoltaicos e coletores solares) e o uso de automação (para que o consumo de energia elétrica seja reduzido) são estimulados. Mais do que isso, o uso de sistemas de cogeração e técnicas de inovação e de sistemas de iluminação natural, por exemplo, são também estimulados [43, 46, 50].

Nesses sistemas de certificações, o aumento da eficiência da energia proveniente de tais iniciativas deve ser demonstrado (provado) para que a edificação em questão possa receber as pontuações (relacionadas a essas iniciativas) previstas nesses sistemas de certificação. Como exemplo, para o programa Procel Edifica o aquecimento da água tem que apresentar uma conformidade de 70% de fração solar; energia eólica ou fotovoltaica deve fornecer uma economia mínima de 10% no consumo anual de energia e a cogeração ou de sistemas que aumentem a eficiência energética do sistema devem prover uma economia mínima de 30% do consumo anual de eletricidade [27, 50].

Atualmente, esta verificação é feita usando softwares de simulação, métodos de simulação e métodos de previsão para diferentes sistemas de certificação ambiental [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]. Nesse contexto a referência [34] apresenta métodos de cálculo que tem condição de prever economia de energia em prédios residenciais; e a referência [37] apresenta modelos de regressão a fim de prever a demanda de aquecimento mensal em prédios residenciais. Na referência [38], os autores usam diferentes métodos de rejeição de calor para

prever o consumo de energia do sistema de ar condicionado e a referência [39] usa uma rede neural artificial para prever o consumo de energia nas edificações. A referência [40] estima o perfil de energia das edificações com características similares, usando o software Energy Plus e a referência [44] apresenta um caso real relacionado às ferramentas de simulação de consumo energético das edificações e seu impacto na classificação nos sistemas de certificação ambiental BREEAM e LEED. Na referência [48] os autores apresentam estudos de caso, utilizando o software de simulação Energy Plus para estimar as economias em potencial e a demanda de energia em prédios comerciais europeus. Neste sentido outras opções de software de simulação são amplamente usados tais como DOE-2, Energy10, Micropas6, e EnergyPro, entre outros [51,52,53].

Esses métodos têm em comum o fato deles serem baseados em modelos e representações aproximadas das condições da edificação. Conseqüentemente, os resultados apresentados por eles podem levar a conclusões inválidas relacionadas à evidência do aumento da eficiência energética. Portanto, um desafio a ser encarado é provar, a partir de medições, o aumento real da eficiência energética da edificação proveniente dessas iniciativas.

Mais especificamente, o problema a ser trabalhado é como quantificar o aumento da eficiência energética relacionado em cada uma das iniciativas empregadas. No exemplo citado anteriormente, o problema é como medir se os painéis fotovoltaicos instalados representam uma economia mínima de 10% no consumo de energia anual ou como mensurar se o sistema de automação da iluminação (e o uso conseqüente de luz natural) causou uma economia mínima de 30% no consumo anual de eletricidade.

Dentro desse contexto, existem também metodologias que abordam a otimização do consumo de energia em edificações [54], considerando os resultados de medições nas mesmas. Com relação a isso sistemas integrados de automação da edificação podem ser usados, por exemplo, para controlar o ar condicionado (HVAC), a ventilação de aquecimento e sistemas de iluminação [54,55]. Como exemplo, a referência [55] apresenta um sistema integrado para simulação e otimização do consumo de energia em edificações (industrial, residencial, pública e comercial) com o objetivo de melhorar a interatividade do

sistema de automação da edificação. As ferramentas de software integradas descritas oferecem controle e automação de sistemas diferentes (aquecimento, resfriamento, iluminação, ar condicionado e ventilação) visando aumentar a eficiência de energia de acordo com os requisitos das normas EN15232 e ISO 5001 [56, 57] da eficiência de energia.

É importante enfatizar que a ferramenta de simulação proposta em [55], usa informações medidas diretamente na edificação incluindo quantidades elétricas. Contudo os aparelhos comuns adotados para medir esses valores requerem intervenção física na instalação elétrica do edifício. Isto quer dizer que para aplicar essa metodologia em um edifício já em operação é necessário cortar os condutores de corrente fisicamente sob análise resultando a necessidade de reformas nas instalações elétricas.

Nesse contexto a fim de quantificar apropriadamente o aumento da eficiência energética que está diretamente relacionada as iniciativas mencionadas anteriormente é necessário medir o consumo de energia (ou geração de energia se aplicável) relacionado a cada iniciativa empregada de uma maneira fácil, eficiente e de baixo custo de implementação considerar que para edificações que já estão em edificação as medidas que precisam ser adotadas devem causar o menor impacto possível no edifício, evitando reforma significativa e custos financeiros consequentes.

Assim, este trabalho visa apresentar um método não destrutivo para circuitos de corrente de baixa tensão que permitem a avaliação de geração e consumo de energia nos circuitos distribuídos em todo prédio baseado nos dados que são diretamente medidos dos circuitos sob análise. Dessa maneira é possível acessar em detalhes as iniciativas implementadas para aumentar a eficiência de energia em prédios com certificação ambiental sem reformas e com baixo custo.

4.1. Sessão experimental

As seções seguintes apresentam o método não destrutivo, o sensor proposto nesse trabalho e os testes realizados objetivando a caracterização do sensor.

4.1.1. Avaliação da potência e energia

Conforme mencionado anteriormente este documento apresenta um método não destrutivo para avaliar a eficiência energética das edificações com certificação ambiental. Nesse contexto, este método propõe uso de sensor que pode ser instalado no condutor de circuito elétrico que está alimentando a edificação em questão sem a necessidade de reformas que resultam em custos e manutenção.

É fato que conhecendo a corrente que flui sob o circuito (medido usando o sensor proposto aqui); e a tensão do terminal de circuito (o qual é conhecido desde que ele corresponda à tensão nominal do circuito), é possível determinar a geração e o consumo de energia do circuito usando equações (9) e (10) [28]:

$$P = V \cdot I \quad (09)$$

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (10)$$

Onde o P é a potência enviada pelo circuito medida em Watts [W]; V é a tensão do circuito medido em Volts [V] (que é conhecida), e I é a corrente do circuito medida em amperes [A], que é medida com ajuda do sensor proposto e do método não destrutivo; e corresponde à geração e consumo de energia do circuito sob análise do tempo t1 para o tempo t2 em watts x horas [W x h].

Baseado no consumo/geração de energia elétrica do circuito calculado pode-se determinar se a iniciativa para aumento de eficiência de energia atingiu seu objetivo. Usando esses exemplos previamente citados, para o programa Procel Edifica, a partir do cálculo de geração de energia, pode-se verificar se a implementação do sistema de geração fotovoltaica resultou em economia em no mínimo 10% no consumo anual de energia da edificação; ou a partir da determinação do circuito de consumo de energia da iluminação, pode-se verificar se teve um declínio de no mínimo 30% no consumo de eletricidade (e consequentemente o aumento do uso da luz natural).

É importante enfatizar que o objetivo deste trabalho não é o de verificar a eficiência da implementação dessas iniciativas, mas apresentar o método não destrutivo e o sensor a ser usado nesse propósito. O item a seguir mostra o

sensor usado para medir o fluxo de corrente no circuito a ser analisado no contexto do método não destrutivo.

4.1.2. Sensor proposto

O sensor proposto é formado por 3 elementos: um transformador com um núcleo de ar com bobinas concêntricas primárias e secundárias (usando a baixa tensão dos condutores já instalados na edificação sem interromper ou cortá-los), uma fase de amplificação/filtragem de baixo custo eletrônico; e o uso de um microprocessador (Arduino) [33], como pode ser visto na Figura 5.

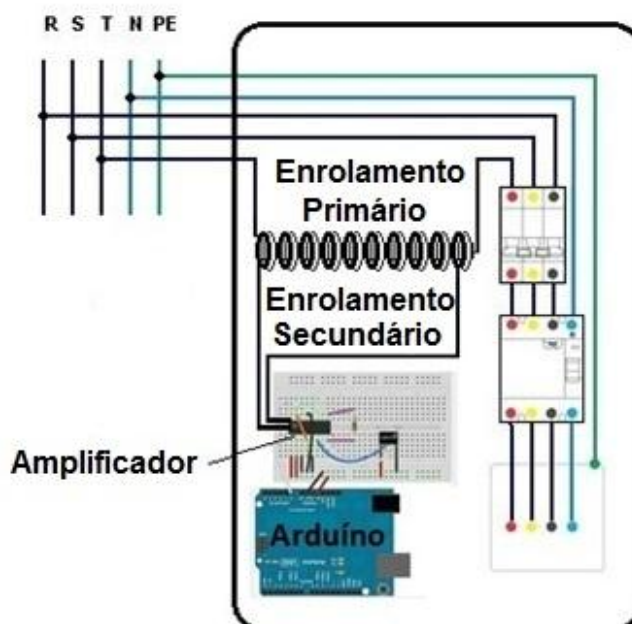


Figura 5: Sensor proposto instalado dentro do quadro de um edifício.

4.1.3. Transformador de núcleo de ar

O sensor de corrente proposto é um transformador [58] com núcleo de ar com bobinas concêntricas primárias e secundárias. Os transformadores de núcleo de ar são normalmente usados em rádio frequência, quando as perdas no núcleo de ferro são muito altas [30,31]. Para frequências mais baixas, materiais para o núcleo são escolhidos, por exemplo, ferro em pó ou ferrite. Apesar deste sensor ter sido desenvolvido para ser usado em aplicações de baixa frequência (distribuição de energia elétrica que opera a 50 Hz ou 60 Hz), seu núcleo é

constituído de ar. Isso pode ser explicado pelo fato que o proposto sensor é usado dentro de um método não destrutivo. A ideia é que o monitoramento do circuito da corrente (e do cálculo subsequente da energia gerada ou consumida) possa ser feita sem a necessidade de reformas no prédio, diretamente na caixa de distribuição ou dentro das tomadas de energia, sem o corte físico do circuito sob análise.

Nesse contexto, a bobina primária do transformador é formada com o mesmo condutor do circuito sob análise. Dessa maneira, o uso de um transformador com núcleo de ar como um sensor de corrente é justificado pelo fato do uso de um núcleo ferromagnético (comumente adaptado em aplicações de baixa frequência) não possibilitaria a instalação do sensor sem a intervenção física do quadro de distribuição ou das tomadas de energias.

Neste trabalho, as bobinas primárias e secundárias tem o mesmo raio ($R_1 = R_2$), o mesmo comprimento ($L_{g1} = L_{g2}$), e o mesmo número de espiras ($N_1 = N_2$), como ilustrado na Figura 2. É importante enfatizar que o número de espiras do primário de é igual ao número de espiras do secundário dos, e neste trabalho, este número varia de acordo com o teste aplicado (5,10 e 15 giros). Um dos condutores do circuito sob consideração corresponde à bobina primária do transformador. O transformador da bobina secundária está ligado com a primária (são concêntricas) dentro do quadro de distribuição da instalação elétrica da edificação já mostrada previamente na Figura 6.

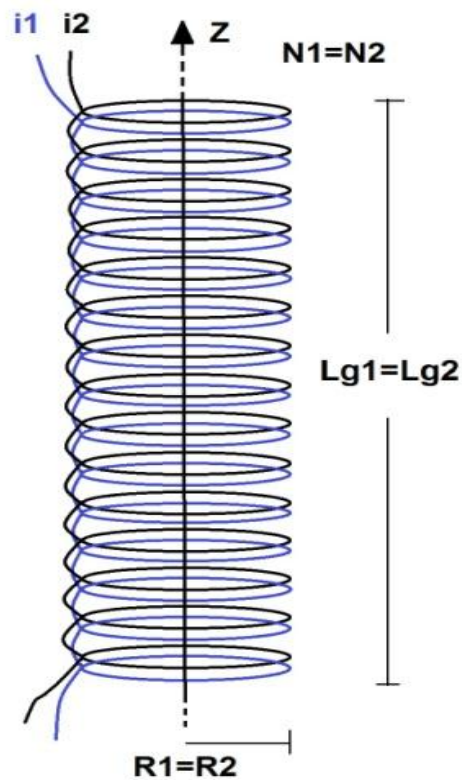


Figura 6: Solenoides concêntricos

A corrente elétrica do circuito flui da bobina primária do transformador (I_f) e induz a corrente na bobina secundária do transformador (I_i) o qual é então medido. Já que existe uma relação matemática entre essas duas correntes, é possível determinar se I_f está baseado em I_i . Num transformador ideal, o fluxo magnético produzido pelo enrolamento secundário do transformador é dado por

$$\phi_2 = (M_{12} \cdot I_1 + L_2 \cdot I_2) \quad (11)$$

Onde ϕ_2 é o fluxo magnético produzido pelo enrolamento secundário, M_{12} é a indutância mútua, L_2 é a indutância própria do secundário, I_1 e I_2 são, respectivamente, as correntes primária e secundária. Neste trabalho, por causa geometria específica do transformador com núcleo de ar adaptado, o fluxo do magnético gerado na bobina primária não está completamente concatenada pelo transformador da bobina secundária, gerando um impacto significativo nos resultados como mostra a Figura 7.

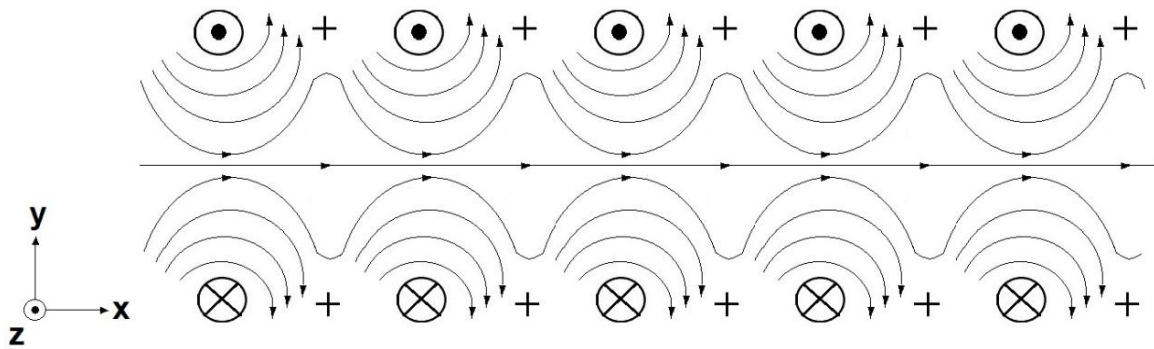


Figura 7: O fluxo magnético que não está concatenado pela bobina secundária do transformador

Nessa figura, o círculo com um ponto interno representa a saída da corrente da bobina do plano cartesiano x-y e o círculo com uma cruz dentro representa a entrada da corrente da bobina primária do plano x-y cartesiano. As cruzes representam os condutores da bobina secundária.

As setas indicam o sentido do fluxo magnético produzido pela bobina primária. É possível observar que uma importante parte do fluxo magnético não transpassa os giros secundários, e conseqüentemente não está concatenado com uma bobina secundária.

Considerando essa situação, onde o transformador não é ideal, a expressão (12) pode ser reescrita com o [29]:

$$\phi_2 = \eta.(M_{12}.I_1 + L_2.I_2) \quad (12)$$

Onde η pode ser compreendido como a eficiência do transformador de ar núcleo

A tensão no secundário do transformador é dada por:

$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} \quad (13)$$

Para o enrolamento do secundário sob curto circuito (situações em que os testes são feitos neste trabalho), é possível escrever:

$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = 0 \quad (14)$$

Assim:

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{d[\eta.(M_{12}.I_1 + L_2.I_2)]}{dt} = 0 \quad (15)$$

Ou

$$-\eta.M_{12}.\frac{dI_1}{dt} = L_2.\frac{dI_2}{dt} \quad (16)$$

As correntes I_1 e I_2 correspondem as senoides, de acordo com as Equações (18) e (19) respectivamente.

$$I_1(t) = A.\text{sen}(wt + \varphi) \quad (17)$$

$$I_2(t) = B.\text{sen}(wt + \delta) \quad (18)$$

Onde A e B correspondem a amplitudes das correntes I_1 e I_2 , respectivamente; φ e δ correspondem a mudanças de fases angulares da corrente I_1 e I_2 respectivamente; w é a velocidade angular a qual é uma constante e igual a $(2\pi f)$ e f corresponde à de frequência de tensão elétrica (no caso do Brasil, 60 Hz).

Então:

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = A.w.\cos(wt + \varphi) \quad (19)$$

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = B.w.\cos(wt + \delta) \quad (20)$$

A equação (21) pode ser reescrita, em modulo, como:

$$\left| -\eta.M_{12}.\frac{dI_1}{dt} \right| = \left| L_2.\frac{dI_2}{dt} \right| \quad (21)$$

Ou

$$\eta \cdot M_{12} \cdot \left| \frac{dI_1}{dt} \right| = L_2 \cdot \left| \frac{dI_2}{dt} \right| \quad (22)$$

Mas:

$$\left| \frac{dI_1}{dt} \right| = \frac{A \cdot w}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

$$\left| \frac{dI_2}{dt} \right| = \frac{B \cdot w}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

Consequentemente:

$$\eta \cdot M_{12} \cdot \frac{A \cdot w}{\sqrt{2}} = L_2 \cdot \frac{B \cdot w}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

Assim:

$$B = \frac{\eta \cdot M_{12} \cdot A}{L_2} \quad (26)$$

Mas:

$$L_2 = \frac{\mu_0 \cdot N_2^2 \cdot \pi \cdot R_2^2}{Lg_2} \quad (27)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo (adotada como permeabilidade magnética do ar); N_2 é o número de espiras do enrolamento secundários; R_2 é o raio da bobina secundária e Lg_2 é o comprimento da bobina secundária [53]. A indutância mútua pode ser expressada por:

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2 \cdot \pi \cdot R_1^2}{Lg_1} \quad (28)$$

Como mencionado previamente, neste trabalho $N_1 = N_2$, $R_1 = R_2$ e $Lg_1 = Lg_2$.

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \cdot N_2^2 \cdot \pi \cdot R_2^2}{Lg_2} = L_2 \quad (29)$$

Assim, a equação (31) pode ser reescrita como:

$$B = \frac{\eta \cdot L_2 \cdot A}{L_2} = \eta \cdot A \quad (30)$$

Neste trabalho a amplitude da corrente elétrica secundária induzida pode ser escrita como:

$$|I_2| = |I_i| = \frac{B}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

E a amplitude da corrente elétrica na primária pode ser escrita como:

$$|I_1| = |I_f| = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (32)$$

Dessa maneira a equação (34) pode ser reescrita como:

$$|I_i| = \eta \cdot |I_f| \quad (33)$$

Isso significa que a relação entre a corrente medida pelo sensor proposto e o fluxo de corrente no circuito sob análise pode ser definido com uma linha reta (I_f), dada pela conhecida equação:

$$y = a \cdot x \quad (34)$$

Onde y e x correspondem respectivamente à entrada e saída do sistema sob análise; e o parâmetro “ a ”, o qual é a vertente da linha, é a eficiência (η) do transformador a ser determinada

Essa eficiência do transformador (η) pode ser determinada a partir da aplicação do método dos mínimos quadrados, amplamente divulgado na literatura [57]. Nesse método, as entradas e saídas do sistema sob análise são representadas como vetores, e o parâmetro do modelo pode ser determinada usando a equação (36)

$$\eta = \left[\begin{pmatrix} \hat{I}_f \\ \hat{I}_f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{I}_f \end{pmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{I}_f \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{I}_i \end{pmatrix} \quad (35)$$

Dessa maneira, determinando o valor de n (usando Equação 35) e a medida I_i (usando o sensor proposto), é possível determinar o fluxo de corrente no circuito sob análise (I_f) usando a Equação (33). Finalmente, depois que as medidas do I_i estão feitas, elas podem ser ampliadas, filtradas e transmitidas para o microprocessador onde o CA do circuito consumido ou da energia gerada pode ser calculada. Os passos para a amplificação e filtragem, e o uso do micro controlador estão descritos nos itens a seguir.

4.1.4. Estágio de amplificação e filtragem

A corrente I_i , que é medida na bobina secundária do transformador é, então, amplificada e filtrada com a ajuda de um circuito eletrônico que está ilustrado na Figura 8. Esse circuito tem uma fase amplificadora e filtrante que usa o amplificador operacional LM318. Dessa maneira, a saída esperada pode variar numa faixa de 0-3 para correntes de entrada numa faixa de 0-30 A.

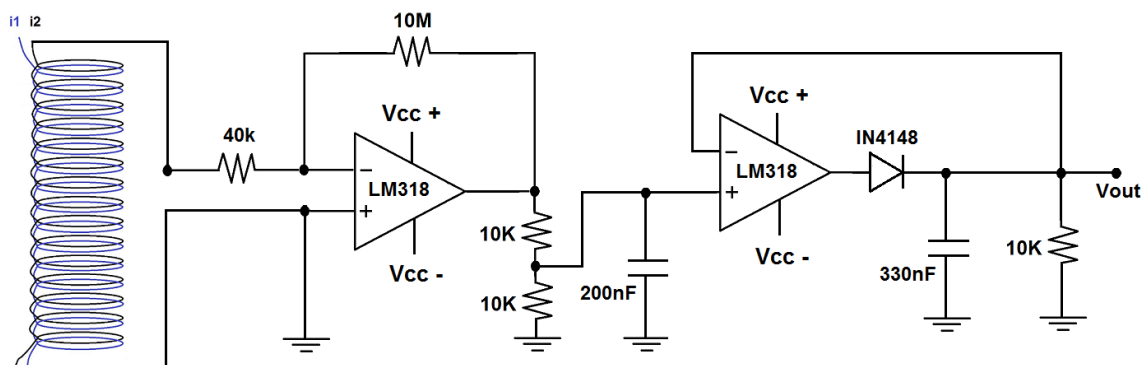


Figura 8: Circuito eletrônico do estágio de amplificação/filtragem ligado ao atual sensor (transformador de ar)

4.1.5. Microcontrolador

A placa do microcontrolador usado neste trabalho é a Arduino Uno, que é baseada no micro controlador ATmega328. Ele tem 14 pinos digitais de entrada e saída e seis pinos analógicos [33]. Essa placa é compatível com os sensores que processam a informação relacionada com os valores medidos de I_i que provem da fase de amplificação e filtragem e pode determinar o consumo/geração de energia, de acordo com as equações (9) e (10). A figura 9 ilustra o protótipo

completo de um sensor experimental, integrando as bobinas de transformador de ar núcleo, o circuito eletrônico e a placa do micro controlador.

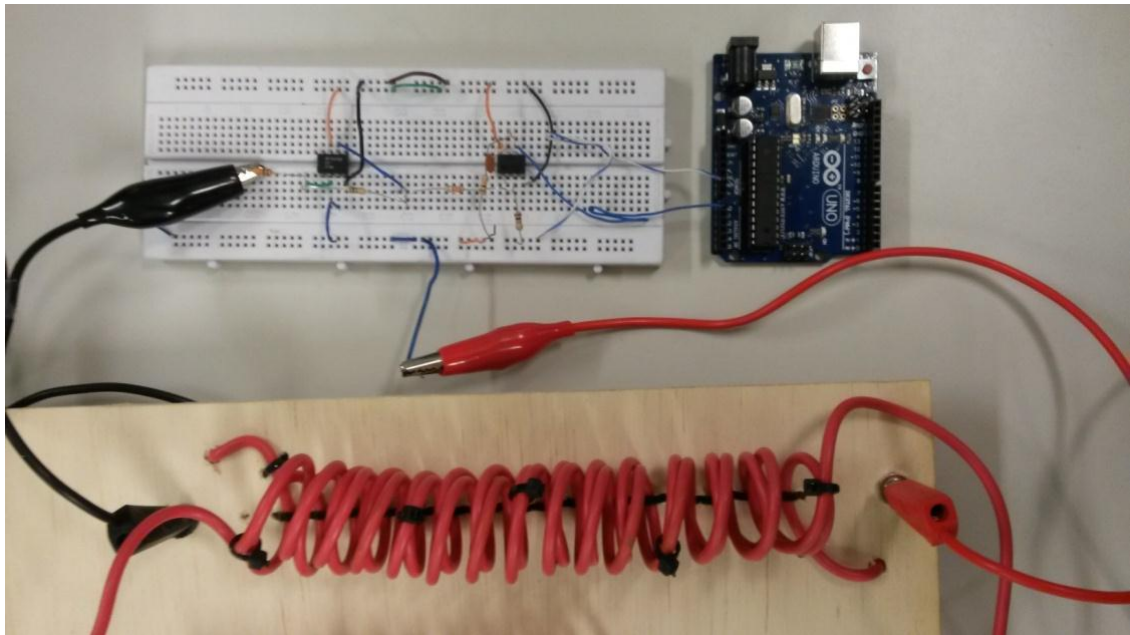


Figura 9: Protótipo do sensor proposto

4.2. Descrição dos testes de laboratório

Os testes de laboratório foram realizados com o objetivo de caracterizar a corrente de sensor proposta (transformador com núcleo de ar com bobinas primárias e secundárias concêntricas). A figura 10 ilustra a bancada de ensaio usada para caracterizar esse sensor.

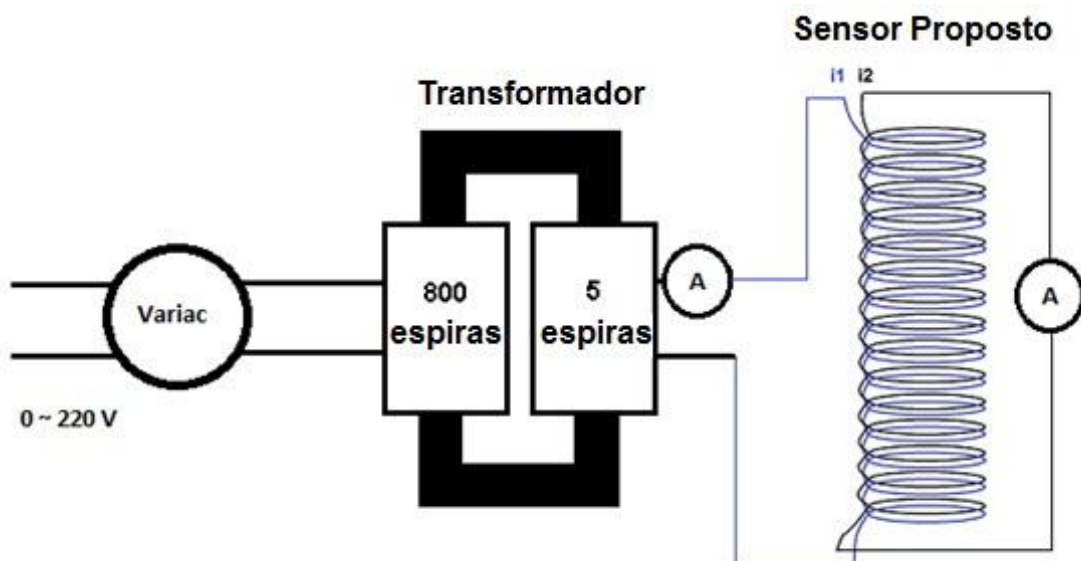


Figura 10: Esquema elétrico do banco de ensaio utilizado nos ensaios de caracterização do sensor de corrente

Nessa figura, o condutor que energiza o circuito sob análise (que deve provar um aumento de eficiência de energia) é a bobina primária do transformador (que forma o sensor proposto). Conseqüentemente, como descrito na seção anterior, o fluxo de corrente no circuito sob consideração é o fluxo de corrente elétrica através da bobina primária do transformador. O fluxo de corrente através da secundária do transformador é a corrente que está induzida na bobina secundária que é efetivamente medida pelo sensor proposto.

O enrolamento primário do transformador é alimentado pela fonte de tensão alternada conectada a outro transformador de potência (com relação de espiras de 800:5 ou 160:1) o qual permite a corrente primária I_f assumir a princípio, os valores estabelecidos (medidos com a ajuda de um amperímetro). Neste teste, os valores de I_f variaram entre 1 A e 30 A. Para cada valor de I_f , o valor correspondente do I_i foi medido (no transformador secundário que teve curto circuito) com a ajuda de um outro amperímetro.

Este teste foi primeiramente conduzido com as bobinas primárias e secundárias do sensor proposto de um condutor de cobre com uma área transversal de 2.5mm^2 . As bobinas foram formadas com 5, 10 e 15 giros. Subseqüentemente, esse procedimento foi repetido por condutores de cobre com área transversal de 4mm^2 e 6mm^2 . Após um sensor completo experimental foi testado, para verificar sua resposta na tensão de saída como uma corrente de bobina primária. Os resultados de todos os testes estão na Seção 4.3.

4.3. Resultados da Aplicação do Sensor

Como previamente mencionado, o sensor de corrente proposto consiste de dois solenoides concêntricos com raio igual ($R_1 = R_2$), o mesmo comprimento ($Lg_1 = Lg_2$), e igual números de espiras ($N_1 = N_2$), como ilustrado na Figura 6. Nesse trabalho, os testes foram feitos considerando condutores com diferentes áreas transversais. As características dos solenoides concêntricos para condutores de 2.5mm^2 , 4mm^2 e 6mm^2 estão apresentados na Tabela 8.

A figura 11 mostra a bancada de teste implementada para executar os testes de caracterização do sensor. Nessa figura, pode se observar a bancada de teste montada para executar os testes de caracterização do sensor. Nessa figura, pode-se observar o sensor proposto (duas bobinas concêntricas com ar núcleo) e o equipamento para executar os testes, como mostrado previamente na figura 10.

Tabela 8: Características dos solenoides concêntricos para condutores de 2.5mm^2 , 4mm^2 e 6mm^2 .

	5 espiras	10 voltas	15 espiras
Raio interno (metros)	0.01	0.01	0.01
Comprimento (metros)	0.05	0.10	0.15

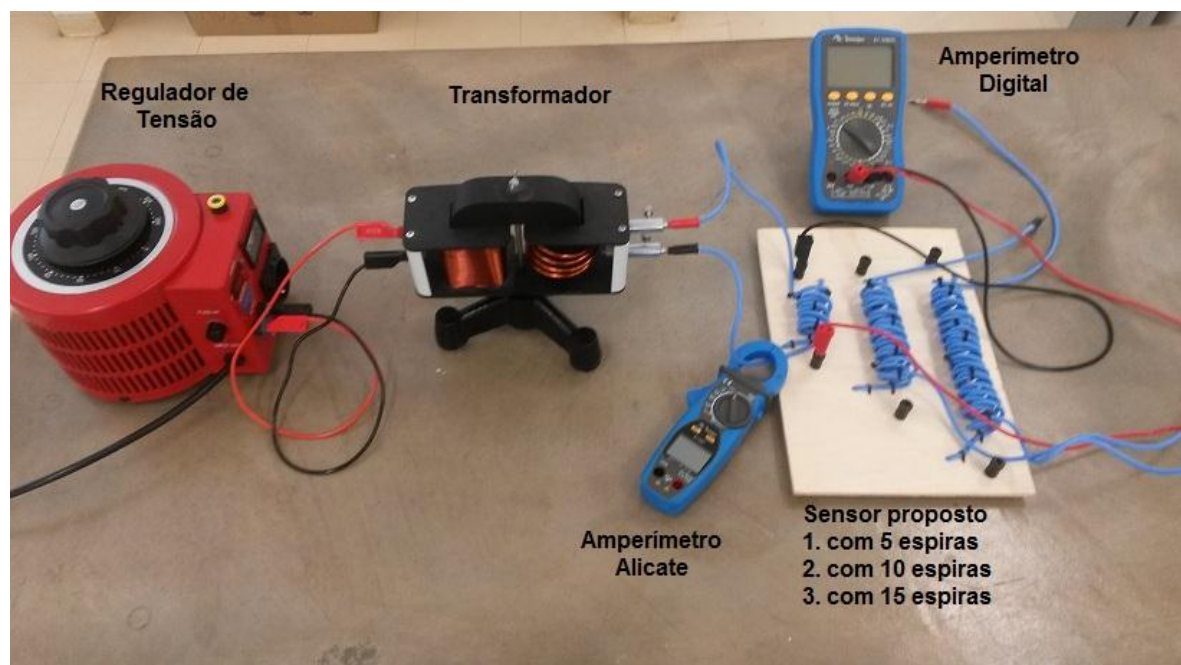


Figura 11: Bancada de ensaio para a caracterização do sensor

Os resultados desses testes são apresentados como segue para condutores com áreas transversais de 2.5mm^2 , 4mm^2 , e 6mm^2 , considerando situações com números de espiras da secundária e da primária iguais a 5, 10, e 15 espiras.

4.3.1. Influência do número de espiras

Como mencionado anteriormente, a corrente de sensor foi desenvolvida para ser aplicada em edificações que já estão em operação, sem a necessidade de reformas com um custo baixo e rápida implementação. Portanto, o uso desse sensor está fisicamente limitado pelas atuais condições do quadro de distribuição, que já contém os elementos do circuito (soquetes, proteção dos aparelhos, etc.). Portanto, foi concluído nesse trabalho, que essas condições impõem limitações no máximo e no mínimo de espiras (da corrente do sensor) que podem ser praticadas em campo, considerando a integração com metros convencionais ou com Sistema de Automação de Edificações.

Portanto, é importante checar a influência do número de espiras na corrente de indução do sensor e para atingir esse objetivo, esse trabalho considera as condições atuais da instalação. Conseqüentemente, a influência do número de espiras foi testada para um mínimo de 5 espiras e um máximo de 15 espiras. A configuração do sensor também foi testada com 10 espiras para ampliar a análise da caracterização.

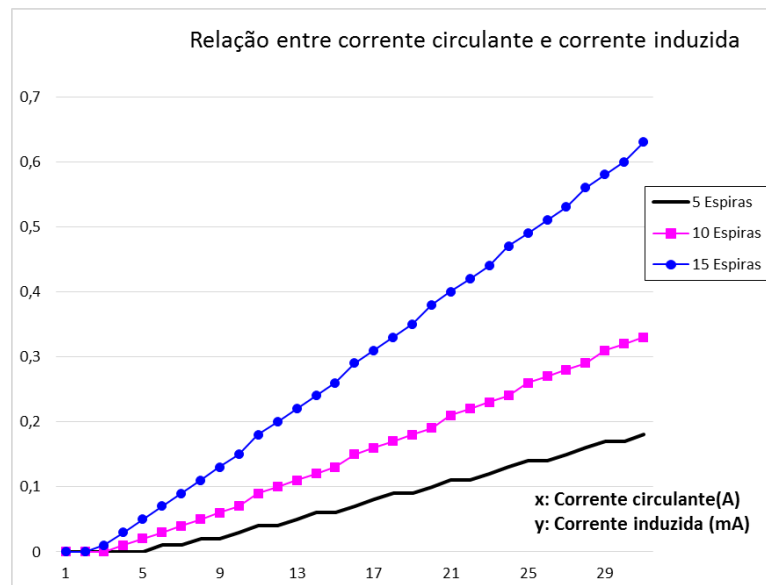


Figura 12: I_f versus I_i para o condutor de 2.5 mm^2 com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).

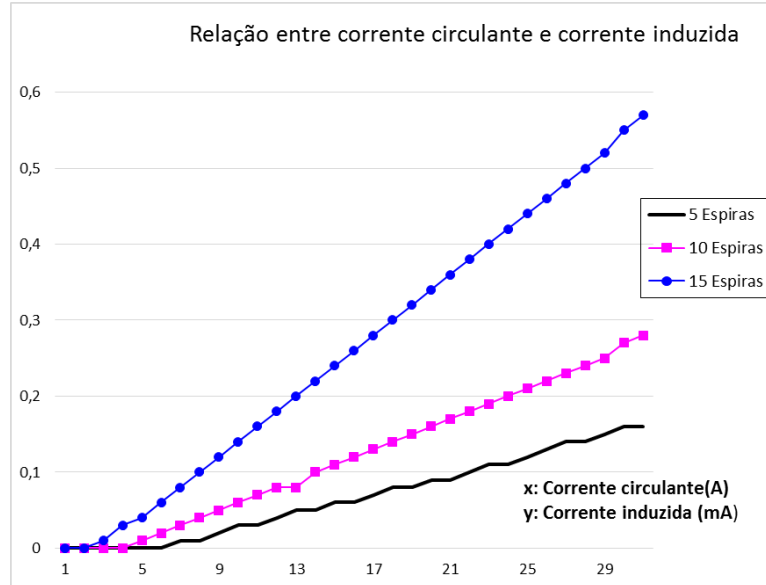


Figura 13: I_f versus I_i para o condutor de 4mm^2 com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).

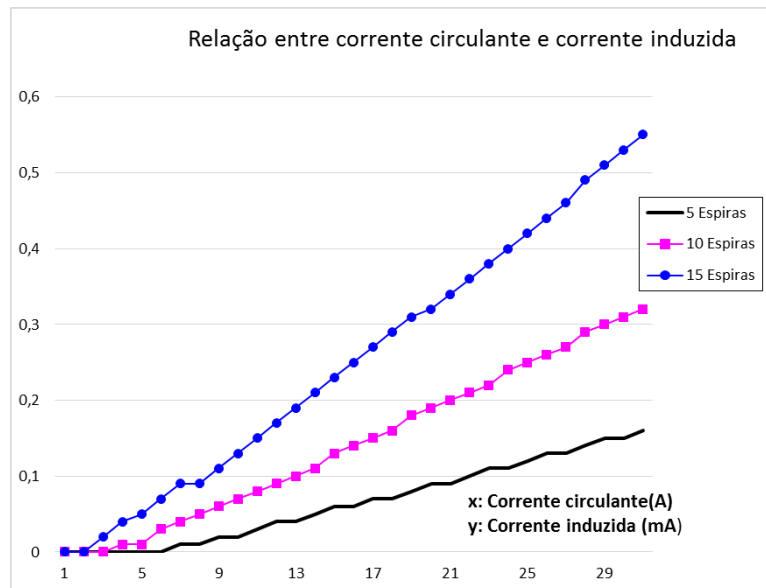


Figura 14: I_f versus I_i para o condutor de 6mm^2 com 5 espiras (preto), 10 espiras (rosa), e 15 espiras (azul).

A partir das figuras 12-14 é possível ver a relação entre I_f e I_i é aproximadamente linear. É possível concluir que para o mesmo valor do I_f , o valor do I_i aumenta de acordo com o número de espiras. Esse fato pode ser explicado usando a Equação (36).

$$\phi_1 = \frac{\mu_0 \cdot N_1 \cdot I_f \cdot A}{Lg1} \quad (36)$$

Onde ϕ_1 é o fluxo magnético produzido pela bobina primária, μ_0 é a permeabilidade do vácuo magnético (que foi considerado como permeabilidade magnética do ar), N_1 é o número de espiras da bobina primária, I_f é o fluxo da corrente (ou corrente circulante) na bobina primária, A é a área transversal do perímetro magnético e Lg_1 é o comprimento da bobina primária. A corrente induzida (I_i) na corrente secundária é proporcional a ϕ_1 . Então, se N_1 aumenta, ϕ_1 aumenta e conseqüentemente, I_i aumenta.

4.3.2. Influência da área transversal dos condutores

Como discutido na Seção 4.3.1 três casos básicos foram adotados para os testes envolvendo o número de espiras (5, 10 e 15 espiras) considerando as condições operacionais da instalação elétrica atual. Similarmente, para verificar a influência do condutor da área transversal na corrente do sensor induzido, alguns aspectos práticos, relacionados ao condutor elétrico que forma as bobinas do sensor, devem ser consideradas.

No Brasil, os condutores comumente usados em instalações elétricas de baixa tensão geralmente têm padrão de áreas transversais de 1.5 mm², 2.5 mm², 4 mm², 6 mm², e 10 mm². Entre esses, condutores de 1.5 mm² são exclusivamente empregadas em circuitos de iluminação. Os condutores de 2.5 mm², 4 mm², e 6 mm² representam mais que 90% dos condutores usados em ambientes construídos. Dessa maneira, foi considerado apropriado fazer experimentações usando bobinas formadas com os condutores das áreas transversais mais importantes (2.5 mm², 4 mm², e 6 mm²), considerando os três números de espiras diferentes dos quais foram previamente adotados (5,10, e 15 espiras).

A figura 15 mostra a relação entre I_f (estabelecido) e I_i (medido) para bobinas primárias e secundárias com 5 espiras, usando condutores de 2.5 mm², 4 mm², e 6 mm².

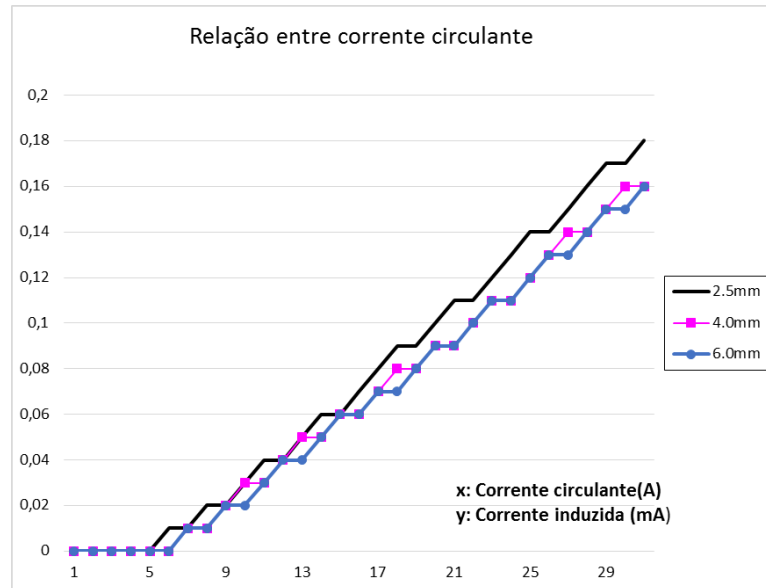


Figura 15: I_f versus I_i para 5 espiras com condutores de 2.5mm^2 (preto), 4mm^2 (rosa) e 6mm^2 (azul)

A figura 16 mostra a relação entre I_f (estabelecido) e I_i (medido) para bobinas primárias e secundárias com 10 espiras, usando condutores de 2.5mm^2 , 4mm^2 , e 6mm^2 .

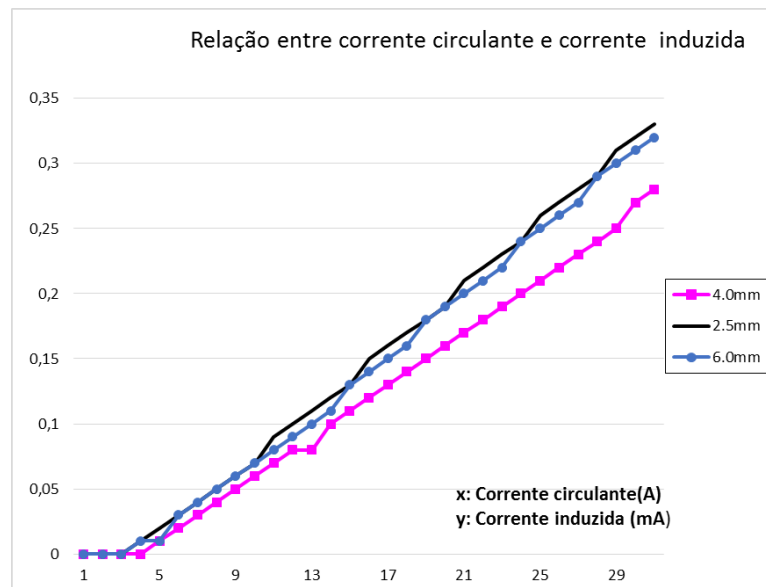


Figura 16: I_f versus I_i para 10 espiras com condutores de 2.5mm^2 (preto), 4mm^2 (rosa) e 6mm^2 (azul)

A figura 17 mostra a relação entre I_f (estabelecido) e I_i (medido) para bobinas primárias e secundárias com 15 espiras, usando condutores de 2.5mm^2 , 4mm^2 , e 6mm^2 .

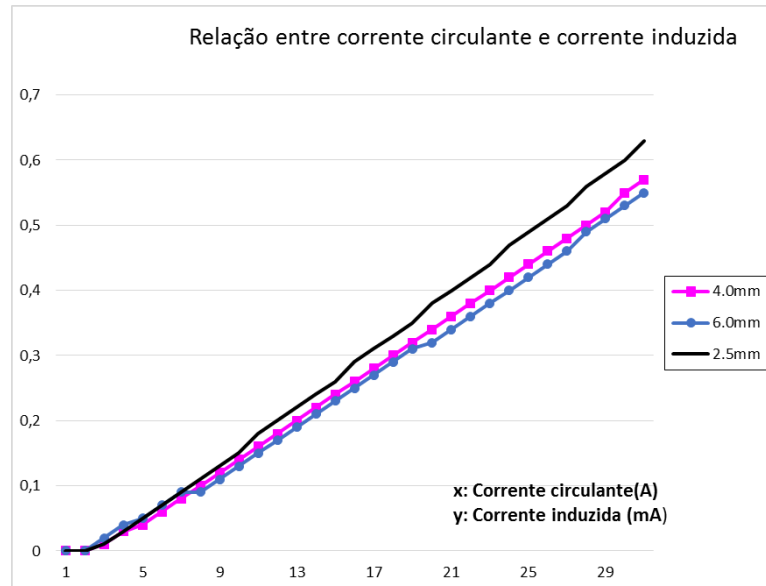


Figura 17: I_f versus I_i para 15 espiras com condutores de $2,5\text{mm}^2$ (preto), 4mm^2 (rosa) e 6mm^2 (azul)

A partir das Figuras 15-17 é possível ver que a relação I_f e I_i é aproximadamente linear. Além disso, as linhas diretas obtidas para condutores com diferentes áreas transversais são muito similares. A pequena diferença que pode ser vista nos coeficientes angulares dessas linhas diretas pode ser explicada pelas diferenças que aparecem nas áreas transversais com as bobinas. Essas áreas transversais sofrem discretas reduções a medida que a área transversal do condutor cresce.

Também, outra pequena área de diferença está inerentemente associada a construção de bobinas, sujeita a prática de imperfeições.

4.3.3. Eficiência do Transformador com núcleo de ar

Usando a Equação (35), foi possível determinar a eficiência do transformador com núcleo de ar para diferentes condições de testes usados nesse trabalho, como apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Eficiência de transformador com núcleo de ar

	Condutor de $2,5\text{mm}^2$	Condutor de $4,0\text{mm}^2$	Condutor de $6,0\text{mm}^2$
5 espiras	$\eta = 0,54\%$	$\eta = 0,49\%$	$\eta = 0,48\%$
10 espiras	$\eta = 1,04\%$	$\eta = 0,86\%$	$\eta = 1,01\%$

	Condutor de 2,5mm ²	Condutor de 4,0mm ²	Condutor de 6,0mm ²
15 espiras	$\eta=2,00\%$	$\eta=1,81\%$	$\eta=1,74\%$

A partir da tabela 9, é possível ver que a melhor eficiência (2%) está associada a condição dos 15 espiras e um condutor de área transversal de 2.5 mm². A baixa eficiência é por causa de uma significativa parte do fluxo magnético que não está concatenado pela bobina secundária, já que o núcleo do transformador é constituído de ar. Apesar desse fato, a necessidade de usar um transformador com núcleo de ar é justificado dentro do contexto do método não destrutivo proposto, conforme mencionado anteriormente.

4.3.4. Modelos matemáticos

Usando as equações (33) e (35), também é possível determinar um modelo matemático para descrever a relação entre I_i e I_f , como apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Modelos matemáticos para I_i versus I_f

	Condutor de 2,5mm ²	Condutor de 4,0mm ²	Condutor de 6,0mm ²
5 espiras	$I_i = 0,0054.I_f$	$I_i = 0,0049.I_f$	$I_i = 0,0048.I_f$
10 espiras	$I_i = 0,0104.I_f$	$I_i = 0,0086.I_f$	$I_i = 0,0101.I_f$
15 espiras	$I_i = 0,02.I_f$	$I_i = 0,0181.I_f$	$I_i = 0,0174.I_f$

4.3.5. Resultados do estágio de amplificação e filtragem

A Figura 18 mostra a relação entre I_f e a tensão do sensor de saída depois da fase de amplificação e filtragem. A partir dessa Figura, é possível observar que a relação entre a tensão do sensor de saída completo (que corresponde a corrente sob análise, I_f) é linear e varia em um intervalo de 0-3V. Essa faixa de tensão permite o uso de uma família extensa de conversores analógicos e digitais e, conseqüentemente, aumenta a aplicabilidade do conversor proposto e dos seus circuitos amplificadores e filtrantes associados em uma ampla gama de

plataformas de redes de sensores, com fácil implementação de software devido a sua resposta linear.

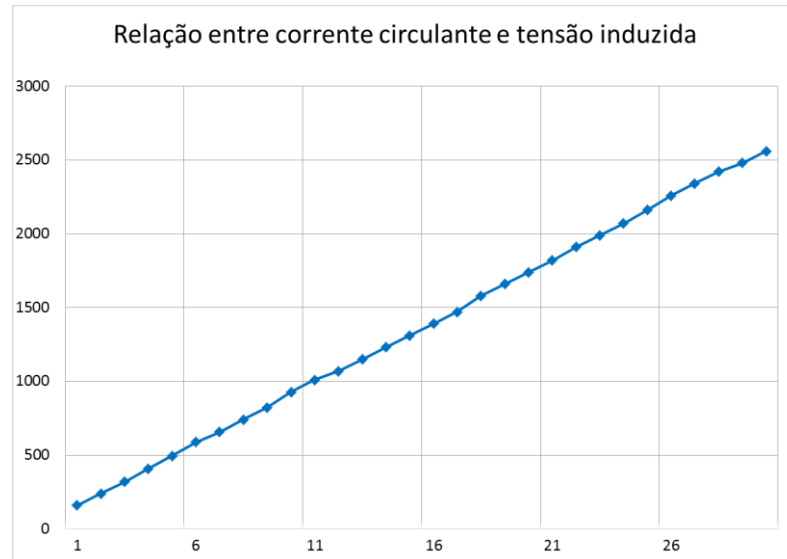


Figura 18: Relação entre o I_f e a tensão de saída do sensor depois do estágio de amplificação e filtragem

4.3.6. Discussão

A proposta aqui descrita corresponde a um método de monitoramento de corrente não destrutivo para a aplicação de iniciativas para o aumento da eficiência de energia em edificações com certificação ambiental. Mais especificamente, esse método permite uma evidência de redução ou aumento do consumo de energia quantitativa nos circuitos, que é fundamental para iniciativas de aumento de eficiência energética nas edificações.

Hoje essa verificação é feita por diferentes sistemas de certificações ambientais, usando métodos de simulação e software, como apresentado pelas referencias [34, 35, 36]. Já que o software e os métodos de simulação são baseados em modelos aproximados e representações hipotéticas das atuais condições das edificações, os resultados apresentados podem não corresponder ao que realmente acontece nas edificações. Em outras palavras, mesmo se o software ou o método de simulação usado for preciso, apenas resultados estimados serão apresentados e podem levar a conclusões inapropriadas relacionadas à necessária evidencia do aumento de eficiência de energia associada às iniciativas sob análise.

Também existem metodologias que buscam estimar ou prever o consumo de energia a edificação como um todo, ou para sistemas específicos, como o sistema de ar condicionado. De acordo com as referências [37, 38, 39, 40], essas estimativas e previsões podem ser feitas, por exemplo, baseando-se em dados obtidos de cálculos ou das características do sistema. Esses métodos podem também usar modelos para representar o consumo global de energia de um prédio; por essas razões, corre-se o risco de se obter uma estimativa aproximada da demanda de energia, que também pode levar a conclusões inválidas com relação à evidência do aumento de eficiência energética.

Existem outros trabalhos que fizeram uso de quantidades elétricas, que são medidas para fazer o controle e automação de diferentes sistemas de edificações (ar condicionado, ventilação, iluminação, aquecimento, etc.) focados em aumentar a eficiência energética das edificações, como descrito em [55]. No entanto, esses parâmetros são medidos por aparelhos que requerem o corte do circuito sob análise, gerando assim a necessidade de reforma, manutenção e, ainda, custos operacionais extras.

Nesse contexto, o método proposto tem a vantagem de, estando baseado em medidas reais, ser capaz de providenciar uma prova válida e correspondente quantificação do aumento da eficiência da iniciativa em análise. Além disso, é também um método não destrutivo, já que a corrente demandada pelo circuito em análise é medida sem a necessidade de secção dos circuitos de energia e consequente reforma.

Outro ponto forte do método proposto consiste no fato de que o sensor desenvolvido pode ser conectado a um microcontrolador, o qual é capaz de processar a informação relacionada aos valores medidos da corrente i que vem da fase de amplificação e filtragem, podendo automaticamente determinar a geração e o consumo de energia, de acordo com as Equações (10) e (11). Além disso, como mencionado anteriormente, é viável o uso de uma vasta família de conversores analógico-digitais e microcontroladores, ampliando as opções de aplicabilidade do proposto sensor.

Por outro lado, é importante notar que o ponto sensível do método proposto corresponde à eficiência do transformador de ar núcleo usado como sensor de corrente. Como mostrado pelos resultados obtidos, essa eficiência foi por volta de 2% no máximo, considerando todos os testes executados. Como mencionado previamente, essa baixa eficiência é por causa do uso do núcleo de ar (que faz com que uma parte significativa do fluxo magnético não seja concatenado pela bobina secundária), o qual é de fundamental importância, considerando a característica não destrutiva da metodologia proposta. Por causa dessa baixa eficiência, a inserção de uma fase de amplificação/filtragem do sensor desenvolvido torna-se necessária para amplificar e filtrar a corrente medida pelo sensor de corrente.

Apesar das limitações mencionadas, é importante notar que a metodologia proposta pode ser usada diretamente em um sistema de certificação ambiental que requer uma prova de aumento da eficiência energética decorrente de diferentes iniciativas, tais como, o uso de painéis fotovoltaicos para geração ou a implantação de um sistema de automação de iluminação.

A metodologia proposta pode ser facilmente adaptada no contexto dos requerimentos de eficiência de energia de normas internacionais como a EN15232 e a ISO 50001. Esses requerimentos incluem o controle e a automação do aquecimento, resfriamento, ventilação, ar condicionado, sombreamento e sistemas de iluminação, para o aumento da eficiência energética em edifícios e organizações. Para realmente medir e quantificar o impacto da automação e controlar os sistemas de energia em prédios/organizações, torna-se necessário medir o consumo de energia da edificação. Geralmente, a medida do consumo de energia associada com diferentes circuitos da edificação é feita usando aparelhos que requerem o corte manual da rede de energia em análise [55] e, além disso, a realização de reformas na edificação. Nesse contexto, a metodologia proposta pode ser usada para medir esse consumo de energia de uma forma não destrutiva e de baixo custo.

5. MEDIÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM AMBIENTES CONSTRUÍDOS

Nos últimos sessenta e cinco anos, a população mundial quase triplicou, passando de 2,5 bilhões de pessoas em 1950 para 7,3 bilhões hoje em dia e com previsão de continuar crescendo até o ano de 2070 de acordo com as projeções demográficas [65]. O crescimento populacional vinculado à urbanização tem gerado reflexões a respeito da necessidade de rever o uso de energia elétrica pela população e as implicações que podem causar em relação à sustentabilidade. Foi possível observar, com o passar dos anos, que a utilização da energia elétrica está em curva ascendente e que isto pode vir a gerar um colapso de fornecimento. Isso é causado, em parte, pela variedade e quantidade de aparelhos elétricos e eletrônicos disponíveis e instalados nas edificações. Um edifício sustentável é aquele que, além de consumir menores quantidades de energia, deve prover o conforto aos usuários [62,64]. Desse modo, tem aumentado a busca por certificações que avaliem o desempenho ambiental das edificações, considerando as concepções arquitetônicas hoje desenvolvidas [61].

Dentre as existentes, pode-se citar como referência duas das certificações mais utilizadas no Brasil, o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e o Processo AQUA (Alta Qualidade Ambiental). O LEED é uma certificação desenvolvida nos Estados Unidos e o AQUA é baseada na certificação francesa HQE (*Haute Qualité Environnementale*) [63]. Ambos os sistemas têm características em comum, como a ideal utilização da água, controle da emissão de gás carbônico, gestão de resíduos e conforto para os usuários. Tendo os Estados Unidos uma grande preocupação com a eficiência energética, o LEED foca sua liderança na sustentabilidade energética de edificações. Por outro lado, a certificação AQUA foi pioneira na preocupação do conforto relacionado às emissões eletromagnéticas, apontando a necessidade de se ter boas práticas na utilização de equipamentos geradores de campos eletromagnéticos.

Em sistemas de telecomunicações existe a preocupação com a radiação eletromagnética gerada pelas redes Wi-Fi e telefones, principalmente para redes sem fio, uma vez que estão sendo mais utilizadas. Já no campo Energia, existe

grande preocupação dos campos gerados pela frequência de 60 Hertz, que estão presentes em transformadores, condutores energizados, chuveiros elétricos etc. As principais dificuldades do levantamento de campo eletromagnético é a ausência de uma metodologia eficaz para tanto.

No Brasil, existe uma norma, a ABNT NBR 15415/2006 [59] que estabelece limites de exposição, para o público geral, considerando as faixas de frequência de 50 a 60 Hertz, porém não apresenta procedimentos claros de medição desta exposição. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [60] apresentou a Resolução Normativa N^o 398, de 23 de março de 2010, que, em seu texto, destaca: “Os agentes de transmissão devem, até o final da fase de comissionamento de novos empreendimentos, adicionar à documentação exigida pela ANEEL o memorial de cálculo ou o relatório das medições dos campos elétrico e magnéticos”. Assim é ressaltada a importância quanto ao monitoramento das emissões eletromagnéticas nas novas edificações.

De forma geral é possível afirmar que são incipientes as tratativas do conforto humano em relação ao campo eletromagnético gerado pelas edificações no Brasil. Assim, neste trabalho, foram desenvolvidos métodos para medição empírica de campos eletromagnéticos existentes em ambientes construídos, para a faixa de 60 Hertz (Campo Energia).

5.1. Etapas da medição

O método deste capítulo está dividido em três etapas principais:

1. Monitoramento de edificações, realizando medições do Campo Eletromagnético.
2. Calibração da Antena a partir de um transformador.
3. Análise da sensibilidade da Antena para a aferição do campo Energia.

5.2.1. Etapa de monitoramento de edificações

A medição do campo eletromagnético foi realizada no Campus I da Pontifícia Universidade Católica de Campinas com o auxílio de uma antena.

Foram escolhidas edificações dentro da universidade com maior possibilidade de incidência de campo eletromagnético e de grande fluxo de pessoas.

5.2.1.1. Ponto 1 de monitoramento

O ponto 1 de monitoramento localiza-se paralelamente à Avenida Professora Ana Maria Silvestre Adade, conforme figura 19. Neste local existe um estacionamento de funcionários e em seu entorno algumas das edificações utilizadas pela graduação e administração como laboratórios de química, laboratório de instalações elétricas, salas administrativas, auditório, conforme ilustrado na imagem de satélite da figura 20. A presença de pessoas da comunidade universitária nesses ambientes é constante.

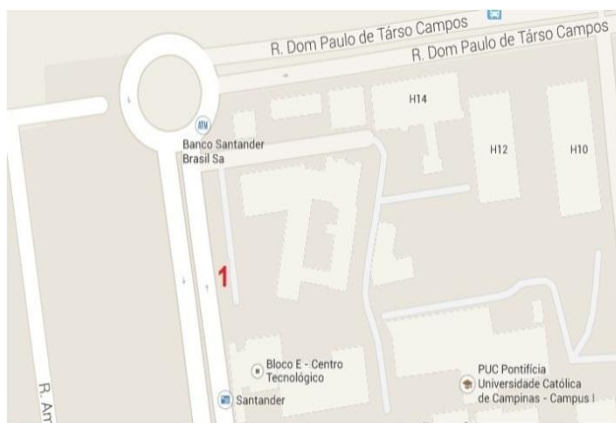


Figura 19: Localização do primeiro ponto de monitoramento



Figura 20: Imagem de satélite do ponto 1

O monitoramento das emissões eletromagnéticas foi feito no estacionamento a partir do marco zero, conforme ilustrado na figura 21. O motivo da escolha deste ponto deve-se à observação de uma cabine de transformador neste ambiente, sendo um potencial de emissão de campos eletromagnéticos para as edificações presentes no local. Na medição, a antena foi direcionada para a cabine de transformação e para o prédio mais próximo, que é o edifício onde estão localizados os laboratórios de química. A antena foi posicionada a 20 metros da cabine de transformadores e a 32 metros da edificação (figura 21). A princípio foram desconsideradas eventuais interferências causadas pelo ambiente externo à universidade. A figura 22 ilustra a antena posicionada no local de medição.



Figura 21: Distância do ponto 1 em relação ao ambiente construído



Figura 22: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 1

5.2.1.2. Ponto 2 de monitoramento

O Ponto 2 de monitoramento localiza-se numa das regiões de maior circulação de pessoas sendo um dos pontos centrais da Universidade, conforme figura 23. Nesse espaço está localizada a praça de alimentação que em seu ambiente tem dois restaurantes, três lanchonetes, duas lojas de fotocópia e encadernação e duas papelarias. Em seu entorno, existem várias edificações como a biblioteca, salas de aula do Centro Tecnológico, salas de aula dos blocos H9 ao H14, laboratório de instalações elétricas, laboratório de meios de transmissão, laboratórios de física, conforme ilustrado na imagem de satélite da figura 23 e 24.



Figura 23: Localização do segundo ponto de monitoramento



Figura 24: Imagem de Satélite do ponto 2

O monitoramento foi feito no interior da praça de alimentação a partir do marco zero, conforme ilustrado na figura 25. A escolha deste ponto deve-se à observação do grande fluxo de pessoas no local, devido à variedade e quantidade de comércios no ambiente e pela presença de uma cabine de transformadora bem próxima à edificação. Na medição, posicionamos a antena de forma linear para à praça de alimentação, que tem 56,5 metros de comprimento e para a casa de transformador que está localizada a 24,08 metros do marco zero. A figura 26 ilustra a antena posicionada no local de medição.



Figura 25: Distância do ponto 2 em relação ao ambiente construído e a casa de transformadores



Figura 26: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 2

5.2.1.3. Ponto 3 de monitoramento

O Ponto 3 de monitoramento localiza-se numa rua no interior na Universidade, conforme Figura 27. Existe, neste ambiente, uma boa circulação de pessoas e de carros administrativos. Neste espaço, está localizada a capela, um depósito e várias salas de aula, conforme ilustrado na imagem de satélite da Figura 28.

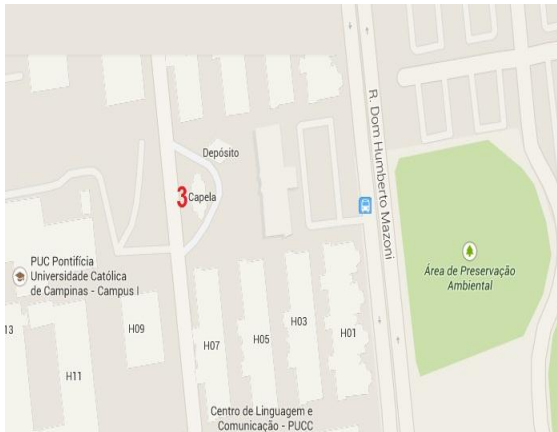


Figura 27: Localização do terceiro ponto de monitoramento

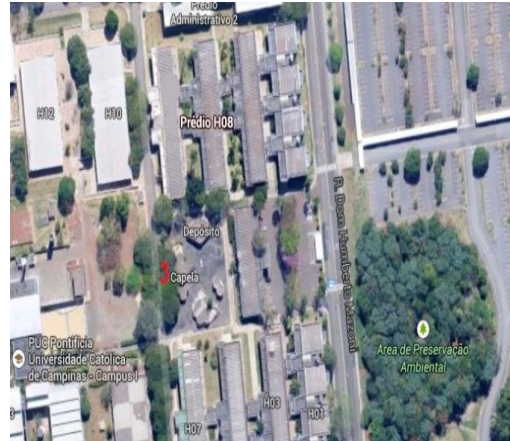


Figura 28: Imagem de satélite do ponto 2

A monitoração foi feita na rua a partir do marco zero, conforme ilustrado na figura 29. A escolha deste ponto se deve à observação do grande fluxo de pessoas no local e pela presença de uma cabine de transformador próxima a edificação. Na medição, a antena foi posicionada a 7,92 metros da capela, e a uma distância de 53 metros da cabine de transformadores. A figura 30 ilustra a antena posicionada no local de medição.



Figura 29: Distância do ponto 3 em relação ao ambiente construído



Figura 30: Posicionamento da antena no local de medição do ponto 3

Para o monitoramento das edificações foi utilizada uma antena projetada para captar baixas frequências, detalhada na figura 31.

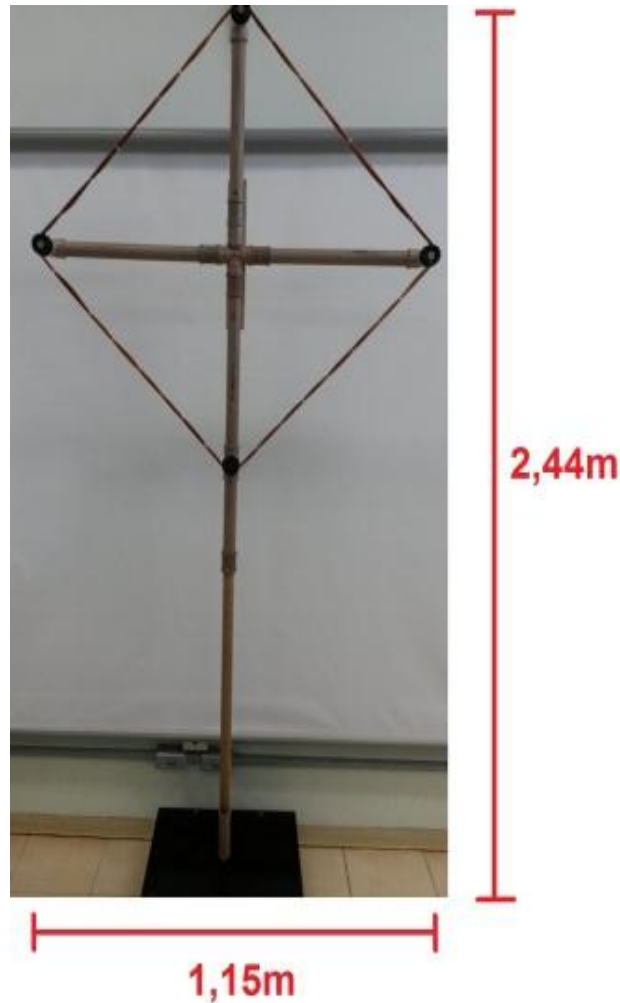


Figura 31: Antena de medição do campo eletromagnético

A antena tem em 2,24 metros de altura em relação ao solo e 1,15 metros de largura. Em sua estrutura, foram utilizados: cano de PVC marrom de 40 mm, 6 luvas soldáveis de PVC marrom de 40 mm, 4 cotovelos soldáveis de PVC marrom de 90°; um “TÊ” soldável de PVC marrom de 90°; uma haste de madeira de 1,50 metros; duas bases madeira com 2 cm de altura por 60 cm de profundidade por 60 cm de largura cada uma; 640 metros de fio de cobre esmaltado enrolado em 4 carretéis de plástico com 4 cm de diâmetro cada um. Para a soldagem dos tubos com as conexões; foi utilizado um adesivo plástico comercial para PVC bisnaga. Um circuito amplificador de sinais é acoplado à antena para permitir a visualização de baixas frequências no osciloscópio referentes aos campos eletromagnéticos dispersos no ambiente. Além da antena, utilizou-se um equipamento capaz de fazer o monitoramento das edificações. Um osciloscópio da marca *Agilent Technologies*, modelo DSO1072B, conforme ilustrado na figura

32. Este equipamento tem dentre suas funções a opção de visualização e análise de sinais de circuitos. Uma vez acoplado à antena, o osciloscópio apresenta formas de ondas dos campos eletromagnéticos dos pontos de medição. Ele foi programado para levantar dados da frequência de 60 Hertz, que é o espectro do campo Energia. Os valores armazenados foram transferidos para um banco de dados e salvos em um computador por meio de um *pendrive*.



Figura 32: Osciloscópio modelo DSO1072B - Agilent

5.2.2. Etapa de calibração da antena

Para a etapa de calibração da antena, definiu-se um padrão de montagem para a calibração da antena, conforme ilustrado na figura 33.

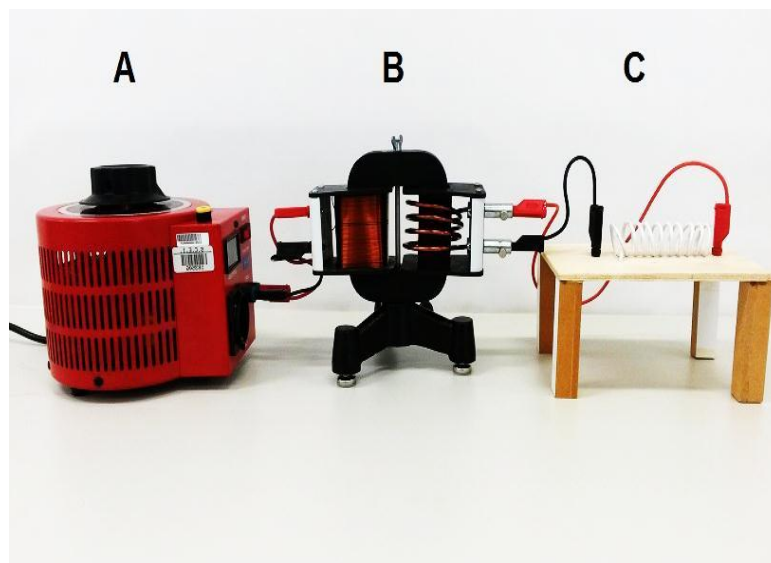


Figura 33: Perspectiva dos equipamentos de calibração.

Na Figura 33, em “A” apresenta-se o *VARIAC* da marca *Minipa*, um equipamento com finalidade de regular a tensão de 0 a 250 Volts em corrente elétrica alternada. Acoplado a ele encontra-se um transformador de 800 para 5 espiras, conforme apresentado em “B”, que tem a função de reduzir valores de tensão e aumentar os valores da corrente circulante. Em “C” têm-se um solenoide de 10 espiras, com 2 cm de diâmetro cada e com 2,5mm de bitola de fio que está em curto circuito acoplado ao transformador.

A tensão aplicada no primeiro estágio (800 espiras) do transformador é reduzida no segundo estágio (5 espiras) e assim têm-se uma alta corrente em circulação nos solenoides ligados ao conjunto. A corrente circulante ao passar pelas espiras gera uma corrente induzida que forma um campo eletromagnético no ambiente. Este campo disperso no ambiente é utilizado para a calibração da antena. Como é possível regular a tensão de entrada, pode-se controlar o campo eletromagnético produzido no ambiente.

5.2.3. Etapa de análise da sensibilidade da antena

Nesta etapa, de natureza empírica, foi efetuada a calibração do *VARIAC* e do padrão de montagem da figura 33, para fornecer 0 Volts de tensão de entrada no primeiro estágio (800 espiras) do transformador. Como resposta obteve-se 0 Volts na saída do segundo estágio (5 espiras), 0 Amperes de corrente circulante e 0 Amperes de corrente induzida. Isto mostra que não houve campo eletromagnético gerado pelo conjunto, como ilustra a imagem fornecida pelo osciloscópio na figura 34. Ao aplicar uma tensão de 55 volts de entrada no primeiro estágio do transformador obteve-se 0,22 Volts na saída do segundo estágio, 10 Amperes de corrente elétrica e 0,20 Miliampères de corrente induzida. Nesta calibração, verificou-se que um campo eletromagnético foi gerado no ambiente, conforme ilustra a figura 35. Desta forma é possível demonstrar a sensibilidade da antena em relação a campos eletromagnéticos.

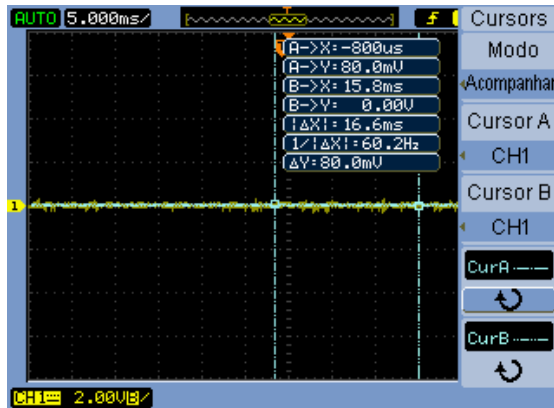


Figura 34: Antena desligada

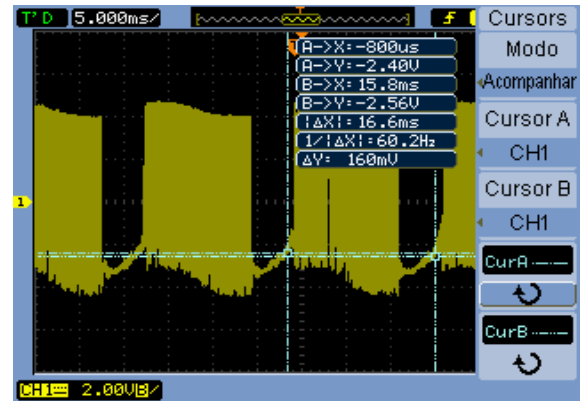


Figura 35: Antena ligada

5.2. Testes e Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos empregando-se o procedimento proposto para medição empírica de campos eletromagnéticos em ambientes construídos, para a faixa de 60 hertz. Todas as imagens apresentadas nos resultados referem-se ao dia 14 de abril de 2015, no Campus I da Pontifícia Universidade Católica de Campinas..

5.3.1. Teste no ponto 1 de monitoramento

Ao posicionar a antena no marco zero do ponto 1 de monitoramento observa-se, conforme figura 36, uma incidência de campo eletromagnético a 20 metros da cabine de transformadores. Ao aproximar a distância da cabine de transformadores em 10 metros foi possível observar uma forte presença de campo eletromagnético contínuo, vindo do sentido desta edificação, conforme ilustrado na figura 37.

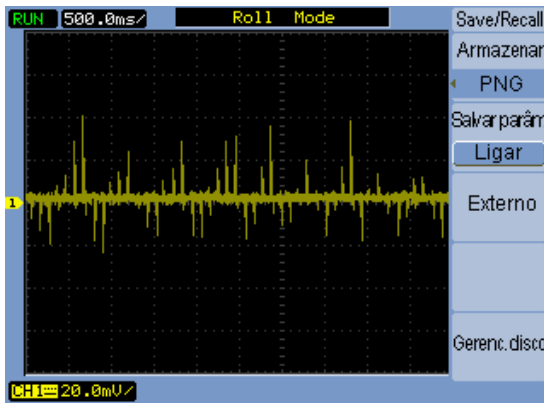


Figura 36: Sinal do osciloscópio a 20 metros da cabine de transformador

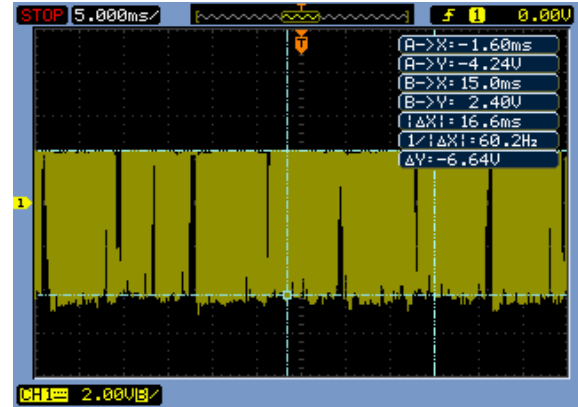


Figura 37: Sinal do osciloscópio a 10 metros da cabine de transformador

5.3.2. Teste no Ponto 2 de monitoramento

Ao posicionar a antena no marco zero do ponto 2 de monitoramento observa-se, conforme a figura 38, a presença de um campo eletromagnético interferindo, de forma intermitente, na faixa de 60 Hertz.

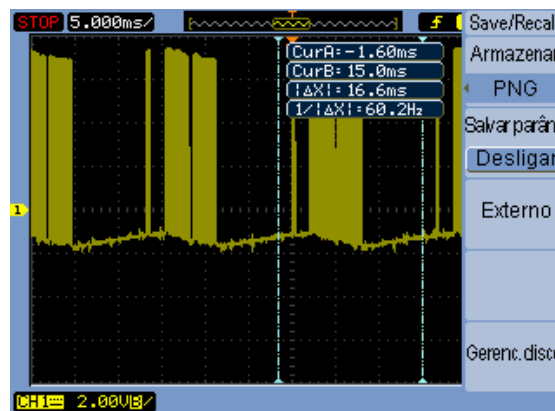


Figura 38: Sinal do osciloscópio no ponto 2 de monitoramento

5.3.3. Teste no Ponto 3 de monitoramento

Ao posicionar a antena no marco zero do ponto 3 de monitoramento observa-se, conforme a figura 39, a presença de um campo eletromagnético contínuo no ambiente. Ao isolar os sinais foi possível observar um campo eletromagnético, na faixa de 30,1 kHz interferindo de forma contínua no campo energia, conforme figura 40.

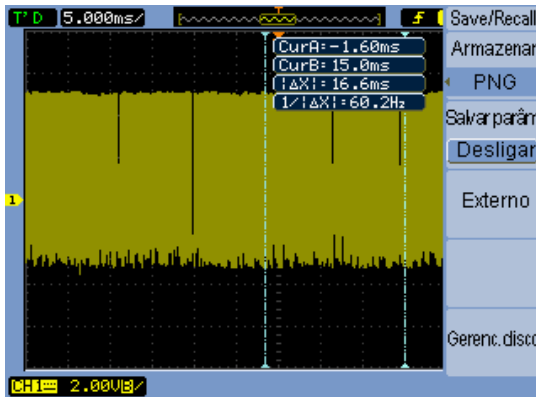


Figura 39: Sinal do osciloscópio no ponto 3 de monitoramento

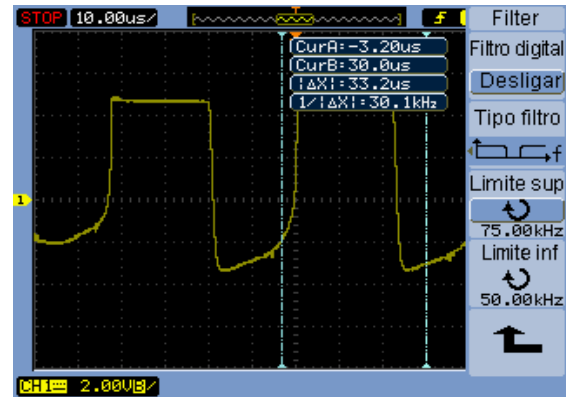


Figura 40: Sinal interferindo no ponto 3 de monitoramento

5.3. Discussão

Baseado nos resultados obtidos é possível verificar a presença efetiva de campos eletromagnéticos dispersos nos locais de medição. No ponto 1 de monitoramento destaca-se a presença de radiações em ambientes com uma boa circulação de pessoas, como laboratório de química e salas administrativas. É importante ressaltar que a proximidade das edificações ao campo emissor é pequena, inferior a 10 metros. O ponto 2 destaca-se por ser uma das edificações de maior circulação de pessoas na universidade e percebe-se neste local a presença de um campo eletromagnético que interfere na faixa do Campo energia. O ponto 3 destaca-se pela presença de um campo de grande amplitude e que está presente no entorno de todas as edificações como salas de aula, capela, depósito.

A partir dos resultados, vale ressaltar a necessidade de se desenvolver técnicas construtivas pensando nas radiações de campos eletromagnéticos dispersos no ar. É importante desenvolver estudos capazes de localizar e mitigar a presença dos campos eletromagnéticos em ambientes construídos e propor soluções na tentativa de afastar os pontos de emissão do convívio humano.

6. PESQUISA DE CAMPO DE FONTES EMISSORAS DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM EDIFICAÇÕES

O presente capítulo apresenta uma análise de campo eletromagnético produzido por fontes de emissão eletromagnéticas tanto do campo produzido pelo sistema de energia elétrica (60 Hertz) como o campo de telecomunicações (915MHz – 2.4GHz), a título de validação dos métodos e procedimentos propostos neste trabalho, considerando a possibilidade de certificação de um empreendimento definido conforme a certificação AQUA.

6.1. Local das medições

As medições foram realizadas na Avenida Antônia Pazinato Sturion, Piracicaba – SP, próximo ao Hospital da UNIMED.

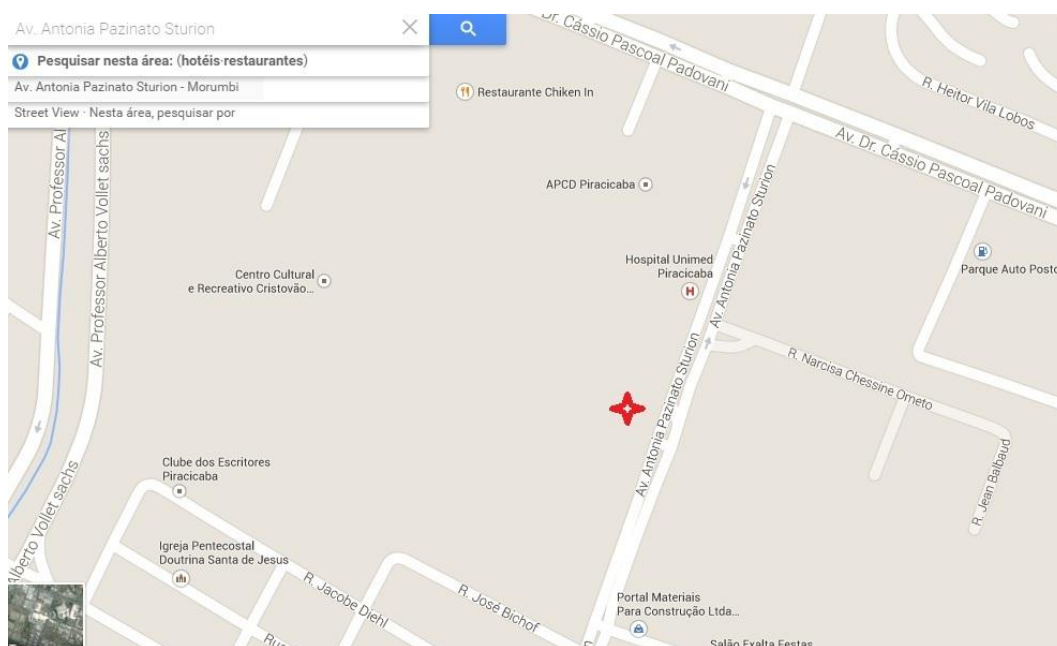


Figura 41: Mapa 1 – Localização do Empreendimento. **Fonte:** Google Earth Mapping Service

6.2. Identificação de fontes de emissão externas ao empreendimento

6.1.1. Energia

Foi identificada fonte emissora de ondas eletromagnéticas de baixa frequência (energia) no entorno, correspondente à subestação de energia, abaixadora, de distribuição, conforme figura 42 a seguir.



Figura 42: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba.

Fonte: Google Earth Mapping Service

Trata-se da subestação Santa Cecília, da CPFL, figura 43, que alimenta cerca de 14 mil unidades consumidoras de energia elétrica, entre casas e áreas comerciais.

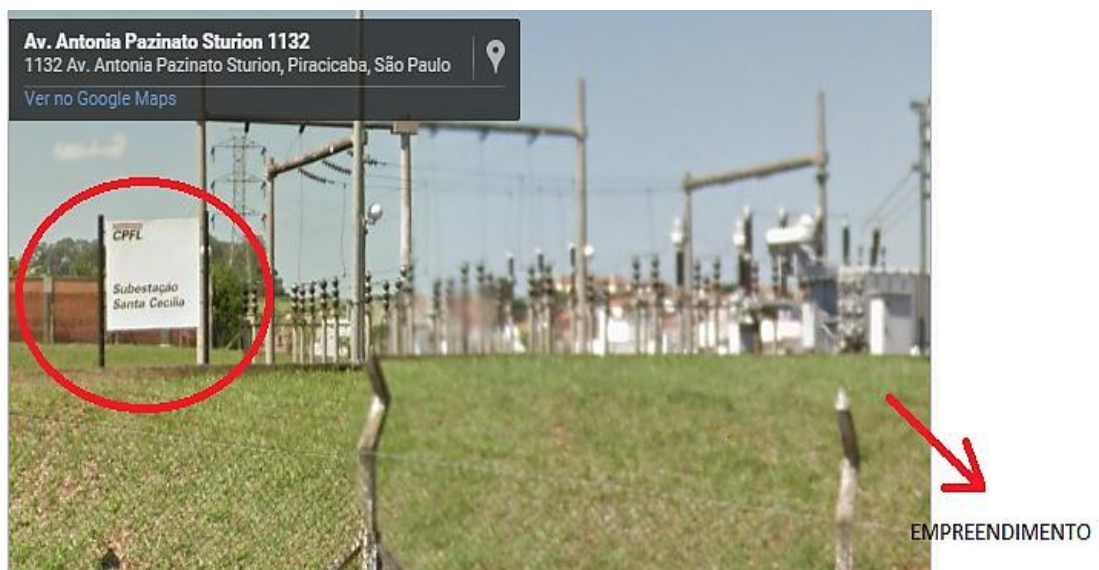


Figura 43: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba.

Destaque para a Subestação de Energia. **Fonte:** Google Earth Mapping Service

6.1.2. Telecomunicações

Para a realização dos testes considerou-se a existência de uma antena de telecomunicações dentro da área do Hospital da UNIMED e redes de dados sem fio. Além dessa possível fonte, não existem estações de telefonia celular no entorno imediato ou outra fonte de radiofrequência a considerar.



Figura 44: Imagem de satélite da Avenida Antonia Pazinato Sturion da cidade de Piracicaba. Destaque para o Hospital da UNIMED. **Fonte:** Google Earth Mapping Service

6.3. Calibração e análise das medições de campo energia

6.3.1. Calibração da antena

Como anteriormente feito, para a calibração da antena receptora do campo produzido pelo sistema de energia elétrica (campo energia) foi utilizada uma bancada com um variador de tensão (VARIAC) 0-250V, um transformador e uma bobina de ar, conforme figura 45. A corrente foi elevada em intervalos de a cada Amperes inteiros e foi analisada a resposta na saída sintonizada acoplada ao circuito receptor da antena. A bancada de calibração foi localizada a 1,60 metros da antena receptora.

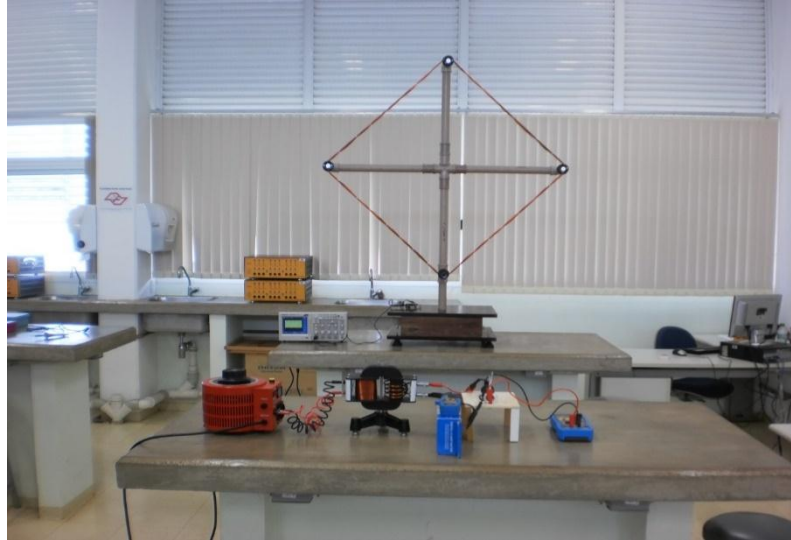
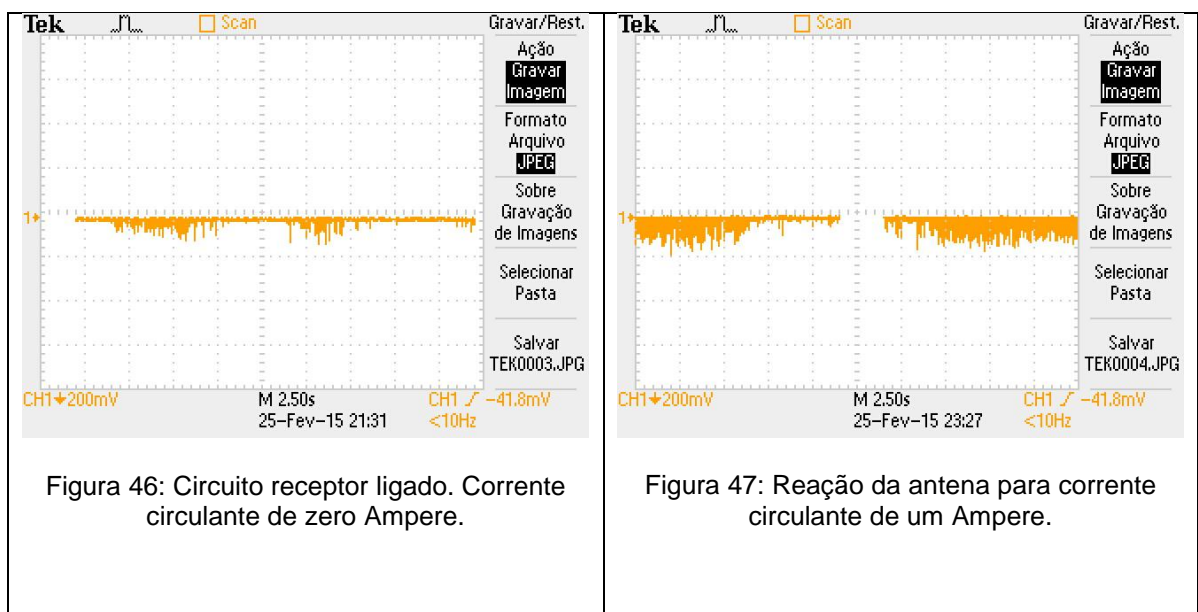


Figura 45: Bancada de calibração da antena receptora de energia.

6.3.2. Curvas de reação da antena durante calibração

A corrente de entrada foi variada a cada Ampere inteiro, com corrente máxima circulante de vinte Amperes. A reação correspondente da antena gerou sinais de saída bruta, conforme ilustrado nas Figuras de 46 a 51. Nesses casos, foram considerados 200 mV por divisão no osciloscópio, sem multiplicador associado à ponta de prova.



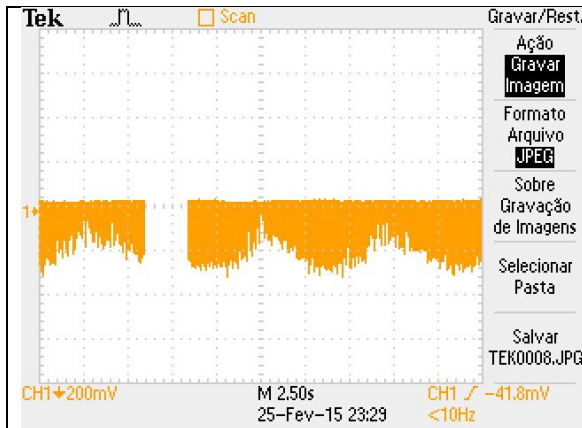


Figura 48: Reação da antena para corrente circulante de cinco Amperes.

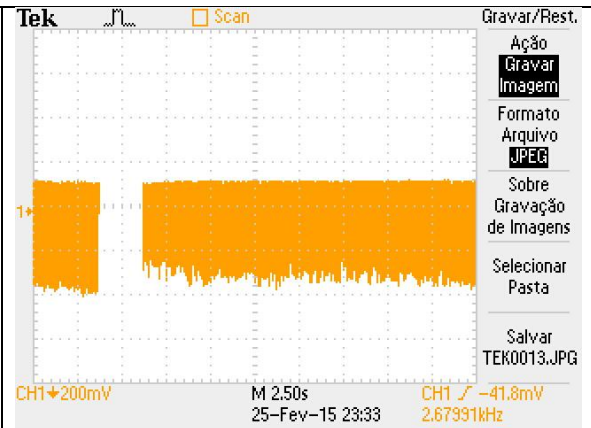


Figura 49: Reação da antena para corrente circulante de dez Amperes.

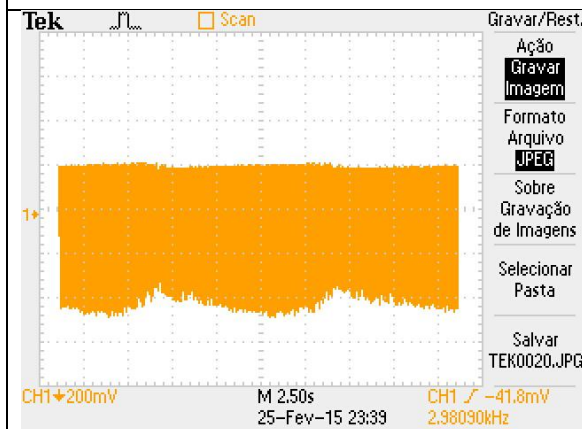


Figura 50: Reação da antena para corrente circulante de quinze Amperes

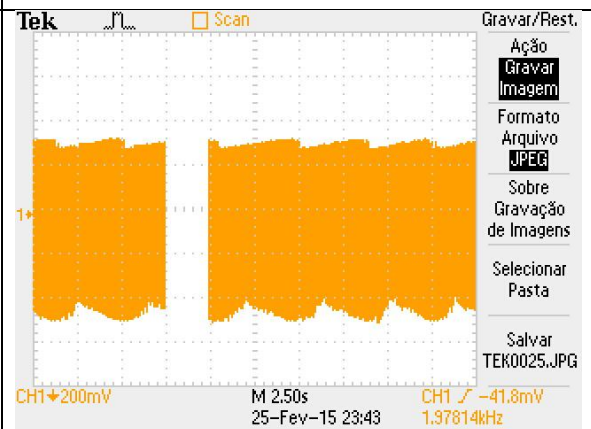


Figura 51: Reação da antena para corrente circulante de vinte Amperes

6.3.3. Pontos de medição do campo produzido pelo sistema de energia elétrica

Para o procedimento de medição do campo produzido pelo sistema de energia elétrica (campo energia), sob céu encoberto, foram considerados os pontos de medição de P1 a P13, ilustrados na figura 52.

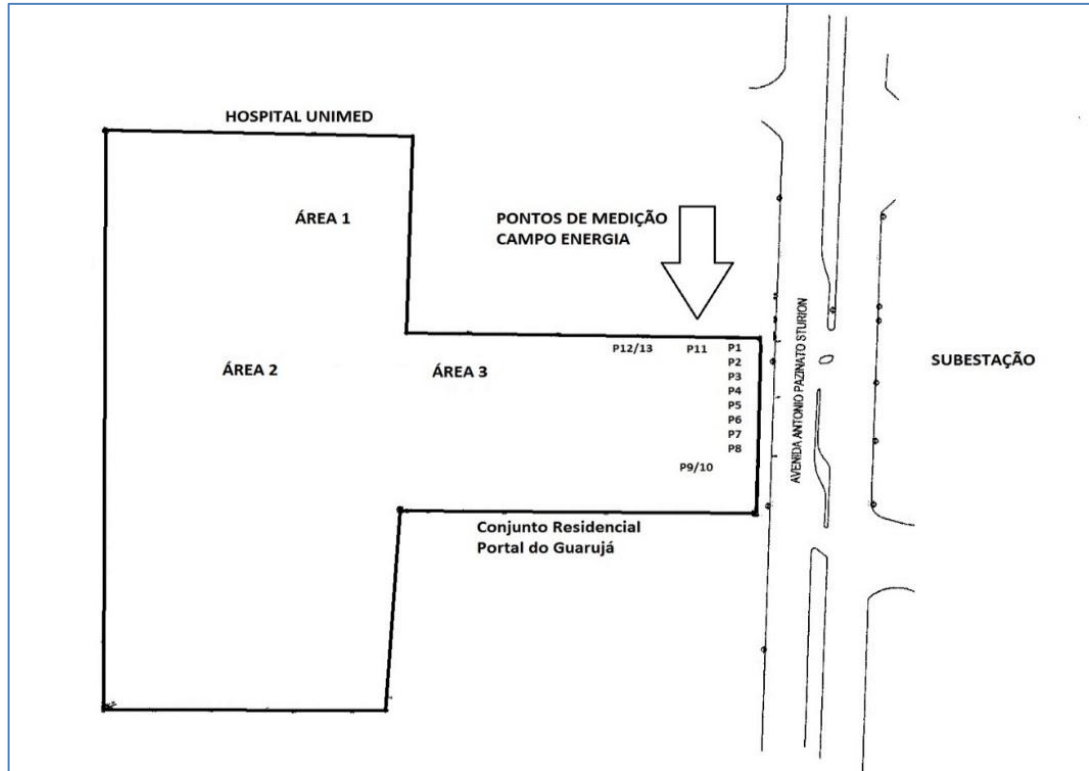


Figura 52: Identificação dos pontos de medição do campo energia

6.3.4. Curvas de medição do campo produzido pelo sistema de energia elétrica

O campo produzido pelo sistema de energia elétrica (campo energia) foi medido em diferentes pontos, conforme planta 1 (mostrada na figura 52), acompanhando o campo de ação da subestação em frente ao empreendimento. As figuras de 53 e 54 apresentam as curvas de medição e comprovações fotográficas.

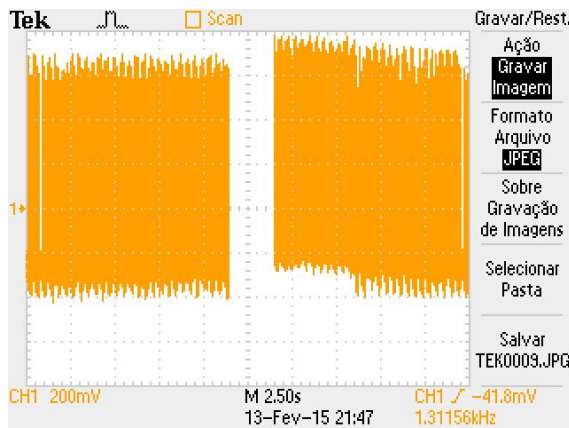


Figura 53: Ponto 9 de medição. Sinal observado no osciloscópio.



Figura 54: Ponto 9 de medição. Medição do campo energia.

6.3.5. Discussão sobre o campo produzido pelo sistema de energia elétrica

Em relação ao campo produzido pelo sistema de energia elétrica (campo energia), foram identificadas duas direções majoritárias de forte influência de emissões eletromagnéticas externa ao empreendimento. A primeira, já esperada, provém da Subestação Santa Cecília, com influência direta em toda a fachada do empreendimento, voltada para a Avenida Antonia Pazinato Sturion, conforme a Figura 55, a seguir.

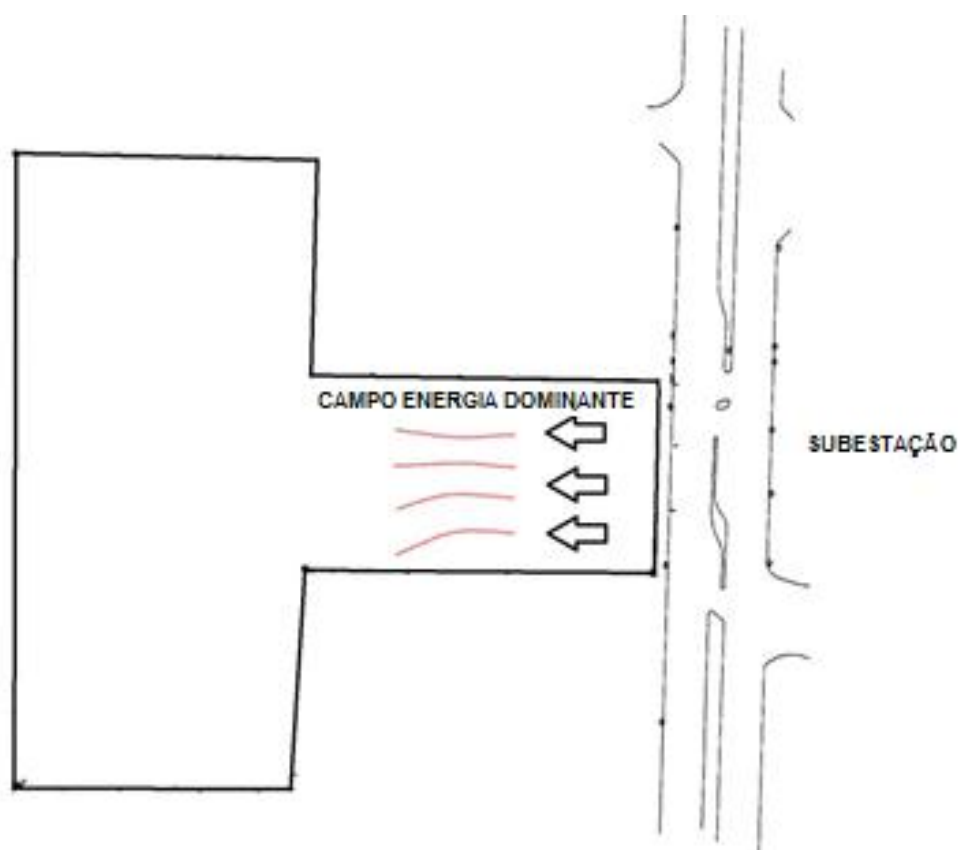


Figura 55: campo energia dominante

Durante a bateria de medições, foi identificada a influência de outra fonte externa de campo energia, secundária, com intensidade considerável, na direção perpendicular ao plano da antena. A figura 56 mostra o mapeamento do campo identificado nessa condição.

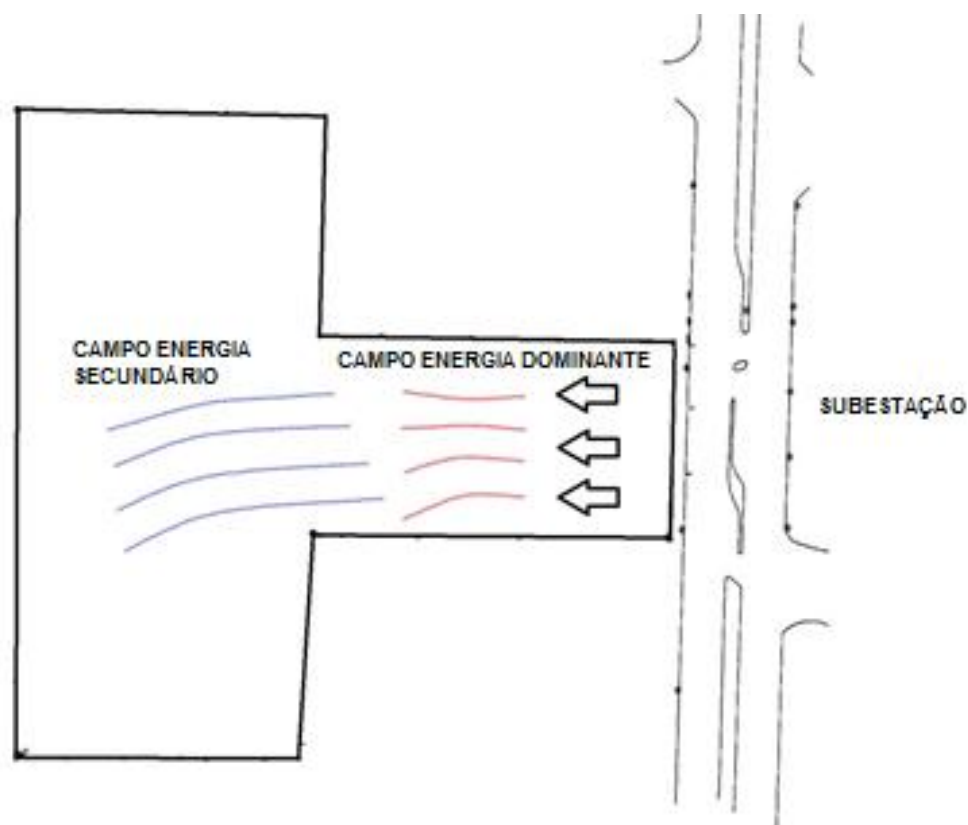


Figura 56: Campo energia relevante secundário

Uma investigação do entorno pela equipe de medição revelou a presença do Centro Cultural e Recreativo Cristóvão Colombo - Clube CCRCC, na direção da segunda fonte de EMI detectada. Assim, recomenda-se que sejam tomadas precauções de projeto tanto com relação à fachada do empreendimento quanto em relação à interface com o Clube CCRCC.

6.3.6. Áreas de medição do campo telecomunicações

O Campo Telecomunicações foi medido em diferentes pontos, conforme figura 57, acompanhando o campo de ação do Hospital da UNIMED.

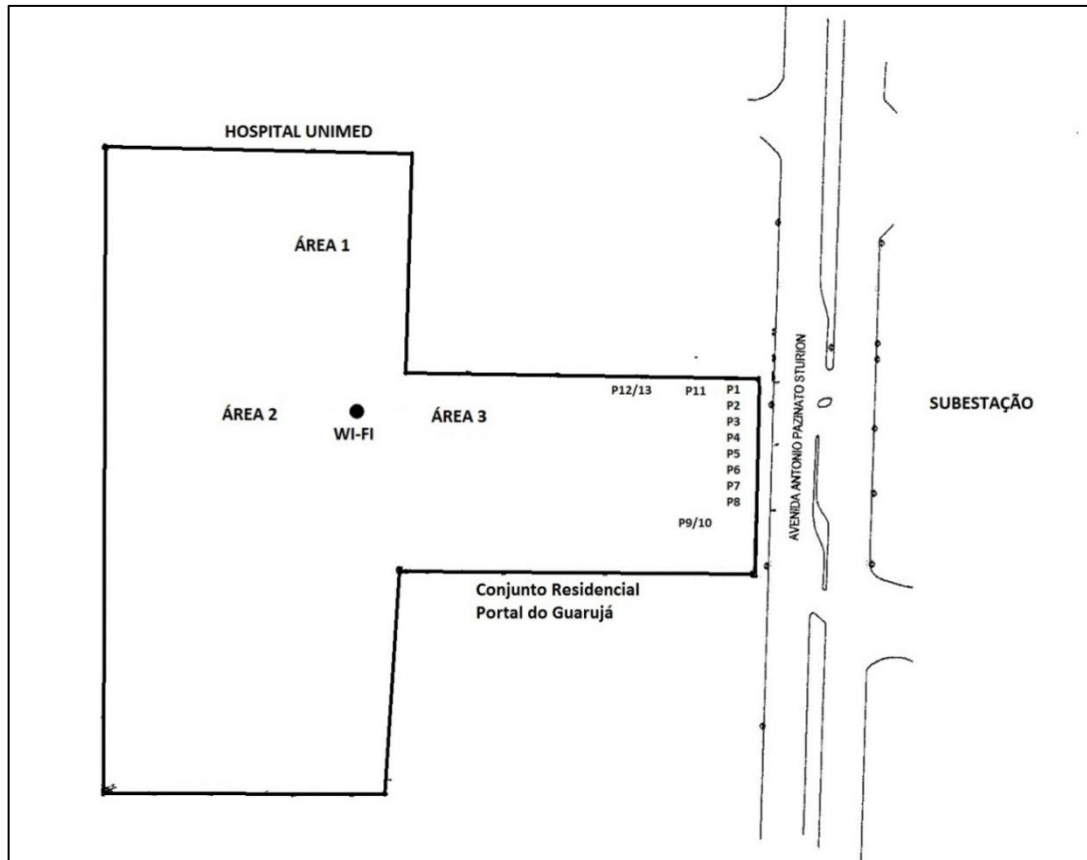


Figura 57: Identificação das áreas de medição do campo telecomunicações

6.3.7. Medição do campo telecomunicações

A medição do campo telecomunicações é feita através da cobertura temporária de uma rede Wi-Fi IEEE 802.11GHz na região de estudo. Três *hardwares* (celulares) foram conectados a uma rede portátil e foram direcionados aos pontos de medição. O Campo foi aferido com o levantamento da potência em dBm dos *hardwares* e em seguida foram feitas transformações para encontrar a energia emitida pela conexão. Os valores obtidos com a medição estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11. Medição do campo telecomunicações

Energia absorvida em Joules		
Área 1	Área 2	Área 3
3,27e-8	1,12e-7	1,19e-6

As figuras 58 a 60 caracterizam as áreas de medição do Campo Telecomunicações, onde a figura de 58 é correspondente à Área 1, a figura 59 é correspondente à Área 2, e a figura 60 é correspondente à Área 3.



Figura 58: Área 1. Encostado ao muro do Hospital da UNIMED.



Figura 59: Área 2. Em direção do declive do terreno



Figura 60: Área 3. Em direção da Subestação

6.3.8. Discussão campo Telecomunicações

Em relação ao campo Telecomunicações, não foram identificadas alterações significativas em relação à propagação e espalhamento típicos de uma região urbana com as características do empreendimento. Assim, as maiores preocupações nesse quesito devem estar centradas na mitigação da geração de interferência eletromagnética nessa frequência em direção ao Hospital da UNIMED.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou o estudo das emissões de campos eletromagnéticos em edificações urbanas, tendo, como fatores de motivação, a busca da sustentabilidade de edificações, a investigação de certificações que avaliam o desempenho ambiental no que tange às emissões eletromagnéticas e a preocupação com fatores de saúde humana.

Especificamente nesse sentido, foram investigadas as fontes de emissão eletromagnéticas dos denominados “campo energia” (com frequência em torno de 60 Hz) e “campo telecomunicações” (com frequências na faixa entre 915MHz e 2.4GHz). Para tanto, foram apresentadas e validadas com medições em campo, metodologias de medição da emissão eletromagnética de edificações apresentadas ao longo da dissertação, com destaque para o desenvolvimento e sintonia de uma antena para captação do campo energia e da adaptação de um ponto de acesso comercial para medição do campo telecomunicações. Mais ainda, o trabalho também apresenta uma proposta de sensor para o monitoramento da eficiência energética de edificações, focando a busca da avaliação do desempenho ambiental, de baixo custo e de natureza não destrutiva em relação às instalações elétricas prediais. Consequentemente, em relação a esse sensor não destrutivo para o monitoramento da eficiência energética de edificações verifica-se que a arquitetura proposta pode ser facilmente utilizada nos requerimentos de eficiência energética. Assim, o método proposto permite uma evidência quantitativa da redução ou do aumento do consumo de energia dos circuitos da instalação, requerido pelas iniciativas de certificação ambiental para o aumento de eficiência de energia nas edificações.

Nesse ponto, em relação às principais certificações ambientais aplicáveis no país, é possível perceber que tanto o padrão AQUA quanto o padrão LEED têm em comum a preocupação da ideal utilização da água, o controle da emissão de gás carbônico, gestão de resíduos e conforto ao usuário. Por outro lado, o LEED foca sua liderança na sustentabilidade energética de edificações, enquanto o AQUA é mais generalista e tem como diferencial o pioneirismo nas tratativas de conforto humano voltado para as emissões de campos eletromagnéticos.

Em relação ao campo eletromagnético na faixa de telecomunicações (de 915 MHz a 2.4GHz), pode-se destacar a real viabilidade de estimar a energia associada aos campos provenientes de redes Wi-Fi padrão IEEE 802.11. Pelos resultados obtidos, pôde-se verificar que o corpo humano aparentemente absorve a energia proveniente das redes Wi-Fi IEEE 802.11 e, levando-se em conta essa premissa, pode-se esperar então que a quantidade de energia absorvida pelo corpo esteja diretamente relacionada com o tempo de exposição do mesmo.

Em relação à medição das fontes de emissão eletromagnética do campo energia (60 Hz), baseada na metodologia proposta, pode-se concluir que também foi possível verificar a presença efetiva de campos eletromagnéticos nos locais de medição.

Os resultados do trabalho permitem corroborar a importância de se desenvolver estudos capazes de localizar e mitigar a presença dos campos eletromagnéticos em ambientes construídos e propor soluções na tentativa de afastar eventuais pontos de emissão, considerados excessivos ou nocivos do ponto de vista da saúde, do convívio humano.

Como desenvolvimentos futuros deste trabalho, pode-se destacar a possibilidade de melhorias da antena de medição do campo energia, com a construção de novas geometrias. Também é possível citar o desenvolvimento da metodologia de medição do campo telecomunicações, utilizando-se de antenas direcionais. Cabe ainda salientar a necessidade do estudo sob novas frequências, a fim de aumentar o campo de conhecimento de emissões potencialmente malélicas ao corpo humano. Finalmente, ainda como possibilidade de desenvolvimento, pode-se também citar o aperfeiçoamento do sensor não destrutivo para monitoramento da eficiência energética de edificações, com o propósito de viabilizar a criação de novas aplicações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dias, R. (2011). Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade. In *Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade*. Atlas.
- [2] Pugliero, V. S. ; Coiado, L. C. ; Pimentel, L. L. ; Jacintho, A. E. P. G. A. ; Mota, Lia Toledo Moreira ; Mota, Alexandre de Assis . Overview of Certification Methodologies for Sustainable Constructions of Brazilian Buildings. *American Journal of Applied Sciences*, v. 12, p. 216, 2015.
- [3] Coiado, L., Mota, A., & Mota, L. (2015). Estimação da Energia de Campos Eletromagnéticos em Edificações pela Radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11. *SET-Revista de Radiodifusão*, 9(10).
- [4] Mota, L. T. M., Mota, A. D. A., & Coiado, L. C. (2015). Non-Destructive Current Sensing for Energy Efficiency Monitoring in Buildings with Environmental Certification. *Sensors*, 15(7), 16740-16762.
- [5] Souza C.H.C., Illanes C.M.R., Bohadana IPB, Coelho L.C., Rodrigues L.T., Prudente L.T., Zanin N.Z., Santi S., Costa F.C., Ecker V.D. **Reference Center for Sustainable Buildings in urban areas: design for the headquarters of the Friends of the Earth**. In: IV and II Latin American Meeting on Sustainable Buildings and Communities, 2007.
- [6] Lordsleem A.C., Silveira A.M., Oliveira B.G., Pires G.H. and Takewaga W.C. **Implementation, Monitoring and Actions for Waste Management: The Experience in construction site of the City of São Paulo**. In: XI Brazilian Meeting of Technology in the Built Environment, 2006.
- [7] Silva V.G., Silva GM, Agopyan V. **Assessment of buildings in Brazil: environmental assessment to sustainability assessment** (in portuguese). *Revista Ambiente Construído*, i. 3, n. 3, p. 7-18, jul./set. 2003. ISSN 1415-8876.
- [8] Silva V. G. **Sustainability assessment of office buildings in Brazil: guidelines and methodological basis**. PhD Thesis, University of São Paulo. Department of Civil Engineering. 210 pp, 2003 (retrieved 18.03.14, from http://www.fec.unicamp.br/~vangomes/Download_Tese).
- [9] Newsham, G. R., Mancini, S. Birt, B. J. **Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but...** *Energy and Buildings* Volume 41, Issue 8, August 2009, Pages 897-905, doi:10.1016/j.enbuild.2009.03.014.
- [10] Bodach, S., Hamhaber, J. **Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil**, *Energy Policy* Volume 38, Issue 12, December 2010, Pages 7898-7910 Special Section: Carbon Reduction at Community Scale, doi:10.1016/j.enpol.2010.09.009.
- [11] Fossati M. and Lamberts R. **Methodology for assessing the sustainability of building projects: the case of offices in Florianópolis**. In: XII Brazilian Meeting of Technology of the Built Environment, 2008.
- [12] Brito, A. C., Vittorino, F., Akutsu, M. **Environmental assessment of buildings**. São Paulo: Técnica, 2008. p 72-76.

- [13] Lee, W. L.; Burnett, J. **Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED**. Building and Environment, Elsevier, Volume 43, pages 1882–1891, 2008.
- [14] AQUA- ALTA QUALIDADE AMBIENTAL. Fundação Vanzolini. **Offices Buildings Technical Reference – AQUA Certification**. 2014 - Version 0. (retrieved 18.03.14, from <http://www.vanzolini.org.br>).
- [15] U.S. Green Building Council. **LEED for New Constructions & Major Renovations v. 2.2**. October, 2005. (retrieved 18.03.14, from <http://www.usgbc.org>).
- [16] P. Charith, et al. “Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of Things”. Wiley Online Library.
- [17] C.P.C. Marques. Identificação de ofensores via análise da sensibilidade de estações na vazão de redes IEEE 802.11, 2013.
- [18] F. J. Keller, et al. Física. Clemson University. Vol. 2, 1999.
- [19] _Pietrosemoli.”Wireless Networking in the Developing Word.Third Edition”, 2013.
- [20] Wines, J. *Green Architecture*, Taschen:Milan, Italy, 2000; 240p.
- [21] Brundtland, G. H. *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press:Oxford, United Kingdom, 1987; 398p.
- [22] United States Green Building Council - USGBC. Available online: <https://www.usgbc.org/LEED>. (accessed on 09/04/2015).
- [23] Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Available online: <http://www.breeam.org/offices.html>. (accessed on 09/04/2015).
- [24] CASBEE Certified Buildings. Available online: http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/certified_bldgs.htm. (accessed on 09/04/2015).
- [25] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - CSTB. NF Bâtiments Tertiaires Démarche HQE - Bureau et Enseignement, Paris, 2005.
- [26] Green Building Council Australia - GBCAUS. Available online: <http://www.gbcaus.org>. (accessed on 09/04/2015).
- [27] Procel Edifica. Available online: <http://www.procelinfo.com.br>. (accessed on 09/04/2015).
- [28] Donnelly, E.L. *Electrical Installation: Theory and Practice*. 3rd ed.; Nelson Thornes: Cheltenham, United Kingdom, 2014; 240p.
- [29] Hayt Jr., W.H.; Buck, J.A. *Engineering Electromagnetics*. 8th ed.; McGraw Hill: New York, USA, 2011; 608p.
- [30] Imielski, A. Electromagnetic field analysis of air-core current transformer. Doctoral Thesis, Polytechnic of L6dl, Poland, 1983 (in Polish).
- [31] Imielski, A.; Wasowicz, S. Mutual inductance coefficient of air-core transformers. *Archiv fiir Elektrotechnik*, 1988, Volume 71, 69—75. Available online: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01574041> (accessed on 07/04/2015).

- [32]Mota, L.T.M.; Mota, A.A. Load modeling at electric power distribution substations using dynamic load parameters estimation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2004, Volume 26, 805-811, doi:10.1016/j.ijepes.2004.07.002. Available online: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061504000924> (accessed on 07/04/2015).
- [33]Arduino. Available online: <http://arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno> (accessed on 07/04/2015).
- [34] Calculation Methods to Predict Energy Savings in Residential Buildings, Swedish Council for Building Research. Available online: http://www.ecbcs.org/docs/annex_03_calculation_methods.pdf. (accessed on 23/06/2015).
- [35]Ziai, N.; Measuring Building Performance. Available online: http://www.learningace.com/doc/5559449/bfd78b4dbf708a40d1fbcba34264c28a/measure_bldg_perf. (accessed on 23/06/2015).
- [36] Waddell C.; Kaserekar S. Solar gain and cooling load comparison using energy modeling software. Proceedings of SimBuild, New York, USA, 2010.
- [37]Catalina, T.; Virgone, J.; Blanco, E. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings*, 2008, Volume 40, 1825-1832.
- [38]Yik, F.; Burnett, J.; Prescott, I. Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods. *Energy and Buildings*, 2001, Volume 33, 151-166.
- [39]Yang, J.; Rivard, H.; Zmeureanu, R. On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks. *Energy and Buildings*, 2005, Volume 37, 1250-1259.
- [40]Smith, A.; Fumo, N.; Luck, R.; Mago, P. Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills. *Energy and Buildings*, 2011, Volume 43, 779-786.
- [41]Iddrisu, I.; Bhattacharyya, S. Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Volume 50, 513-530.
- [42]Emodi, V.; JinBoo, K. Sustainable energy development in Nigeria: Current status and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Volume 51, 356-381.
- [43]Suzer, O. A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs other major certification systems. *Journal of Environmental Management*, 2015, Volume 154, 266-283.
- [44]Schwartz, Y.; Raslan, R. Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. *Energy and Buildings*, 2013, Volume 62, 350-359.
- [45]Wong, S.; Abe, N. Stakeholders' perspectives of a building environmental assessment method: The case of CASBEE. *Building and Environment*, 2014, Volume 82, 502-516.
- [46]Nguyen B.; Altan H. Comparative review of five sustainable rating systems. *Procedia Engineering*, 2011, Volume 21, 376-386.

- [47]Hall M.; Geissler A.; Burger B. Two years of experience with a net zero energy balance – analysis of the Swiss MINERGIE-A® standard. *Energy Procedia*, 2014, Volume 48, 1282-1291.
- [48]Boyano A.; Hernandez P.; Wolf O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on EnergyPlus simulations. *Energy and Buildings*, 2013, Volume 65, 19-28.
- [49]Bidou D. The HQE approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2006, Volume 17, 587-592
- [50]Shayani R.; Oliveira, M. Proposed business plan for energy efficiency in Brazil. *Energy Policy*, 2013, Volume 61, 523-531.
- [51]Andolsun S.; Culp C.; Haberl, J.; Witte M. EnergyPlus vs DOE-2.1e: The effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. *Energy and Buildings*, 2012, Volume 52, 189-206.
- [52]Østergaard P. Comparing electricity, heat and biogas storages' impacts on renewable energy integration. *Energy*, 2012, Volume 37, 255-262.
- [53]Zhu L.; Hurt R.; Correa D.; Boehm R. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house. *Energy*, 2009, Volume 34, 1043-1053.
- [54]Costa A.; Keane M.; Torrens J.; Corry E. Building operation and energy performance: monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Applied Energy*, 2013, Volume 101, 310-316.
- [55]Marinakos V.; Doukas H.; Karakosta C.; Psarras J. An integrated system for buildings' energy-efficient automation: Application in the tertiary sector. *Applied Energy*, 2013, Volume 101, 6-14.
- [56]CSN Standard. Energy performance of buildings – impact of building automation, controls and building management. *EN 15232*, 2007.
- [57]The International Organization for Standardization (ISO). Win the energy challenge with ISO 50001, *ISO 50001*, 2011.
- [58]Song M.; Tang Y.; Zhou Y.; Ren L.; Chen L.; Cheng S. Electromagnetic Characteristics Analysis of Air-Core Transformer Used in Voltage Compensation Type Active SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, Volume 20, 1194-1198.
- [59] ABNT NBR 15415:2006. Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, outubro de 2006.
- [60] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa 398/2010. ANEEL: Brasília, 23 de março de 2010.
- [61] BUENO, Cristiane; ROSSIGNOLO, João Adriano. Desempenho ambiental de edificações: cenário atual e perspectivas dos sistemas de certificação. *Revista Minerva–Pesquisa & Tecnologia*, 7 (1), p. 45-52, 2010.
- [62]LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. 2ª edição. São Paulo: ProLivros, 2004.

[63] LEITE, Vinicius Fares. Certificação ambiental na construção civil–Sistemas LEED e AQUA. Belo Horizonte, 2011.

[64] MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. C. Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico e Energético de Edificações no Brasil. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.5, n.4, p. 47-68, out./dez. 2005.

[65] Worldwatch Institute. State of the world 2007: Our urban future. Washington, DC: Author, 2007.

9. PUBLICAÇÕES

PUGLIERO, V. S. ; COIADO, L. C. ; PIMENTEL, L. L. ; JACINTHO, A. E. P. G. A. ; MOTA, Lia Toledo Moreira ; MOTA, Alexandre de Assis . Overview of Certification Methodologies for Sustainable Constructions of Brazilian Buildings. American Journal of Applied Sciences, v. 12, p. 216, 2015.

MOTA, LIA ; MOTA, ALEXANDRE ; COIADO, LORENZO . Non-Destructive Current Sensing for Energy Efficiency Monitoring in Buildings with Environmental Certification. Sensors (Basel) **JCR**, v. 15, p. 16740-16762, 2015.

CARDOSO, J. M. M. ; BLENGINI NETO, A. ; COIADO, L. C. ; BEVILACQUA, A. ; MOTA, Lia Toledo Moreira ; MOTA, Alexandre de Assis ; PEZZUTO, C. C. ; CARVALHO, M. F. H. . Communications Delay and Energy Consumption in IEEE802.11 Network Stations. International Journal of Computer Science and Network Security, v. 18, p. 21-25, 2015.

COIADO, L. C. ; MOTA, Alexandre de Assis ; Mota, Lia . Estimação da Energia de Campos Eletromagnéticos em Edificações pela Radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11. SET EXPO PROCEEDINGS, v. 1, p. 21-23, 2015.

Original Research Paper

Overview of Certification Methodologies for Sustainable Constructions of Brazilian Buildings

Vanessa Silva Pugliero, Lorenzo Campos Colado, Lia Lorena Pimentel,
Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho, Lia Toledo Moreira Mota, Alexandre de Assis Mota

CEATEC, Pontifical Catholic University of Campinas, Brazil

Article history

Received: 20-02-2015

Revised: 22-04-2015

Accepted: 04-05-2015

Corresponding Author:

Alexandre de Assis Mota
CEATEC, Pontifical Catholic
University of Campinas, Brazil
Email: amota@puc-campinas.edu.br

Abstract: The terms “sustainable” and “environmentally-friendly” have been used in the construction industry field as a marketing appeal. The methodology to judge in which level a building is sustainable in Brazil is incipient, without orientation and hardly ever there is a diffusion of these methods inside Brazilian territory. Almost all developed countries have their appropriate certification methodology for sustainable constructions. Some of these methodologies could be adapted to developing countries. The aim of this work is to study the processes of environmental assessment in buildings that have been adapted in Brazil, comparing their parameters. Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) imported from the United States and Alta Qualidade Ambiental (AQUA) adapted from HQE-France. Both methodologies were imported and adapted to the reality of Brazilian construction. It can be concluded that both certification processes qualitatively evaluate the specified parameters, such as energy, water and waste management, among others and need to be adapted to the countries where they will be applied, considering their specific climate conditions and legislations.

Keywords: Energy Efficiency, Sustainability, Sustainable Technology

Introduction

The buildings, activities and transportation services within cities may contribute to climate change because it requires energy sources and large volume of raw materials. In a construction the principles of sustainability can be incorporated even if it is a project or if it is a building under construction. The rampant consumption of natural resources has been the cause that sustainability has not been used properly. It can be noticed as a result the greenhouse effect and waste production which have decreased people's quality of living (e.g., Souza *et al.* (2007)).

Several changes have been made by construction companies to add environmental value by developing new practices (e.g., Lordsleem *et al.* (2006)). In the 1970s, with the oil crisis, several countries were forced to find alternatives to meet the energy demand. The sustainable plan in building constructions started by targeting the reduction of waste production, consumption of non renewable resources and energy consumption.

The concept of life cycle analysis required the development of methodologies for the evaluation of

constructions. This fact forced countries to the environmental performance of constructions in the early 1990 s, mainly in Europe and North America (e.g., Silva *et al.* (2003)).

The evaluation of sustainable constructions helps the builders to achieve the required performance for the buildings with the least possible ecological damage, taking into account social, cultural and economical improvement in local, regional and global levels (e.g., Silva (2003)).

On average, LEED buildings use 18-39% less energy per floor area than their conventional counterparts. Green buildings can contribute with substantial energy savings, but further work needs to be done to define green building rating schemes to ensure more consistent success at the individual building level (e.g., Newsham *et al.* (2009)).

Researches conducted by (Bodach and Hamhaber, 2010) have shown a high potential to increase energy efficiency in social housing in emerging countries like Brazil. The implementation and analysis of energy efficiency measures and policy recommendations can contribute dramatically to the goal to dampen the rapid growth of energy demand in these countries.

Sustainable buildings use wisely natural resources (materials, water and energy) to provide comfort to the users, reducing costs over the lifetime of the building. These buildings also minimize the changes in the environment which they are placed. The first point to consider, when dealing with this type of construction, is that the concerns should start from the initial stages of planning and design and should continue during the construction, operation and maintenance stages. The design of the building is an important step for constructors to discuss integrated solutions to achieve high performance of the building throughout its useful life, considering the environmental, social and economical resource management factors and material specification. The introduction of the sustainability mechanisms in a building can represent to the project a lot of environmental changes inside the sector of civil construction in order to adapt the building to sustainability affording up the development opportunities for the sector (e.g., Fossati and Lamberts (2008)).

Each system of environmental certification of buildings has its predominant features and specific requirements for performance (e.g., Brito *et al.* (2008)).

Many methods for environmental certification were developed, starting in the 90's when it became necessary to compare them so that the architects and engineers could have a better foundation for the development of sustainable projects. Lee and Burnett (2008), related sixty buildings and compared the evaluation on parameters of energy through the certification methods HK-BEAM, BREEAM and LEED concluding that the difference in methods of assessing energy use, landmark buildings, simulation tools and performance criteria do not affect the evaluation results and buildings that had excellent energy performance in HK-BEAM, BREEAM and LEED are among the best 5% of the market.

Certifications Methodology for Sustainable Constructions

AQUA

The methodology Alta Qualidade Ambiental (AQUA) or High Environmental Quality (HEQ) were imported from Haute Qualité Environnementale (HQE) France to Brazil. AQUA has four big categories such as "Green-construction", "Green-management", "Comfort" and "Health".

The methods of AQUA are based on quantities (evaluation of methods, measurements, calculations) and qualitative (descriptions of the measurement adopted) elements.

AQUA has no scope for application of certification regarding to the use and occupancy of the building. In

the certification guide there are some factors that help achieving environmental performance after the delivery of a building. The technical reference for this certification is based on the SGE (Enterprise Management System) which assesses the environmental management system by the company and defines the QAE (Environmental Quality of Development) that measures the technical performance and architectural construction (e.g., FV (2014)).

AQUA evaluates the building through four categories with subdivisions as shown in Table 1.

Category 1 "Relation of the building with its surroundings" can receive a positive evaluation when the building has an easy access for buses, bicycles and cars. Categories 4 and 5 are met when specified electrical equipment and economic toilet in order to reduce energy and water consumption respectively.

The sixth category "Waste management" is met when the construction site is poorly organized avoiding losses of packaging materials, which is fundamental for selective garbage collection and its proper disposal and the possibility of recovery of waste in the work itself.

For families "Health", "Sanitary quality of the air" and "Sanitary quality of the environment" categories the parameters to achieve the certification change depending on the different types of buildings. Nowadays there are technical references for three types of buildings: "Office and School Buildings", "Hotels" and "Residential Buildings".

LEED for New Construction V.2.2

The LEED program imposes six categories for buildings with credits and sub-credits with a pre-established number. There are categories with prerequisites that must be complied. There is a simple certification when the building received between 26 points and 32 points; between 33 and 38 points it obtains the silver certification; between 39 and 51 points it obtains gold certification and between 52 and 69 points it obtains the platinum certification.

The first category is "Sustainable Sites". It has a prerequisite and more than fourteen subcategories such as "Site Selection", "Development Density and Community Connectivity", "Alternative Transportation", "Brownfield Redevelopment", "Site Development", "Heat Island Effect", "Light Pollution Reduction" and "Storm water Design". This first category affords 14 points to a building at a total and the prerequisite "Construction Activity Pollution Prevention" must be accomplished.

The second category is Water Efficiency. It has three main credits including "Water Efficient Landscaping", "Innovative Wastewater Technologies" and "Water Use Reduction". This category does not have prerequisites and affords five points to a building at a total.

Table 1. Categories evaluated by AQUA

Family	Category	Description
Eco-construction	1	Relation of the building with its surroundings
	2	Choice of products, systems and construction processes
	3	Building site with low environmental impact
Eco-Management	4	Energy management
	5	Water management
	6	Waste management use and operation of the building
	7	Maintenance-Permanence of environmental performance
Comfort	8	Hygrothermal comfort
	9	Acoustic comfort
	10	Visual comfort
	11	Olfactory comfort
Health	12	Sanitary quality of the environment
	13	Sanitary quality of the air
	14	Sanitary quality of water

The third category is "Energy and Atmosphere" that has three prerequisites: "Fundamental Commissioning of the Building Energy Systems", "Minimum Energy Performance" and "Fundamental Refrigerant Management" and the credits are "Optimize Energy Performance", "On-Site Renewable Energy", "Enhanced Commissioning", "Enhanced Refrigerant Management", "Measurement and Verification" and "Green Power". This category affords 17 possible points to a building.

The fourth category is "Material and Resources" that has one prerequisite ("Storage and Collection of Recyclables") and other seven credits such as "Building Reuse", "Materials Reuse", "Recycled Content", "Regional Materials", "Rapidly Renewable Materials" and "Certified Wood". This category adds 13 possible points to a building.

The fifth category is "Indoor Environmental Quality" that has two prerequisites ("Minimum IAQ Performance" and "Environmental Tobacco Smoke (ETS) Control"). The credits are "Outdoor Air Delivery Monitoring", "Increased Ventilation", "Construction IAQ Management Plan", "Construction IAQ Management Plan", "Low-Emitting Materials", "Indoor Chemical and Pollutant Source Control", "Controllability of Systems", "Thermal Comfort" and "Daylight and Views" Adding 15 possible points to a building.

The sixth category has no prerequisites and opens opportunities to constructor to implement sustainable increments to the construction. There are four subcategories about "Innovation in Design" and "LEED Accredited Professional" to divulgate the LEED's Certification (e.g., USGBC (2005)).

Comparison between Aqua and LEED V2.2

Surroundings

The AQUA requests to create drainage to control the floods, to manage nuisance from the construction site such as waste and noise and to ensure access of neighborhood at landscape. The construction should influence the least possible in the existing situation on site before the construction of the building. On the other

hand, LEED requests the reduction of soil sealing, reduction of light pollution at night and the heat island effect and remediation of degraded areas.

Indoor

The AQUA's methodology proposes that the indoor ventilation system does not suffer interferences from generating economy and comfort. It also proposes to ensure the quality of collected rainwater, to sanitize waste storage sites and equipment that may come into contact with them. The LEED methodology proposes the control of gases emissions and cigarette smoke (the suggestions are to prohibit smoking in the building except in designated smoking areas, to allow this activity in areas at least 8 meters away from buildings entries), the easy control of lighting and thermal systems, to provide visibility at exterior of the building, to quantify the savings for equipment and to improve the energy performance of building by reducing the building dependence of the electrical energy network over time.

Environmental Quality

The AQUA methodology stimulates less polluting transport, the use of renewable energy, the preservation of ecosystems; the building needs an infrastructure to collect, to limit, sort and dispose the final waste in a safely and hygienic way. The LEED certification requires easy accessibility to the collector of recyclable waste not dangerous; to reduce car dependency; to use alternative fuels; to reduce 50 or 100% of the potable water consume for irrigation (the reuse of rainwater is a possible solution to potable water reduction); not building on sites high ecological importance and to protect the natural resource.

Building Materials and Maintenance

The LEED certification encourages the use of recycled materials in the pre and post-occupancy; the reuse of walls, floors and roofs; to prefer regional materials and certified wood; to choose products CFC-free or that collaborate with

global warming or to pose risks to human health as paints, carpets, adhesives and sealants. The AQUA methodology aims to select products that support the environment, durability, comfort, health and economy of water and energy; to choose products with easy maintenance and accessibility and repairs them regularly.

Tables 2 and 3 show the parameters of the AQUA and LEED v2.2 methodologies separated into groups relating to the construction site management, waste management and choice of products indicating the goals of each methodology in the evaluation process.

Certification Process

The AQUA certification tends to improve the certification process to the extent that the enterpriser reports the environmental performance desired and the performance achieved by SGE and the Vanzolini Foundation concludes the certification of the building through the qualitative parameters. On the other hand, LEED Version 2.2 has 69 credits equivalent to 69 points, there is no weight with the credits although there is more concentration of points in one category than another to

complete final certification. The builder can innovate its topics of certification.

Electromagnetic Field

The concern about electromagnetic pollution in buildings was pioneered by AQUA certification process. In the technical document for buildings under construction, the behavioral aspects concerning electromagnetic emissions are presented. These characteristics are not directly related to the built environment, but instead in better equipment utilization and good practices, focused on electromagnetic field issues (FV, 2014).

In telecommunications systems sections, the concern about electromagnetic radiation generated by the Wi-Fi networks and regular phones is reported, mainly for wireless IT networks, considering its fast growth recently.

In the electrical power system, the main concern is fluorescent lighting. The certification indicates to building users to maintain a safe distance of these lamps, but lacks the specification of this minimum distance. Table 4 synthesizes the best practices to avoid electromagnetic fields in AQUA certification.

Table 2. Comparison of management on several issues, comparing the merits of the AQUA and LEED NC v2.2

	AQUA	LEED NC v2.2	Objectives
Construction site management	<ul style="list-style-type: none"> >Choice of products, systems and processes >The construction sites with low environmental impacts >acoustic comfort >Comfort olfactory 	<ul style="list-style-type: none"> > Air quality plan 	<p>AQUA: Manage noise pollution and waste at the construction site</p> <p>LEED: Attend to the issues that may present health risks, reuse of existing building materials</p>
Waste management	<ul style="list-style-type: none"> >_The building and its surroundings >Waste management in use and operation of the building >_Quality of health environments 	<ul style="list-style-type: none"> > Deposit and collected of recyclable materials > Reuse of materials >_Construction Waste Management >Recycled Content 	<p>AQUA: Collection infrastructure, limitation, sorting and disposal of waste safely and hygiene.</p> <p>LEED: Easy access to the collector of recyclable waste, reuse walls, ceilings and roofs to repair and reform activities, maintaining non-structural elements of the interior of the building, waste destined for reuse, recover and reuse materials on site. Encourage the use of recycled pre and post occupancy.</p>

Table 3. Comparison of choice of products in several issues, comparing the methods AQUA and LEED v2.2

	AQUA	LEED NC v2.2	Objectives
Choose products	<ul style="list-style-type: none"> >_Choice of products, systems and processes >Energy management > Maintenance >Comfort hygrothermal > acoustic comfort > visual comfort >Comfort olfactive >Quality of health environments > Air Quality Health > Quality sanitary water 	<ul style="list-style-type: none"> > Island Effect Reduction > Disuse CFCs* > Improving the Use of Refrigerant Gases > Low-emitting materials (paints, carpets, adhesives and sealants and composite wood and agrofibras) >Control of Pollutants and chemicals > Reuse of materials > Recycled Content > Regional Materials > Materials Quick Renewal > Certified Wood 	<p>AQUA: Products that support the environment, durability, comfort and health</p> <p>LEED: Use products that reduce heat absorption and do not put CFCs into the atmosphere, not to collaborate with global warming. Reusing existing building materials and encourage the use of recycled pre and post occupancy. Give preference to local products and are from renewable raw materials. Use certified wood</p>

Table 4. Information about best practices to avoid electromagnetic fields in AQUA certification

AQUA	
Electromagnetic field	<ul style="list-style-type: none"> > Avoid the use of compact fluorescent lamps and table lamps (keep a safe distance from the lamp). > Turn off wireless networks (Wi-Fi) and electrical appliances when not in use. > Regular phones with DECT technology for ECO mode, if available. > Prioritize the use of appliances that generate the lowest possible magnetic field



Fig. 1. Electromagnetic radiation antenna prototype

At Pontifical Catholic University of Campinas (PUC-Campinas), recent research developments in the area resulted in an antenna prototype that is able to measure the electromagnetic magnetic field emitted from sources that operate at low frequencies (in the range of 60 Hz). This antenna has been used in the Brazilian AQUA certification context, to measure the magnetic field in the vicinity of buildings. Figure 1 illustrates the antenna developed for this purpose.

Conclusion

Both AQUA and LEED methodologies include sustainable parameters at building with some differences. These methodologies need to be adapted to the countries where they will be applied, considering their specific climate conditions and legislations.

Both certification processes evaluate qualitatively the specified parameters, such as energy, water and waste management, among others. The main difference between LEED and AQUA is the emphasis given to these parameters. One can observe that both systems evaluated parameters are similar though divided into different categories. The LEED certification requires

differentiated score between the parameters and some of them should be compulsorily met, while the AQUA methodology allows you to choose which parameters will be fulfilled.

All criteria for both certifications must be adapted to building, being aware if one parameter does not interfere negatively in the other one. Nowadays, there are specific certifications of AQUA and the LEED to each kind of building according to their future occupation. The certificated buildings can be recognized by its commitment with social, economic and environmental questions.

Acknowledgment

The authors would like to thank CNPq and the Pontifical Catholic University of Campinas for the financial support to this work.

Author's Contributions

Vanessa Silva Pugliero: Was the main responsible for the global bibliographic revision about Certification Methodologies for Sustainable Constructions of Brazilian Buildings and contributed to the writing of the manuscript.

Lorenzo Campos Colado: Was the main responsible for the topic Electromagnetic Field and contributed to the writing of the manuscript.

Lia Lorena Pimentel and Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho: Coordinated the work and contributed to the writing of the manuscript.

Lia Toledo Moreira Mota and Alexandre de Assis Mota: Organized the comparison between AQUA and LEED certification methodologies and the topic about electromagnetic field and contributed to the writing of the manuscript.

Ethics

This article is original and contains unpublished materials. The corresponding author confirms that all of the other authors have read and approved the manuscript and no ethical issues involved.

References

- Bodach, S. and J. Hamhaber, 2010. Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Energy Policy*, 38: 7898-7910. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.09.009.

- Brito, A.C., F. Vittorino and M. Akutsu, 2008. Environmental assessment of buildings. *Téchne*, São Paulo.
- Fossati, M. and R. Lamberts, 2008. Methodology for assessing the sustainability of building projects: The case of offices in Florianópolis. Proceedings of the 12th Brazilian Meeting of Technology of the Built Environment (TBE'08).
- FV, 2014. AQUA-ALTA QUALIDADE AMBIENTAL. Fundação Vanzolini. Management Reference-AQUA Certification.
- Lee, W.L. and J. Burnett, 2008. Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED. *Build. Environ.*, 43: 1882-1891.
- Lordsleem, A.C., A.M. Silveira, B.G. Oliveira, G.H. Pires and W.C. Takewaga, 2006. Implementation, Monitoring and Actions for Waste Management: The Experience in construction site of the City of São Paulo. Proceedings of the 11th Brazilian Meeting of Technology in the Built Environment, (TBE'06).
- Newsham, G.R., S. Mancini and B.J. Birt, 2009. Do LEED-certified buildings save energy? *Energy Build.*, 41: 897-905.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.03.014
- Silva, V.G., 2003. Sustainability assessment of office buildings in Brazil: Guidelines and methodological basis. PhD Thesis, University of São Paulo.
- Silva, V.G., G.M. Silva and V. Agopyan, 2003. Assessment of buildings in Brazil: Environmental assessment to sustainability assessment (in portuguese). *Revista Ambiente Construído*.
- Souza, C.H.C., C.M.R. Illanes, I.P.B. Bohadana, L.C. Coelho and L.T. Rodrigues *et al.*, 2007. Reference center for sustainable buildings in urban areas: Design for the headquarters of the Friends of the Earth.
- USGBC, 2005. LEED for new constructions and major renovations v. 2.2. U.S. Green Building Council.

*Article***Non-Destructive Current Sensing for Energy Efficiency Monitoring in Buildings with Environmental Certification****Lia Toledo Moreira Mota, Alexandre de Assis Mota * and Lorenzo Campos Coiado**

Pontifical Catholic University of Campinas, CEATEC, Campus I, Rod. Dom Pedro I, Km136, CEP 13086-900, Campinas, São Paulo, Brazil; E-Mails: lia.mota@puc-campinas.edu.br (L.T.M.M.); lorenzo.coiado@gmail.com (L.C.C.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: amota@puc-campinas.edu.br; Tel.: +55-19-3343-7009.

Academic Editor: Vittorio M.N. Passaro

Received: 16 April 2015 / Accepted: 6 July 2015 / Published: 10 July 2015

Abstract: Nowadays, buildings environmental certifications encourage the implementation of initiatives aiming to increase energy efficiency in buildings. In these certification systems, increased energy efficiency arising from such initiatives must be demonstrated. Thus, a challenge to be faced is how to check the increase in energy efficiency related to each of the employed initiatives without a considerable building retrofit. In this context, this work presents a non-destructive method for electric current sensing to assess implemented initiatives to increase energy efficiency in buildings with environmental certification. This method proposes the use of a sensor that can be installed directly in the low voltage electrical circuit conductors that are powering the initiative under evaluation, without the need for reforms that result in significant costs, repair, and maintenance. The proposed sensor consists of three elements: an air-core transformer current sensor, an amplifying/filtering stage, and a microprocessor. A prototype of the proposed sensor was developed and tests were performed to validate this sensor. Based on laboratory tests, it was possible to characterize the proposed current sensor with respect to the number of turns and cross-sectional area of the primary and secondary coils. Furthermore, using the Least Squares Method, it was possible to determine the efficiency of the air core transformer current sensor (the best efficiency found, considering different test conditions, was 2%), which leads to a linear output response.

Keywords: non-destructive method; current sensor; energy efficiency; energy consumption; air-core transformer; building certification

1. Introduction

The international concern about the shortage of environmental resources dates from 1970, when international conventions took place with the goal of slowing down natural resource consumption [1]. Among these conventions, one can cite the United Nations Conference on the Human Environment that occurred in Stockholm in 1972. Later, other conferences took place around the world with the same objective as, for example, the Vienna Convention for Ozone Layer Protection in 1985, the Montreal Protocol in 1987, the United Nations Conference on Environment and Development—ECO'92 in 1992, the United Nations Conference in 1996 and the Kyoto Protocol in 1997.

The concept of “sustainable development” was firstly introduced in 1987 by the UN (United Nations) and emphasized that all development must respond to actual demands without shorting future generations' capability of satisfying their own necessities [1–3]. This concept was directly applied to the construction industry, as defined in the Second United Nations Conference on Human Settlements (Habitat II) held in Istanbul in 1996. Since this conference, the European construction industry began considering the concept of sustainable development for buildings and some regulations and standards emerged in France (RT 2000), Switzerland (Minergie), and Germany (Habitat Passivo) [4,5].

The European Commission (EC) adopted, in 2006, a plan with the objective of reducing energy consumption in 20% by 2020. This plan is called “Action Plan for Energy Efficiency” and is supported by directives. In this context, the EPDB (Directive of Energy Performance of Building) enabled the development of some standards regarding energy calculation methods in buildings. An example of these standards is the standard EN 15232 “Energy Performance of Buildings—Impact of Building Automation, Control, and Building Management” [6], which presents methodologies for assessing/calculating the influence of building automation and of technical building management on the buildings' energy consumption. Besides, the standard ISO 50001 “Energy Management Standard” permits organizations (as industrial plants, institutional, commercial, and governmental facilities) to establish the requirements and systems that are necessary to improve energy performance [7].

Nowadays, many countries are producing standards and regulations aiming for the application of the sustainable development concept to buildings. Some of these countries (for example, France, Germany, Switzerland, Japan, Mexico, Australia, USA, and Canada) already have their own environmental certification systems that consider some sustainability criteria. Among these certification systems, one can cite: LEED (Leadership in Energy and Environmental Design, from USA) [8–10], BREEAM and ECOHOMES (BRE Environmental Assessment Method, from the United Kingdom) [10–12], CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency, from Japan) [10,13,14], HQE (Haute Qualité Environnementale des Batiments, from France) [15] and GREEN STAR (from Australia) [10,16].

In Brazil, the concept of sustainable development is also applied to civil industry using building certification systems. These systems, which are the focus of this work, correspond to LEED and to AQUA (High Environmental Quality) which is based on HQE from France [17].

Furthermore, since 1970, the world energy industry has been changing due to the oil crises and to environmental pressures. Thus, in recent decades, there was a great incentive to use renewable energy sources and also to draft laws with the objective of protecting the environment, besides the launching of programs that encourage the reduction of electricity consumption. Regarding the Brazilian construction sector, there was, in 2001, the development and the regulation of Law number 10.295 [18], determining the creation of mechanisms for the development of more efficient buildings (from the energy consumption/generation point of view). After years of work involving various institutions, a standard for energy efficiency in buildings was regulated. This standard corresponds to the regulations for voluntary labeling of energy efficiency levels in commercial, service, and public buildings. This regulation classifies buildings based on their energy efficiency level and is founded on three main requirements, according to a government program named Procel Edifica. These requirements are: efficiency and installed capacity of the lighting system; efficiency of the air-conditioning system, and thermal performance of the building envelope [18,19].

Both LEED and AQUA certifications as well as Procel Edifica labeling process embolden the implementation of initiatives aiming to increase energy efficiency in buildings to be built and their operation. Therefore, the use of renewable energy sources, such as wind power and solar energy (photovoltaic panels and solar collectors) and the use of automation (in order to reduce the electric energy consumption) are encouraged. Moreover, the use of cogeneration systems and technical innovations or systems (as natural lighting, for example) is also promoted [9,10,18].

In these certification systems, increased energy efficiency arising from such initiatives must be demonstrated (proved) so that the building in question can receive the score points (related to these initiatives) scheduled in these certification systems. As an example, for Procel Edifica program, the heating water must prove compliance to 70% of solar fraction; wind or photovoltaic energy should provide a minimum savings of 10% in annual energy consumption; and the cogeneration and the technical innovations or systems that increase the energy efficiency of building systems must have a minimum savings of 30% of annual electricity consumption [18,19].

Currently, this verification is carried out using simulation software, simulation methods, and forecasting methods for the different environmental certification systems [20–26]. In this context, reference [20] presents calculation methods that are able to predict energy savings in residential buildings; and reference [23] presents regression models in order to predict the heating demand for residential buildings on a monthly basis. In [24], the authors use different heat rejection methods to predict the energy consumption of air-conditioning systems and reference [25] uses an artificial neural network to predict the energy in buildings. Reference [26] estimates energy profiles of buildings with similar characteristics using the software EnergyPlus and reference [12] presents a case study regarding building energy simulation tools and their impact on ratings of the environmental certification systems BREEAM and LEED. In [27], the authors present case studies using the EnergyPlus simulation software to estimate potential savings and energy demands in European office buildings. In this regard, other simulation software options are also widely used, such as DOE-2, Energy10, Micropas6, and EnergyPro, among others [28–30].

These methods have as a common characteristic the fact that they are based on models and approximate representations of the actual conditions of the building. Consequently, the results provided by them can lead to invalid conclusions regarding evidence of increased energy efficiency.

Thus, a challenge to be faced is to prove, by measuring, the actual increase on the building's energy efficiency that arises from these initiatives. More specifically, the problem to be dealt with is how to quantify the increase in energy efficiency related to each of the employed initiatives. For instance, in the example cited before, the problem is how to measure if the installed photovoltaic panels provided a minimum savings of 10% in annual energy consumption, or how to measure that the lighting automation system (and the consequent use of natural light) caused a minimum savings of 30% of the annual electricity consumption.

Within this context, there are also methodologies that address the optimization of energy consumption in buildings [31], considering data measured in the buildings. Regarding that, integrated building automation systems can be used, for example, to control air-conditioning (HVAC), ventilation, heating, and lighting systems [31,32]. As an example, reference [32] presents an integrated system for the simulation and optimization of energy consumption in buildings (industrial, residential, public and commercial buildings), intending to enhance the interactivity of building automation systems. The described integrated software tool provides control and automation of different systems (heating, cooling, lighting, air conditioning, and ventilation) aiming to increase energy efficiency according to the energy efficiency requirements of EN 15232 and ISO 50001 [6,7].

It is important to emphasize that the simulation tool proposed in [32] uses data directly measured in the building, including the electrical quantities. However, the common devices adopted to measure these values usually require physical intervention on the building's electrical installation. This means that, in order to apply this methodology to a building already in operation, it is necessary to physically cut off the circuit conductors under analysis, resulting in the need for reforms.

In this context, in order to properly quantify the increase on energy efficiency that is directly related to the previously mentioned initiatives, it is necessary (a) to measure the energy consumption (or power generation, if applicable) related to each of the employed initiatives, in an easy, efficient way and at low cost implementation; and (b) to take into account that for buildings that are already in operation, the measurements that need to be carried out must be made causing the least possible impact on the building, avoiding significant reforms and consequent financial costs. In this context, this work aims to present a non-destructive method for current sensing in low voltage circuits that allows the evaluation of power consumption/generation in the distributed circuits along the building, based on data that are directly measured from the circuits under analysis. Thus, it makes it possible to assess in detail the initiatives implemented to increase energy efficiency in buildings with environmental certification without retrofitting and with low costs.

This paper is organized as follows. Section 2 describes the non-destructive method and the current sensor proposed in this work, besides the tests that were carried out to characterize the proposed sensor. Section 3 presents the results of this characterization tests and also of the amplifying/filtering stage. Finally, Section 4 presents the main conclusions of this work.

2. Experimental Section

The following sections present the non-destructive method, the sensor proposed in this work and the tests carried out aiming the sensor's characterization.

2.1. Power and Energy Evaluation

As previously mentioned, this paper presents a non-destructive method to evaluate initiatives to increase energy efficiency in buildings with environmental certification. In this context, this method proposes the use of a sensor that can be installed directly in the electrical circuit conductors that are powering the initiative in question, without the need for reforms that result in costs and maintenance.

It is assumed that by knowing (a) the current flowing in the circuit under consideration (measured using the sensor proposed here); and (b) the terminal voltage of this circuit (which is known since it corresponds to the circuit nominal voltage), it is possible to determine the circuit's energy consumption/generation by using Equations (1) and (2) [33]:

$$P = V \times I \quad (1)$$

$$E = \int_{t1}^{t2} P(t) dt \quad (2)$$

where P is the power demanded by the circuit, measured in Watts [W]; V is the circuit voltage, measured in Volts [V] (that is known), and I is the circuit current, measured in Amperes [A], which is measured with the aid of the proposed sensor and the proposed non-destructive method; E corresponds to the energy consumption/generation of the circuit under analysis, from time $t1$ to time $t2$, in Watts x hours [W × h].

Based on the calculated circuit energy consumption/generation, one can determine whether the initiative for increasing energy efficiency achieved its goals. Using the examples previously cited, for Procel Edifica program, from the calculation of this power generation, one can assess whether the implementation of the photovoltaic generation system resulted in savings of at least 10% in the building annual energy consumption; or from the determination of the lighting circuit (or circuits) power consumption, one can check if there was a decrease of at least 30% of electricity consumption associated to lighting, due to the implementation of lighting automation systems (and consequent increased use of natural light). It is important to emphasize that the objective of this work is not to verify the efficiency of the implementation of these initiatives, but to present the non-destructive method and the sensor to be used for this purpose.

The following item presents the sensor used for measuring the current flowing in the circuit to be analyzed in the context of the non-destructive method.

2.2. Proposed Sensor

The proposed sensor consists of three elements: a current sensor that corresponds to a transformer with an air core with concentric primary and secondary coils, using the low voltage conductors already installed in the building without interrupting or cutting them; a low cost electronic amplifying/filtering stage; and a general use microprocessor (Arduino) [34], as can be seen in Figure 1.

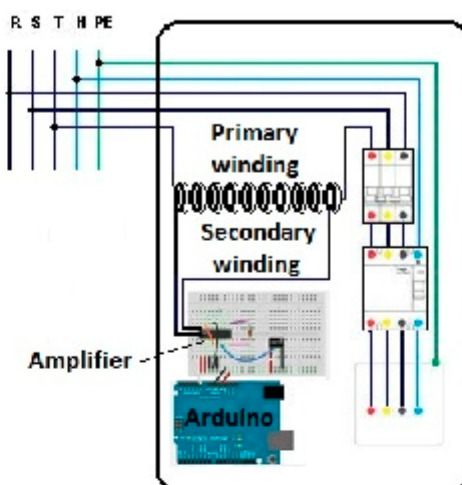


Figure 1. Proposed sensor installed within the switchboard of a building.

2.2.1. Air-Core Transformer

The proposed current sensor is an air-core transformer [35] with concentric primary and secondary coils (concentric solenoids). Air-core transformers are normally used at radio frequencies, when iron core losses are too high. For lower frequencies, other core materials are preferred as, for example, powdered iron or ferrite [36,37]. Despite the fact that the proposed sensor was developed to be used in low-frequency applications (electric power distribution systems that operate at 50 Hz or 60 Hz), its core is constituted of air. This can be explained by the fact that the proposed sensor is used within a non-destructive method. The idea is that the monitoring of the current of a circuit (and the subsequent calculation of the energy consumed or generated by it) can be done without the need for reforms in the building, directly in the building switchboard or inside power plug boxes, without physically cutting the circuit under analysis. In this context, the primary coil of the transformer is formed with the same conductor of the circuit under analysis. Thus, the use of an air-core transformer as a current sensor is justified by the fact that the use of a ferromagnetic core (commonly adopted in low frequency applications) would not enable the installation of the sensor without physical intervention on the building switchboard or plug boxes.

In this work, the primary and the secondary coils have the same radius ($R_1 = R_2$), the same length ($L_{g1} = L_{g2}$) and the same number of turns ($N_1 = N_2$), as illustrated in Figure 2. It is important to emphasize that the primary number of turns is equal to the secondary number of turns, and in this work, this number varies according to the test performed (5, 10, and 15 turns).

One of the conductors of the circuit under consideration corresponds to the primary coil of the transformer. The transformer secondary coil is wound with the primary coil (so that both coils are concentric) within the switchboard of the electrical installation of the building, as previously shown in Figure 1.

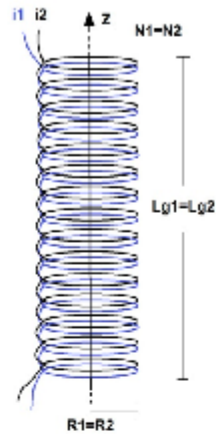


Figure 2. Concentric solenoids.

The current of the circuit under analysis flows in the primary of the transformer (I_f) and induces a current in the secondary coil of the transformer (I_s) which is then measured. Since there is a mathematical relation between these two currents, it is possible to determine I_f based on I_s .

In an ideal transformer, the magnetic flux produced by the secondary winding of the transformer is given by

$$\phi_2 = (M_{12} \times I_1 + L_2 \times I_2) \quad (3)$$

where ϕ_2 is the magnetic flux produced by the secondary of the transformer, M_{12} is the transformer mutual inductance, L_2 is the inductance of the secondary, I_1 e I_2 are, respectively, the primary and the secondary currents.

In this work, due to the adopted air-core transformer specific geometry, the magnetic flux generated in the primary coil is not fully concatenated by the transformer secondary coil, having a significant impact in the results, as shown in Figure 3. In this figure, the circle with an inner dot represents the primary coil current “coming out” of the x-y Cartesian plane and the circle with an inside cross represents the primary coil current “entering” the x-y Cartesian plane. The crosses represent the conductors of the secondary coil. The arrows indicate the magnetic flux produced by the primary coil. It is possible to observe that a significant part of the generated magnetic flux does not trespass the secondary turns and, consequently, is not concatenated by the secondary coil.

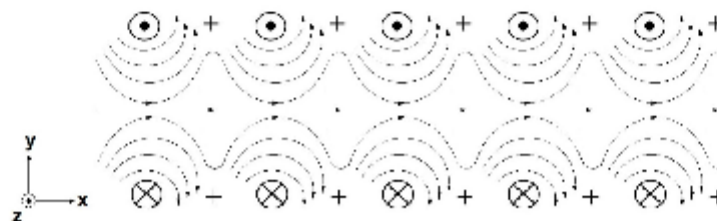


Figure 3. Magnetic flux that is not concatenated by the transformer secondary coil.

Considering this situation, where the transformer is not ideal, Equation (3) can be rewritten as [34]

$$\phi_2 = \eta \times (M_{12} \times I_1 + L_2 \times I_2) \quad (4)$$

where η can be understood as the efficiency of the air-core transformer.

The voltage at the transformer secondary is given by

$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} \quad (5)$$

For the secondary under a short-circuit condition (situation in which the tests were carried out in this work, as detailed in Section 3), it is possible to write

$$V_2 = \frac{d\phi_2}{dt} = 0 \quad (6)$$

Thus

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{d[\eta \times (M_{12} \times I_1 + L_2 \times I_2)]}{dt} = 0 \quad (7)$$

or

$$-\eta \times M_{12} \times \frac{dI_1}{dt} = L_2 \times \frac{dI_2}{dt} \quad (8)$$

The currents I_1 and I_2 correspond to sinusoids, according to Equations (9) and (10) respectively

$$I_1(t) = A \times \sin(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

$$I_2(t) = B \times \sin(\omega t + \delta) \quad (10)$$

where A and B correspond to the amplitudes of the currents I_1 and I_2 , respectively; φ and δ correspond to the angular phase shift of currents I_1 and I_2 respectively; ω is the angular frequency which is a constant and is equal to $(2\pi f)$ and f corresponds to the electric power system operating frequency (in the case of Brazil, 60 Hz).

So

$$\frac{dI_1(t)}{dt} = A \times \omega \times \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

$$\frac{dI_2(t)}{dt} = B \times \omega \times \cos(\omega t + \delta) \quad (12)$$

Equation (8) can be rewritten, in module, as

$$\left| -\eta \times M_{12} \times \frac{dI_1}{dt} \right| = \left| L_2 \times \frac{dI_2}{dt} \right| \quad (13)$$

or

$$\eta \times M_{12} \times \left| \frac{dI_1}{dt} \right| = L_2 \times \left| \frac{dI_2}{dt} \right| \quad (14)$$

But

$$\left| \frac{dI_1}{dt} \right| = \frac{A \times w}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

$$\left| \frac{dI_2}{dt} \right| = \frac{B \times w}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Consequently

$$\eta \times M_{12} \times \frac{A \times w}{\sqrt{2}} = L_2 \times \frac{B \times w}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Thus

$$B = \frac{\eta \times M_{12} \times A}{L_2} \quad (18)$$

But

$$L_2 = \frac{\mu_0 \times N_2^2 \times \pi \times R_2^2}{Lg_2} \quad (19)$$

where μ_0 is the magnetic permeability of vacuum (adopted as the magnetic permeability of air); N_2 is the number of secondary windings; R_2 is the radius of the secondary coil and Lg_2 is the length of the secondary coil [34].

The mutual inductance can be expressed by:

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \times N_1 \times N_2 \times \pi \times R_1^2}{Lg_1} \quad (20)$$

As previously mentioned, in this work $N_1 = N_2$, $R_1 = R_2$ and $Lg_1 = Lg_2$. Thus

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \times N_2^2 \times \pi \times R_2^2}{Lg_2} = L_2 \quad (21)$$

Therefore, Equation (18) can be rewritten as

$$B = \frac{\eta \times L_2 \times A}{L_2} = \eta \times A \quad (22)$$

In this work, the magnitude of the secondary induced current can be written as

$$|I_2| = |I_i| = \frac{B}{\sqrt{2}} \quad (23)$$

and the magnitude of the current flowing in the primary can be written as

$$|I_1| = |I_f| = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (24)$$

Thus, Equation (22) can be rewritten as

$$|I_i| = \eta \times |I_f| \quad (25)$$

This means that the relation between the current measured by the proposed sensor (I) and the current flowing in the circuit under analysis (I_f) can be defined by as a straight line, given by the well-known equation:

$$y = a \times x \quad (26)$$

where y and x correspond respectively to the output (I) and input (I_f) of the system under analysis; and the parameter “ a ”, which is the slope of the line, is the transformer efficiency (η), to be determined.

The transformer efficiency (η) can be determined from the application of the Least Squares Method (LSM), widely spread in the literature [38]. In this method, the inputs and outputs of the system under analysis are represented as vectors, and the parameter of the model can be determined using Equation (27)

$$\eta = \left[(\hat{I}_f)^T \times (\hat{I}_f) \right]^{-1} \times (\hat{I}_f)^T \times (\hat{I}_i) \quad (27)$$

Thus, by determining the value of η (using Equation (27)) and measuring I_i (using the proposed sensor), it is possible to determine the current flowing in the circuit under analysis (I_f), using Equation (25).

Finally, after the measurement of I_i is performed, it can be amplified, filtered and transmitted to a microprocessor where the AC circuit's consumed or generated energy can be calculated. The steps of amplification/filtering, and the microcontroller use are described in the following items.

2.2.2. Amplifying/Filtering Stage

The current I_i that is measured in the secondary coil of the transformer is, then, amplified and filtered with the aid of an electronic circuit that is illustrated in Figure 4. This circuit has an amplifier stage and a filtering stage that use the LM318 operational amplifier. The expected output thus varies in the range of 0–3 V for input currents in the range of 0–30 A.

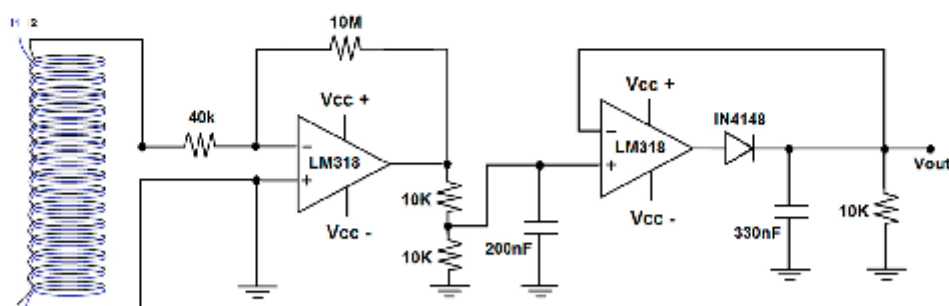


Figure 4. Electronic circuit of the amplifying/filtering stage connected to the current sensor (air-core transformer).

2.2.3. Microcontroller

The microcontroller board used in this work is the Arduino Uno, which is based on ATmega328 microcontroller. It has 14 digital input/output pins and six analog inputs [39]. This board is able to

process the information related to the measured values of I_1 that come from the amplifying/filtering stage and can determine the energy consumption/generation, according to Equations (1) and (2). Figure 5 illustrates the prototype of the complete experimental sensor, integrating air core transformer coils, electronic circuit and microcontroller board.

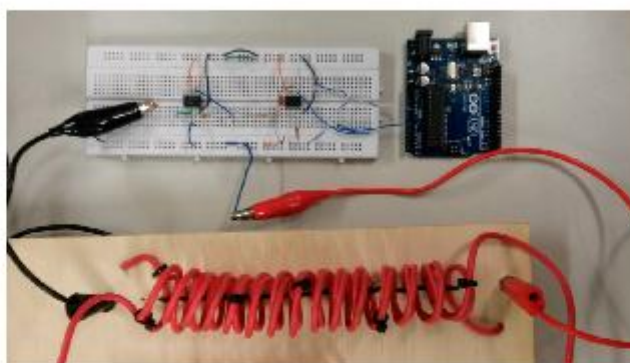


Figure 5. Prototype of the proposed sensor.

2.3. Laboratory Tests Description

Laboratory tests were carried out with the objective of characterizing the proposed current sensor (air-core transformer with concentric secondary and primary coils). Figure 6 illustrates the test bench used to characterize the sensor.

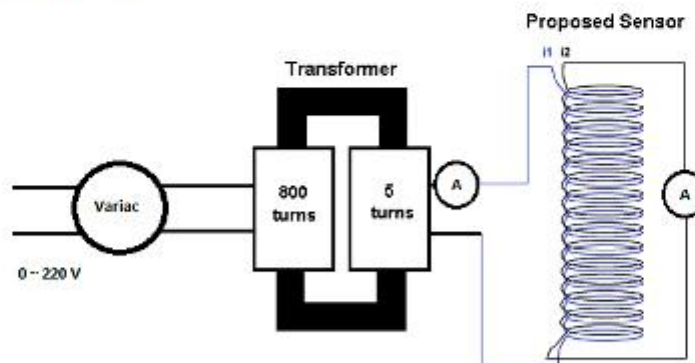


Figure 6. Electrical diagram of the test bench used in the current sensor characterization tests.

In this figure, the conductor that energizes the circuit under analysis (that must prove an increase of energy efficiency) is the primary coil of the transformer (that forms the proposed sensor). Consequently, as described in the previous section, the current flowing in the circuit under consideration (I_1) is the current flowing through the transformer primary coil. The current flowing through the secondary of the transformer is the current that is induced in the secondary coil (I_2) and which is effectively measured by

the proposed sensor. The primary of the transformer is fed by a source of alternating voltage (Variac) connected to another power transformer (with turns ratio of 800:5 or 160:1) which allows the primary current I_f to assume *a priori* established values (measured with the aid of an ammeter). In this test, I_f values varied between 1 A and 30 A. For each value of I_f , the corresponding value of I_i was measured (in the transformer secondary that was short-circuited) with the aid of another ammeter.

This test was first conducted with the coils of the primary and secondary of the proposed sensor consisting of a copper conductor with cross-sectional area of 2.5 mm^2 . The coils were formed with 5, 10, and 15 turns. Subsequently, this procedure was repeated for copper conductors with cross-sectional areas of 4 mm^2 and 6 mm^2 .

Afterwards, the complete experimental sensor was tested, in order to verify its output voltage response as the primary coil current varied. The results of all tests are described in Section 3.

3. Results and Discussion

As previously mentioned, the proposed current sensor consists of two concentric solenoids with equal radius ($R_1 = R_2$), equal length ($L_{g1} = L_{g2}$) and equal number of turns ($N_1 = N_2$), as illustrated in Figure 2. In this work, tests were carried out considering conductors with different cross-sectional areas. The characteristics of the concentric solenoids for conductors of 2.5 mm^2 , 4 mm^2 , and 6 mm^2 are presented in Table 1. Figure 7 shows the test bench implemented to perform the sensor characterization tests. In this figure, one can observe the proposed sensor (two concentric coils with air core) and the equipment for performing these tests, as previously shown in Figure 6.

Table 1. Characteristics of the concentric solenoids for conductors of 2.5 mm^2 , 4 mm^2 and 6 mm^2 .

	5 Turns	10 Turns	15 Turns
Internal radius (m)	0.01	0.01	0.01
Length (m)	0.05	0.10	0.15

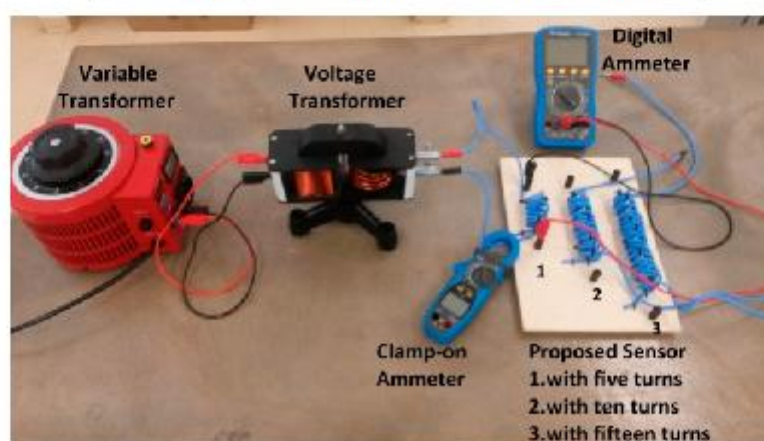


Figure 7. Test bench for the sensor characterization.

The results from these tests are presented as follows for conductors with cross-sectional areas of 2.5 mm^2 , 4 mm^2 , and 6 mm^2 , considering situations with number of turns of the primary and secondary equals to 5, 10, and 15.

3.1. Influence of Number of Turns

As previously mentioned, the current sensor was developed to be applied in buildings that are already in operation, without the need for reforms and with rapid and low cost implementation. So, the use of this sensor is physically limited by the actual conditions of the switchboard, which already contains other circuit elements (sockets, protection devices, *etc.*). Thus, it was assumed, in this work, that these conditions impose limitations on the maximum and minimum number of turns (of the current sensor) that can be practiced in the field, considering the integration with conventional meters or with the Building Automation System (BAS). Thus, it is important to check the influence of the number of turns in the sensor's induced current and, in order to reach this goal, this work considers actual installation conditions. Consequently, the influence of the number of turns was tested for a minimum of 5 turns and a maximum of 15 turns. The sensor configuration was also tested with 10 turns to broaden its characterization analysis.

Figure 8 shows the values of I_f (set) and I_i (measured) for the conductor of 2.5 mm^2 with 5, 10, and 15 turns.

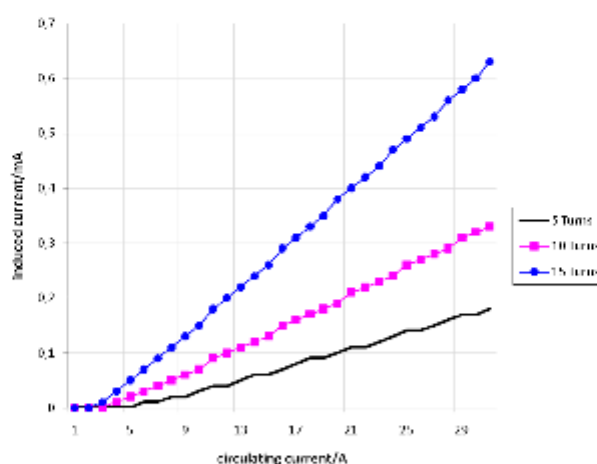


Figure 8. I_f versus I_i for the conductor of 2.5 mm^2 with 5 turns (black), 10 turns (pink), and 15 turns (blue).

Figure 9 shows the values of I_f (set) and I_i (measured) for the conductor of 4 mm^2 with 5, 10, and 15 turns.

Figure 10 shows the values of I_f (set) and I_i (measured) for the conductor of 6 mm^2 with 5, 10, and 15 turns.

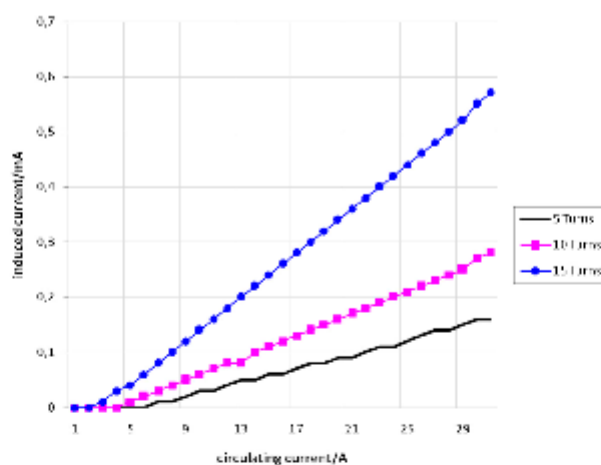


Figure 9. I_f versus I_i for the conductor of 4mm² with 5 turns (black), 10 turns (pink), and 15 turns (blue).

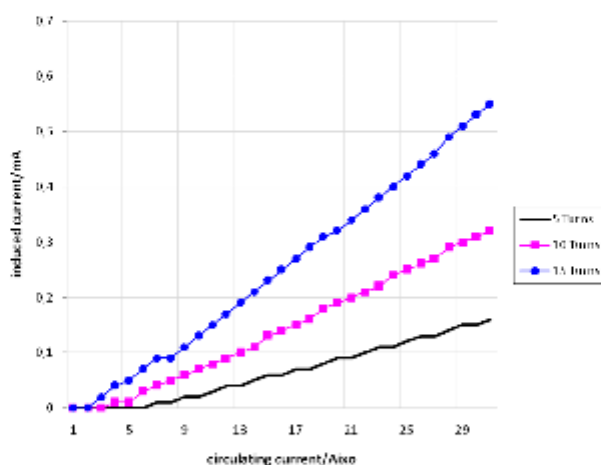


Figure 10. I_f versus I_i for the conductor of 6mm² with 5 turns (black), 10 turns (pink), and 15 turns (blue).

From Figures 8–10 it is possible to see that the relation between I_f and I_i is approximately linear. It is also possible to conclude that for a same value of I_f , the value of I_i increases according to the increase in the number of turns. This fact can be explained using Equation (28)

$$\phi_1 = \frac{\mu_0 \times N_1 \times I_f \times A}{Lg1} \quad (28)$$

where ϕ_1 is the magnetic flux produced by the primary coil, μ_0 is the vacuum magnetic permeability (that was considered as the air magnetic permeability), N_1 is the number of turns of the primary coil,

I_f is the flowing current (or circulating current) in the primary coil, A is the cross-sectional area of the magnetic perimeter and Lg_1 is the length of the primary coil. The induced current (I_i) in the secondary current is proportional to ϕ_1 . So, if N_1 increases, ϕ_1 increases and, consequently, I_i increases.

3.2. Influence of Conductors Cross-Sectional Area

As discussed in Section 3.1, three base cases were adopted for the tests involving the number of turns (5, 10, and 15 turns), considering the operational conditions of an actual electrical installation. Similarly, to verify the influence of the conductor's cross-sectional area in the sensor's induced current, some practical aspects, related to the electrical conductor that forms the sensor's coils, must be considered.

In Brazil, the conductors that are most commonly used in low voltage electrical installations usually have standard cross-sectional areas of 1.5 mm², 2.5 mm², 4 mm², 6 mm², and 10 mm². Among these, conductors of 1.5 mm² are exclusively employed in lighting circuits. The conductors of 2.5 mm², 4 mm², and 6 mm² represent more than 90% of the conductors used in built environments. Thus, it was considered appropriate to carry out experimentations using coils formed with the most representative cross-sectional areas conductors (2.5 mm², 4 mm², and 6 mm²), considering the three different number of turns that were previously adopted (5, 10, and 15 turns).

Figure 11 shows the relation between I_f (set) and I_i (measured) for primary and secondary coils with 5 turns, using conductors of 2.5 mm², 4 mm², and 6 mm².

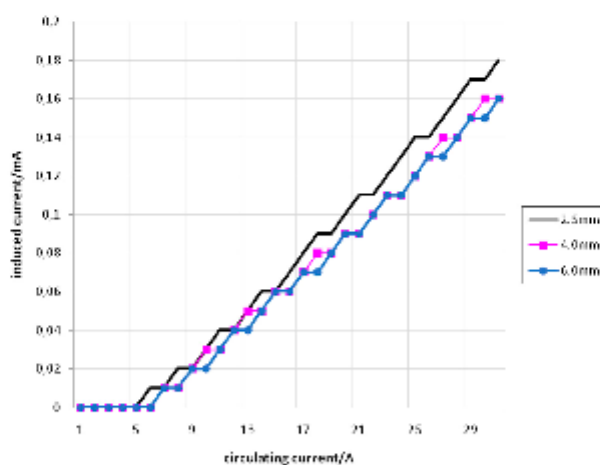


Figure 11. I_f versus I_i for 5 turns with conductors of 2.5 mm² (black), 4 mm² (pink) and 6 mm² (blue).

Figure 12 shows the relation between I_f (set) and I_i (measured) for primary and secondary coils with 10 turns, using conductors of 2.5 mm², 4 mm², and 6 mm².

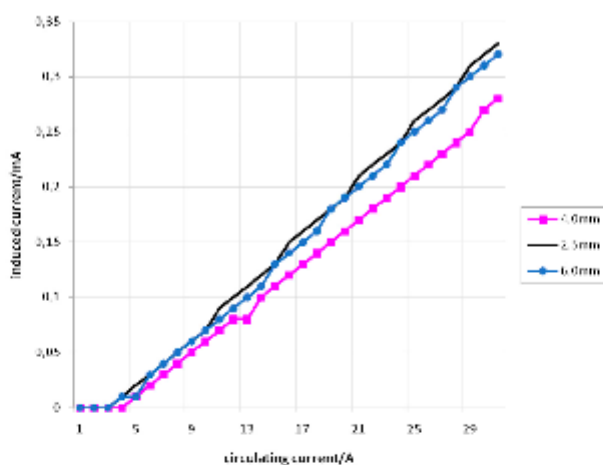


Figure 12. I_f versus I_i for 10 turns with conductors of 2.5 mm^2 (black), 4 mm^2 (pink), and 6 mm^2 (blue).

Figure 13 shows the relation between I_f (set) and I_i (measured) for primary and secondary coils with 15 turns, using conductors of 2.5 mm^2 , 4 mm^2 , and 6 mm^2 .

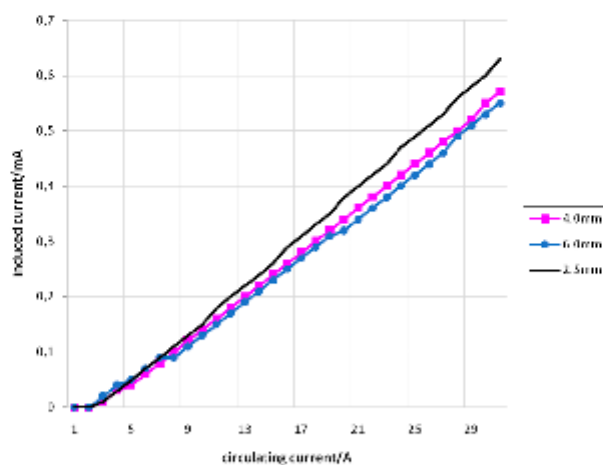


Figure 13. I_f versus I_i for 15 turns with conductors of 2.5 mm^2 (black), 4 mm^2 (pink), and 6 mm^2 (blue).

From Figures 11–13 it is possible to see that the relation between I_f and I_i is approximately linear. Furthermore, the straight lines obtained for conductors with different cross-sectional areas are very similar. The small difference that can be seen in the angular coefficients of these straight lines can be explained by the differences that appear in the cross-sectional areas associated with the coils. These cross-sectional areas suffer slight reductions as the conductor's cross-sectional areas increase.

Also, other small area differences are inherently associated to the coils' construction, subjected to practical imperfections.

3.3. Air-Core Transformer Efficiency

Using Equation (27), it was possible to determine the air-core transformer efficiency for the different test conditions used in this work, as presented in Table 2.

Table 2. Air-core transformer efficiency.

	Conductor of 2.5 mm ²	Conductor of 4 mm ²	Conductor of 6 mm ²
5 turns	$\eta = 0.54\%$	$\eta = 0.49\%$	$\eta = 0.48\%$
10 turns	$\eta = 1.04\%$	$\eta = 0.86\%$	$\eta = 1.01\%$
15 turns	$\eta = 2.00\%$	$\eta = 1.81\%$	$\eta = 1.74\%$

From Table 2, it is possible to see that the best efficiency (2%) is associated with the condition of 15 turns and the conductor of cross-sectional area of 2.5 mm². This low efficiency is due to the significant part of the magnetic flux that is not concatenated by the secondary coil, since the transformer core is constituted by air. Despite this fact, the necessity of using an air-core transformer is justified within the context of the proposed non-destructive method, as previously mentioned.

3.4. Mathematical Models

Using Equations (25) and (27), it was also possible to determine a mathematical model to describe the relation between I_i and I_f , as presented in Table 3.

Table 3. Mathematical models for I_i versus I_f .

	Conductor of 2.5mm ²	Conductor of 4mm ²	Conductor of 6mm ²
5 turns	$I_i = 0.0054 \times I_f$	$I_i = 0.0049 \times I_f$	$I_i = 0.0048 \times I_f$
10 turns	$I_i = 0.0104 \times I_f$	$I_i = 0.0086 \times I_f$	$I_i = 0.0101 \times I_f$
15 turns	$I_i = 0.02 \times I_f$	$I_i = 0.0181 \times I_f$	$I_i = 0.0174 \times I_f$

3.5. Results of the Amplifying/Filtering Stage

Figure 14 shows the relation between I_f and the sensor output voltage after the amplifying/filtering stage.

From Figure 14 it is possible to observe that the relation between the complete sensor output voltage and the input current (that corresponds to the current under analysis, I_f) is linear and varies in the range of 0–3 V. This voltage range permits the usage of a broad family of analog-digital converters and microcontrollers and, consequently, enhances the applicability of the proposed transducer and amplifier/filter associated circuits in a wide range of sensors networks platforms, with easy embedded software implementation of its linear response.

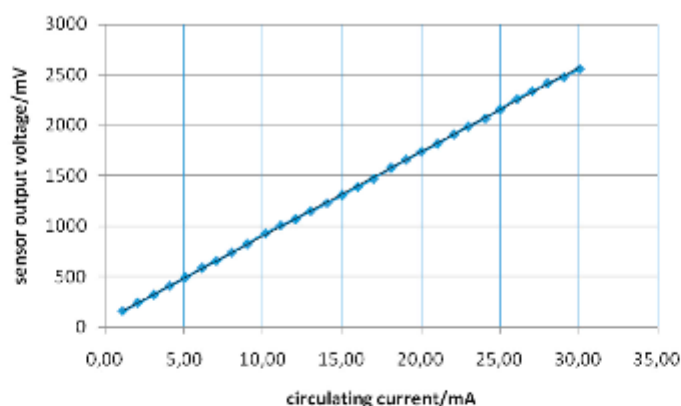


Figure 14. Relation between I_f and the sensor output voltage after the amplifying/filtering stage.

3.6. Discussion

The method proposed in this paper corresponds to a non-destructive current sensing approach for the assessment of initiatives to increase energy efficiency in buildings with environmental certification. More specifically, this method allows the quantitative evidence of reducing or increasing the power consumption of circuits that power initiatives to increase energy efficiency in buildings.

Nowadays, this verification is carried out, for different environmental certification systems, using software and simulation methods, as presented by references [20–22]. Since the software and simulation methods are based on models and/or approximated and hypothetical representations of the building's actual conditions, the results provided by them may not be in fact what is really happening in the building. In other words, even if the software or the simulation method used is precise, it will provide only estimated results and may lead to inappropriate conclusions regarding the evidence of increased energy efficiency associated to the initiatives under analysis.

There are also methodologies that aim at estimating or predicting the energy consumption of a building as a whole, or of specific systems, as the heating system or the air-conditioning system. According to references [23–26], these estimates and predictions can be made, for example, based on data extracted from bills or from the systems' characteristics. These methods also use models to represent global building energy consumption and, therefore, can provide an approximate estimate of power demand that can also lead to invalid conclusions regarding the evidence of increased energy efficiency.

There are also other works that make use of electrical quantities that are measured to carry out the control and automation of different building systems (air conditioning, ventilation, lighting, heating, *etc.*), aimed at increasing the energy efficiency of the building, as described in [32]. However, these electrical parameters are measured by devices that require cutting the circuit under analysis, generating the need for retrofitting, maintenance and, therefore, additional operational costs.

In this context, the proposed method has the advantage of, being based on actual measurements, being able to provide a truly valid proof and quantification of increased energy efficiency of the initiative under consideration. Furthermore, it is also a non-destructive method, since the current demanded by the circuit under analysis is measured without the need for circuit cutting and retrofitting.

Another strong point of the proposed method consists of the fact that the developed sensor can be attached to a microcontroller, which is able to process the information related to the measured values of I_i that come from the amplifying/filtering stage, and, therefore, can automatically determine the energy consumption/generation, according to Equations (1) and (2). Furthermore, as mentioned before, the amplification and filtering stage inserted into the sensor permits the usage of a broad family of analog-digital converters and microcontrollers, broadening the applicability options of the proposed sensor.

On the other hand, it is important to note that a sensitive point of the proposed method corresponds to the efficiency of the air-core transformer used as current sensor. As shown by the obtained results, this efficiency was about 2% at most, considering all tests performed. As previously mentioned, this low efficiency is due to the use of the air core (that makes a significant part of the magnetic flux not to be concatenated by the secondary coil), which is of fundamental importance, considering the non-destructive feature of the proposed methodology. Due to this low efficiency, the insertion of an amplifying/filtering stage in the developed sensor is necessary in order to amplify and filter the current measured by the current sensor.

Despite the mentioned limitations, it is important to note that the proposed methodology can be used directly in environmental certification systems that require proof of increased energy efficiency of buildings, such as AQUA, LEED, and Procel Edifica certification systems. Thus, the use of the sensor and the developed method can enable a building, under evaluation by an environmental certification system, to receive (or not) the score points associated with the increased energy efficiency related to different initiatives such as, for example, the use of photovoltaic panels for generating electricity or the implementation of a lighting automation system.

The proposed methodology can also be easily adopted in the context of the energy efficiency requirements of EN 15232 and ISO 50001. These requirements include the control and the automation of heating, cooling, ventilation, air-conditioning, shading, and lighting systems to enhance energy efficiency in buildings or organizations. In order to really measure and quantify the impact of automation and control systems in the energy efficiency of the building/organization, it is necessary to measure the power consumption of the building. Usually, the measurement of energy consumption associated with different circuits of the building is done using devices that require the physical cutting of the circuit under analysis [32] and, therefore, require reforms in the building. In this sense, the proposed methodology can be used to measure this energy consumption in a low-cost and non-destructive way.

4. Conclusions

This paper presented a non-destructive current sensing method for the evaluation of initiatives aimed at increasing energy efficiency in buildings with environmental certification. This method is based on the implementation of a sensor consisting of three elements: current sensor using a transformer with an air core, amplification/filtering stage, and microcontroller. It uses the low-voltage AC circuit wires as the transformer's coils, avoiding retrofitting and allowing distributed current sensing inside buildings in a clean, low-cost way. Consequently, it has the potential to enhance the dissemination of energy efficiency building certification best practices.

In this work, a prototype was developed and tests were performed to validate the proposed sensor. Based on laboratory tests, it was possible to characterize the current sensor with respect to the number

of turns and cross-sectional area of the primary and secondary coils. Considering the influence of the number of turns, it was possible to observe, from the obtained results, that the relation between I_f and I_i is approximately linear. It was also possible to conclude that for a same value of I_f , the value of I_i increases according to the increase in the number of turns. Besides, regarding the influence of the cross-sectional area of the conductors, it was possible to observe that the relation between I_f and I_i is also approximately linear. Consequently, the straight lines obtained for conductors with different cross-sectional areas are very similar. The small differences found can be explained by the differences that appear in the cross-sectional areas associated with the coils, since these cross-sectional areas suffer slight reductions as the conductor's cross-sectional areas increase.

Furthermore, using the Least Squares Method, it was possible to determine the efficiency of the air core transformer current sensor and mathematical models that describe the relation between the monitored current I_f and the transducer current I_i . Thus, based on the estimated parameters, it is possible to accurately determine the current demanded by the circuit under analysis, considering a given current value detected in the secondary of the transformer. That result will be later used by the microcontroller to calculate the consumption/power generation associated with the circuit.

Due to the proposed current sensor low efficiency (2% in the best test condition), it became necessary to implement an amplifying/filtering stage. So, the values measured by the current sensor can be used in a microcontroller mainly responsible for consumed/generated energy determination, considering the circuit under analysis.

Regarding the added value of the proposed method, it can be concluded that, unlike other methods widespread in the literature (which are based on software or simulation methods), the sensor and the methodology developed in this work can yield proofs of increased energy efficiency of a building, based on actual measurements. Moreover, this confirmation can be made in a simple and non-destructive way, without the need for additional reforms and costs.

As a future work, it is possible to highlight the development of other current sensors that can maintain the non-destructive characteristic of the proposed method, but that can also provide greater efficiency in the current measurement, with low constructive complexity for operational purposes. For example, the usage of iron core coils can improve the efficiency, but can be hard to implement in the actual switchboard conditions. Moreover, the possibility of using a microcontroller based on wireless technology, for determining the electric energy consumption/generation of the initiative under analysis, can be investigated. Finally, it is important to emphasize that the proposed methodology will be actually applied, in a future work, for the evaluation of initiatives to increase energy efficiency in real cases of Brazilian buildings that are in an environmental certification process.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Pontifical Catholic University of Campinas (PUC-Campinas), CAPES/PROSUP for the research scholarship and FAPESP, under grant2012/51642-0, for the support to this work.

Author Contributions

In this paper, Lorenzo Campos Coiado did the main experiments. Lia Toledo Moreira Mota and Alexandre de Assis Mota did the main writing and were responsible for checking the accuracy of data. All of the authors read and approved the final manuscript.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Brundtland, G.H. *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1987; p. 398.
2. Iddrisu, I.; Bhattacharyya, S. Sustainable Energy Development Index: A multi-dimensional indicator for measuring sustainable energy development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *50*, 513–530.
3. Emodi, V.; JinBoo, K. Sustainable energy development in Nigeria: Current status and policy options. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *51*, 356–381.
4. Wines, J. *Green Architecture*; Taschen: Milan, Italy, 2000; p. 240.
5. Hall, M.; Geissler, A.; Burger, B. Two years of experience with a net zero energy balance—Analysis of the Swiss MINERGIE-A® standard. *Energy Procedia.* **2014**, *48*, 1282–1291.
6. CSN Standard. *Energy Performance of Buildings—Impact of Building Automation, Controls and Building Management*, EN 15232; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2007.
7. The International Organization for Standardization (ISO). *Win the Energy Challenge with ISO 50001*; ISO 50001; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2011.
8. United States Green Building Council—USGBC. Available online: <https://www.usgbc.org/LEED> (accessed on 9 April 2015).
9. Suzer, O. A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs. other major certification systems. *J. Environ. Manag.* **2015**, *154*, 266–283.
10. Nguyen, B.; Altan, H. Comparative review of five sustainable rating systems. *Procedia Eng.* **2011**, *21*, 376–386.
11. Building Research Establishment Environmental Assessment Method. Available online: <http://www.breeam.org/offices.html> (accessed on 9 April 2015).
12. Schwartz, Y.; Raslan, R. Variations in results of building energy simulation tools, and their impact on BREEAM and LEED ratings: A case study. *Energy Build.* **2013**, *62*, 350–359.
13. CASBEE Certified Buildings. Available online: http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/certified_bldgs.htm (accessed on 9 April 2015).
14. Wong, S.; Abe, N. Stakeholders' perspectives of a building environmental assessment method: The case of CASBEE. *Build. Environ.* **2014**, *82*, 502–516.
15. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment—CSTB. *NF Bâtiments Tertiaires Démarche HQE*; Bureau et Enseignement: Paris, France, 2005.

16. Green Building Council Australia—GBCAUS. Available online: <http://www.gbcaus.org> (accessed on 9 April 2015).
17. Bidou, D. The HQE approach. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* **2006**, *17*, 587–592.
18. Shayani, R.; Oliveira, M. Proposed business plan for energy efficiency in Brazil. *Energy Policy* **2013**, *61*, 523–531.
19. Procel Edifica. Available online: <http://www.procelinfo.com.br> (accessed on 9 April 2015).
20. Calculation Methods to Predict Energy Savings in Residential Buildings, Swedish Council for Building Research. Available online: http://www.ecbcs.org/docs/annex_03_calculation_methods.pdf (accessed on 23 June 2015).
21. Ziai, N. Measuring Building Performance. Available online: http://www.learningace.com/doc/5559449/bfd78b4dbf708a40d1fbcba34264c28a/measure_bldg_perf (accessed on 23 June 2015).
22. Waddell, C.; Kaserekar, S. Solar gain and cooling load comparison using energy modeling software. In Proceedings of the SimBuild, New York, NY, USA, 11–13 August 2010.
23. Catalina, T.; Virgone, J.; Blanco, E. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy Build.* **2008**, *40*, 1825–1832.
24. Yik, F.; Burnett, J.; Prescott, I. Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods. *Energy Build.* **2001**, *33*, 151–166.
25. Yang, J.; Rivard, H.; Zmeureanu, R. On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks. *Energy Build.* **2005**, *37*, 1250–1259.
26. Smith, A.; Fumo, N.; Luck, R.; Mago, P. Robustness of a methodology for estimating hourly energy consumption of buildings using monthly utility bills. *Energy Build.* **2011**, *43*, 779–786.
27. Boyano, A.; Hernandez, P.; Wolf, O. Energy demands and potential savings in European office buildings: Case studies based on Energy Plus simulations. *Energy Build.* **2013**, *65*, 19–28.
28. Andolsun, S.; Culp, C.; Haberl, J.; Witte, M. EnergyPlus vs. DOE-2.1e: The effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. *Energy Build.* **2012**, *52*, 189–206.
29. Østergaard, P. Comparing electricity, heat and biogas storages' impacts on renewable energy integration. *Energy* **2012**, *37*, 255–262.
30. Zhu, L.; Hurt, R.; Correa, D.; Boehm, R. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house. *Energy* **2009**, *34*, 1043–1053.
31. Costa, A.; Keane, M.; Torrens, J.; Corry, E. Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit. *Appl. Energy* **2013**, *101*, 310–316.
32. Marinakis, V.; Doukas, H.; Karakosta, C.; Psarras, J. An integrated system for buildings' energy-efficient automation: Application in the tertiary sector. *Appl. Energy* **2013**, *101*, 6–14.
33. Donnelly, E.L. *Electrical Installation: Theory and Practice*, 3rd ed.; Nelson Thornes: Cheltenham, UK, 2014; p. 240.
34. Hayt, W.H., Jr.; Buck, J.A. *Engineering Electromagnetics*, 8th ed.; McGraw Hill: New York, NY, USA, 2011; p. 608.
35. Song, M.; Tang, Y.; Zhou, Y.; Ren, L.; Chen, L.; Cheng, S. Electromagnetic Characteristics Analysis of Air-Core Transformer Used in Voltage Compensation Type Active SFCL. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2010**, *20*, 1194–1198.

36. Imielski, A. Electromagnetic Field Analysis of Air-Core Current Transformer. Ph.D. Thesis, Polytechnic of Lodz, Lodz, Poland, 1983. (In Polish)
37. Imielski, A.; Wasowicz, S. Mutual inductance coefficient of air-core transformers. *Arch. Elektrotechnik* **1988**, *71*, 69–75.
38. Mota, L.T.M.; Mota, A.A. Load modeling at electric power distribution substations using dynamic load parameters estimation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* **2004**, *26*, 805–811.
39. Arduino. Available online: <http://arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno> (accessed on 7 April 2015).

© 2015 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Communications Delay and Energy Consumption in IEEE802.11 Network Stations

Josué Marcos de Moura Cardoso, Adolfo Blengini Neto, Lorenzo Campos Coidado, Argemiro Bevilacqua, Lia Toledo Moreira Mota, Alexandre de Assis Mota, Claudia Cotrim Pezzuto, Marcius Fabius Henriques de Carvalho

*Pontifical Catholic University of Campinas - São Paulo, Brasil.
Indra Company – Brasil Office, Campinas - São Paulo, Brasil*

Summary

This paper had the objective of studying the relation between the communication delay and the electric power consumption in IEEE 802.11 network stations. In order to achieve this goal, tests were carried out, considering four different scenarios. The obtained results show that there is a direct relationship between the communication delay and the electric power consumption in IEEE 802.11 network stations.

Key words:

Quality of Service; Communications Delay; IEEE802.11; Energy Consumption; Network planning.

1. Introduction

The IEEE 802.11 standard is the most widespread wireless communication standard in the contemporary society for users' connection to wireless devices and to the Internet. Its development occurred in the beginning of the 1990 decade, and its final version was launched in 1999. The aim of the project was to add a new physical layer and data to the ISO model, promoting radiofrequency communication over ETHERNET [1, 2, 3, 4]. To control and operate such networks within Quality of Service (QoS), a set of parameters was defined.

One of the most important QoS parameters is the communications delay. The delay parameter can be defined as the transit time of a data package in a communication process. If the delay shows high rates, degeneration can occur in the synchronism as well as in the network packages. In applications which involve voice or video, the delay cannot reach up 150 ms, since over this value a dramatic influence can affect the communication link [4, 5, 6, 7].

In order to maintain quality of service parameters (such as the communications delay) in adequate levels, efforts must be made, in terms of investments and network maintenance.

This involves equipment and link performance evaluation, including economic, social and environmental sustainability. One consequence of link performance degeneration is the increase in energy consumption required to maintain the communication link.

Sustainability has been an extremely relevant and recurring subject in the media nowadays. Consequently, electrical energy massive consumers must be identified and these high demands must be analyzed and mitigated. Over the years, the electrical energy consumption in communication networks has grown significantly. Also, the Telecommunications sector has shown a significant growth. The Gartner institute research shown that in 2010, nearly 727 TWh were used to power feed personal computers. On the other hand, for servers, in a global scale, approximately 138 TWh were used [1, 8]. This electrical energy consumption tends to increase since users are adopting and using new technologies every single day. In this context, the main objective of this paper is to relate the communication delay (that is a Quality of Service parameter) to the electrical energy consumption in IEEE 802.11 (Wi-Fi) networks, which are becoming more popular worldwide [1, 2, 10].

2. Materials and Methods

2.1 Access Point

To generate data traffic between the Access Point (AP) and the client station, the computer on Fig. 1 was used. The specifications of the machine are presented on Table 1. This is a smart AP which was developed by the Research Group on Energetic Efficiency (GPEE) from the Pontifical Catholic University of Campinas (PUC-CAMPINAS) in the context of the Post-graduate Programs in Urban Infrastructure and Telecommunications Networks

Management. In Fig. 1, the Wi-Fi antenna is shown inside a yellow colored circle.

2.2 Client Station

The AP-client relation was set up using the AP (Fig. 1) and an Acer laptop. The laptop was connected to a specific network in order to send the packages to the AP. Since a device is connected to a network, it is identified by the network. Using the PING command (that is described in section 2.4), it was possible to check if the station used in the experiments was really integrated to the network. All technical information is presented in Table 2.



Fig. 1. AP (desktop model) used in the tests.

Table 1: Features of the AP used in the tests

PC	Tower desktop with LINUX
I.P.	10.10.0.1
O.S.	Ubuntu 12.04.LTS
PROCESSOR	Central INTEL i3 3.1GHz/32bits
MEMORY	4GB (RAM)
WIRELESS NETWORK BOARD	Wireless network board and cabled connection ETHERNET connected to the local network PUC-Campinas
NETWORK INTERFACE	IEEE802.11g standard wireless

Table 2: Features of the Client used in the tests

MODEL	Acer Aspire E5-571-56R0
PC	laptop
I.P.	10.10.0.120
S.O.	Windows 8.1
PROCESSOR	Intel® Core™ i5-4210U
MEMORY	8GB (RAM)

2.3 Current and Voltage Analyzer – INDRA

The electrical energy consumption data collection was made using a network aspects analyzer from INDRA® company [9] shown in Fig. 2. Using this analyzer, the

energy consumption of the station could be checked while the delay parameter was collected. Among other parameters, the equipment measures active power (KW), Reactive Power (KVA_r), power factor, voltage and electrical current. The equipment was adapted in order to get the current (i) and voltage (V) values. Two analyzers were used in a parallel way so that each one could inform the current and voltage value at the moment of the experiments. In order to measure the effective electrical energy consumption of the station, the laptop battery was removed. This adaptation was applied and can be seen on Fig. 3.



Fig. 2. Power network analyzer used in the experiments

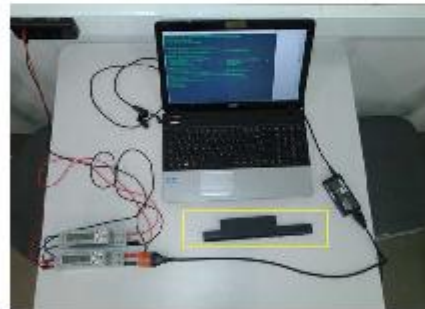


Fig. 3. Client Laptop Adaptation (battery removal and instrumentation).

2.4 Using OS PING command

This command is available in operational systems (OS) such as Windows and Linux, via operational system's command window. The objective of using this command is to determine how long a package of information (payload) takes to reach its destination and get back [2]. So, the PING command sends packages to the destination device and waits for a "response" about the package delivery. The

PING command provides measurements associated to the RTT (Round trip Time) - which is the time it takes for a package to be sent added to the time interval that it takes for an acknowledgment about that information to be received - and to the intensity of the signal. The RTT is also known as Ping Time [2, 10].

The PING command works with command lines and, consequently, it is possible to determine the size of the package to be sent as well as the quantity of packages. Table 3 shows the expected parameters for standard voice payload, extracted from ref. [2]. The highlighted part presents voice service payloads (Bytes) that will be adopted as base case for the tests in the first scenario in the next section (Results).

Table 3: Calculated parameters for standard voice payload [2]

Voice payload size (Bytes)	Voice payload time (ms)	Package by seconds (PPS)	Bandwidth ETHERNET (Kbps)
160 Bytes	20 ms	50	87.2 Kbps
20 Bytes	20 ms	50	31.2 Kbps
24 Bytes	30 ms	34	21.9 Kbps

3. Results

All experimental tests took place inside the Thermal Comfort Laboratory at PUC- Campinas. Fig. 4 illustrates the network architecture used in the tests. Output monitored data was saved in text files stored inside the AP station memory. Then, data output was formatted for usage in spreadsheets containing information about package times and station power, include true-rms voltage and current.



Fig. 4 Test Network architecture

For each performed test, 60 PING commands were issued, and the corresponding 60 values of voltage, current and power were registered. Fig. 5 illustrates the output spreadsheet structure for voice packages with payload size of 160 bytes. The 8 bytes added to the package size (that

results in 168 bytes) is automatically made by the PING command, and can be interpreted as the attached heading in every package sent to the station. For the experimental tests, it was fixed the minimum size of 160B for the payload, considering that is the typical package for voice services, considered critical in wireless IEEE802.11 communications [2].

SIZE (B)	PACKAGE NUMBER	RTT (ms)	VOLTAGE (V)	i (A)	CONSUMPTION (W)
168	1	1,7	131,3	0,2	26,26
...
168	8	1,69	132,0	0,12	26,0

Fig. 5. Output Format (exported to text file).

3.1 Tests for 160 bytes package size (Scenario 1)

In the first experimental scenario, using 160 bytes sized packages (that result in a payload size of 168 bytes), two different test cases were experimented. In the first case (Case A), the distance between the access point and the mobile station was 13 meters. The received signal power at the station was about -63 dBm. In these conditions, the average delay obtained was 3.67 ms, for an average power of 26.37 W at the station.

In the second case (Case B), station and access point were positioned more distant from each other, in order to cause a greater interference in the signal transmission and a drop in the received power at the station. The distance between AP and station was 30 meters, and the received power was -90 dBm. For the same 168 bytes payload packages, the average delay was slightly higher, of about 4.14 ms; and the average power at the station also suffered a small increase, resulting in a 27.30 W demand. Fig. 6 illustrates the obtained results for Cases A and B.

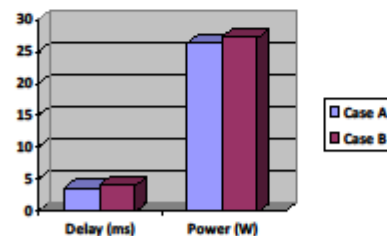


Fig. 6. Delay and Power comparison for different conditions using packages of 160 bytes

3.2 Tests for 35000 bytes package size (Scenario 2)

In the second experimental scenario, tests were made in order to identify the PING command capacity to send huge sized packages. These tests showed that the programmer can send packages of a size up to 35000 bytes without losses, depending on the distance and the influence that may be among the propagation. So, the payload size of 35008 bytes was adopted for Scenario 2.

In the third case (Case C), the distance between the access point and the mobile station was set to 13 meters. The resulting received signal power at the station was -68 dBm, and the average delay obtained was 24.82ms, for an average station power of 15.25W.

In the fourth case (Case D), station and access point were turned apart, as before. The new distance between AP and station was set at 30 meters, and the corresponding received power was -92 dBm. For payload packages of the same size (35008 bytes), the delay significantly increased, for an average value of 431.92ms, leading to an increase in the average station power demand that became 26.12W.

Fig. 7 illustrates the comparison among the tested cases for the second scenario. It should be noted that Fig. 7 y-axis maximum value was set at 50 in order to provide a better data comparison view, but in truth the delay in Case D exceeds this value by large, being equal to 431.92ms.

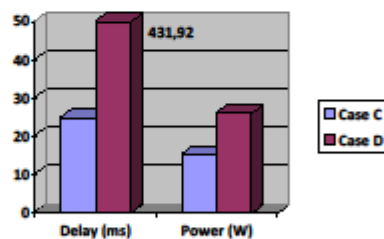


Fig. 7. Delay and Power comparison for different conditions using packages of 35000 bytes

3.3 Results Summary

The obtained results related to Scenario 1 (Cases A and B) and to Scenario 2 (Cases C and D) are summarized in Table 4. In this Table, the column "Distance" represents the distance between the AP and the client station. From this Table it is possible to observe the influence of the distance in the delay and in the station power demand.

Considering the comparison between Cases A and B (that have the same payload), it is possible to verify that as the distance increases, the delay increases (an increase of approximately 13.4%) and the power demand also increases (an increase of approximately 3.5%).

Similar conclusions can be obtained when considering the comparison between Cases C and D (that have the same payload). It is possible to verify that as the distance increases, the delay increases (an increase of approximately 1640.2%) and the power demand also increases (an increase of approximately 71.3%).

Table 4: Summarized test results

Scenario/Case	Distance (m)	Payload (kByte)	Received Power (dBm)	Average Delay (ms)	Average Power (W)
S1/Case A	13	0.16	-63	3.65	26.37
S1/Case B	30	0.16	-90	4.14	27.30
S2/Case C	13	35	-68	24.82	15.25
S2/Case D	30	35	-92	431.92	26.11

4. Conclusion

This paper was focused on determining the relation between the communication delay and the electric power consumption in IEEE 802.11 (Wi-Fi) network stations. In order to verify this relation, tests were carried out, at the Thermal Comfort Laboratory of PUC-CAMPINAS, considering four different cases (A, B, C and D). These tests were based on the communication between an Access Point and a station, using the IEEE 802.11 standard.

The obtained results show the influence of the distance between the AP and the station on the signal propagation and degradation, since an increase in this distance results in an increase in the communication delay and in an increase in the station power demand. So, there is a direct relationship among the distance, the communication delay and the electric power consumption in IEEE 802.11 network stations, considering situations that maintain the same payload.

From the results, it was also possible to verify that there is an influence of the payload on the communication delay, since an increase on the payload causes an increase on the delay and a decrease on the station power demand. This is an interesting result that must be better explored, by carrying out more tests, in order to confirm this preliminary analysis.

Acknowledgments

The authors acknowledge the support of Brazilian funding agencies CNPq and CAPES, in the form of research scholarships, including CNPq grant number 485076/2011-0; and PUC-Campinas, in the form of institutional research grants and scholarships.

References

- [1] BIAZOTTO, L. H.; MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira. Low Cost Test Bench to Assess Energy Efficiency of Communications Network Equipment. *Journal of Computer Sciences*, v. 8, p. 1849-1853, 2012.
- [2] RAPPAPORT, T. S. in: *Wireless Communications-Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002.
- [3] http://www.cisco.com/cisco/web/support/BR/8/82/82851_bwidth_consume.html, accessed in 04-22-2015.
- [4] TELECO, Broadband Communications Section, accessed at http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswlanII/pagina_2.asp, on 03-23-2015.
- [5] TELECO, Broadband Communications and Quality of Service Section, accessed at http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialqosotm/pagina_3.asp, on 03-22-2015.
- [6] TELECO, Broadband Communications: Quality of Service and Network Concepts Section, accessed at http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialqosotm/pagina_2.asp, on 03-22-2015.
- [7] P. MADHUMATHY, D. SIVAKUMAR. Mobile Sink Based Reliable and Energy Efficient Data Gathering Technique for WSN. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 78 VOL.14 No.12, December 2014.
- [8] OLIVEIRA, V. C.; MOTA, Alexandre de Assis; MOTA, Lia Toledo Moreira. Impacts of application usage and local hardware on the throughput of computer networks with desktop virtualization. *American Journal of Applied Sciences*, v. 10, p. 117-122, 2013.
- [9] INDRA. <http://www.indracompany.com/>
- [10] COMER, Douglas. *Internetworking with TCP/IP*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2000.

Josué Marcos de Moura Cardoso, is currently studying to obtain his B.Sc. degree in Telecommunications Engineering and has an undergraduate research scholarship in the same University, in the Communications Networks Energy Efficiency area.

Adolfo Blengini Neto, obtained his B.Sc. degree in Information technologies from FATEC-SP-Brazil in 2001. Currently, he is studying to obtain his Msc. degree in Infrastructure Urban Systems in the same University, in the Power Systems and Telecommunications Networks Modeling.

Lorenzo Campos Coiado, is a Telecommunications Engineer and obtained his B.Sc. degree from Pontifical Catholic University of Campinas in 2010. He is also a Work Security Engineer (2013). Currently, he is studying to obtain his Msc.

degree in Infrastructure Urban Systems in the same University, in the Building Electromagnetics Emissions area.

Argemiro Bevilacqua, has a B.Sc. degree in the Information Technology area, obtained in 1987 from Pontifical Catholic University of Campinas. Currently, he is studying to obtain his Msc. degree in Telecommunications Networks Management in the same University, in the IEEE 802.11 Quality of Service area.

Lia Toledo Moreira Mota is an Electrical Engineer (1998), with M.Sc. (2001) and Ph.D. (2005) from State University of Campinas. During 2006-2007 she was a Visiting Scholar at McGill University. Nowadays, she is a full Professor at Pontifical Catholic University of Campinas, in Electrical and Civil Engineering, and in both Telecommunications Networks Management and Urban Infrastructure Systems post-graduate Programs. Her interests include Energy Consumption and Quality of Service.

Alexandre de Assis Mota is an Electrical Engineer (1998), with M.Sc. (2001) and Ph.D. (2005) from State University of Campinas. During 2006-2007 he was a Visiting Scholar at McGill University. Nowadays, he is a full Professor at Pontifical Catholic University of Campinas, in Electrical and Civil Engineering, and in both Telecommunications Networks Management and Urban Infrastructure Systems post-graduate Programs. His research interests include Smart Grids, Energy Efficiency and Remote Sensing in Urban Areas.

Claudia Cotrim Pezzuto obtained her B.Sc. degree in Architecture (1994), her M.Sc. degree (2003) from University of Sao Paulo and her Ph.D. degree (2007) from State University of Campinas. Nowadays, she is a full Professor at Pontifical Catholic University of Campinas, in Architecture and Civil Engineering, and also in the Urban Infrastructure Systems post-graduate Program. Her interests include Buildings Performance.

Marcus Fabius Henriques de Carvalho has a B.Sc. degree in Electrical Engineering (1974) from UFJF-Brazil, with M.Sc. (1976) from UFRJ-Brazil and a Ph.D. (1986) from State University of Campinas. During 1987-2010 he was a Researcher at CTI-Brazil. Nowadays, he is a full Professor at Pontifical Catholic University of Campinas, in the Business School and Production Engineering, and in both Telecommunications Networks Management and Urban Infrastructure Systems post-graduate Programs. His research interests include Urban Mobility and Power Systems.

Estimação da Energia de Campos Eletromagnéticos em Edificações pela Radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11

Lorenzo Coiado, Alexandre Mota e Lia Mota

Abstract—Lately, a wide variety of devices has been developed which have allowed users access wireless communication nets such as smartphones as well as laptops. Due to this a rapid expansion of Wi-Fi IEEE 802.11 standard technology has been felt. Wi-Fi has permitted a greater mobility to users to obtain information and it has become an attractive solution to the corporative world since with no wired net points the cost of installations have been cut down. As Wi-Fi technology is spread, a significant increase of radiated electromagnetic fields has been observed in different installed points. This document presents a method of indoor building electromagnetic measuring areas focused on a 2.4 GHz Wi-Fi net from the potential mapping generated in dBm by this net. This study has the concern about all harm these electromagnetic radiations may cause to the human being.

Index Terms— Radiodifusão, IEEE 802.11, Campos eletromagnéticos

I. INTRODUÇÃO

O ritmo de crescimento da população está cada vez mais acelerado e as cidades passaram a acomodar grande parte da população mundial, criando centros urbanos com alta concentração demográfica. Esse aumento da concentração demográfica tornou-se um grande problema para a gestão das cidades e para as políticas locais. Existe, atualmente, uma grande pressão para a otimização de recursos e para tornar as cidades mais eficientes. Iniciativas por parte do setor privado e governo passaram a investir em tecnologia de informação e comunicação (TIC) para tentar minimizar os problemas de infraestrutura urbana. Nos dias atuais, a Internet prevê a conexão de sensores a serem utilizados como um recurso eficiente em Cidades Inteligentes [1].

A disseminação da informação veio acompanhada de uma tecnologia de rede que se expandiu também em grande proporção: o padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi). Esse padrão

proporciona grande mobilidade e conectividade a uma vasta quantidade de dispositivos, tais como: tablets, televisores, palmtops, impressoras, câmeras de segurança. A tecnologia Wi-Fi veio otimizar recursos e facilitar a interatividade dos usuários com a rede [2]. Por ser uma tecnologia sem fio permite uma grande redução de custos em projetos, uma vez que elimina a necessidade de pontos cabeados, e permite que infraestruturas prediais obsoletas possam ter uma solução de acesso à Internet sem a necessidade de transportar cabos.

Assim, um agente invisível e que pode causar danos à saúde humana está cada vez mais presente em nossas vidas: o campo eletromagnético em edificações pela radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11. Todas as redes sem fio Wi-Fi lançam radiações eletromagnéticas no ambiente de sua atuação. E com a disseminação desta tecnologia, houve um aumento significativo de pontos de acessos nas edificações. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia de medição desses campos irradiados, através do levantamento da potência (em dBm) gerada por uma rede IEEE 802.11, com a preocupação de observar a energia absorvida pelo corpo humano ao ser exposto a este agente. A Figura 1 ilustra a termografia de um corpo humano [3].

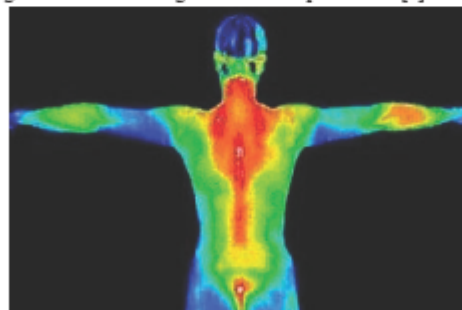


Fig. 1. Termografia de um corpo humano. Adaptado de [3].

II. CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

A. Equações de Maxwell

A base teórica para estudo de campos eletromagnéticos corresponde às equações publicadas, em 1864, pelo físico escocês James Clerk Maxwell, que em seu trabalho intitulado “Dynamical Theory of Electromagnetic Field” unificou as

Lorenzo Coiado, Alexandre Mota e Lia Mota atuam junto ao Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Píntifica Universidade Católica de Campinas, Rod. Dom Pedro I, Km 136, CEP 13086-900, Brasil (e-mails: lorenzo.coiado@gmail.com, amota@puc-campinas.edu.br, lia.mota@puc-campinas.edu.br).

equações de campo elétrico e campo magnético. Segue uma breve descrição de cada uma delas [4].

$$\oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\oint B \cdot dA = 0 \quad (2)$$

$$\oint E \cdot dS = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (3)$$

$$\oint B \cdot dS = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (4)$$

Onde “E” é o campo elétrico, “B” é a densidade de fluxo magnético, “q” é a carga elétrica, “ ϵ_0 ” é a permissividade do vácuo, “ μ_0 ” é a permeabilidade do vácuo, “I” é a corrente elétrica, “ ϕ_B ” é o fluxo magnético e “ ϕ_E ” é o fluxo elétrico.

A Equação (1) é a Lei de Gauss e afirma que, para uma superfície fechada, o campo elétrico é proporcional à carga resultante contida no volume fechado pela superfície.

A Equação (2) afirma que, o fluxo do campo magnético para uma superfície fechada é zero, não existindo o análogo magnético para a carga elétrica.

A Equação (3) é a Lei de Faraday, e afirma que a integral de linha do campo elétrico ao longo de um trajeto fechado é proporcional à taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético para uma superfície delimitada por este trajeto.

A Equação (4) é uma forma alterada da Lei de Ampère e afirma que a integral de linha do campo magnético ao longo de um trajeto fechado é proporcional à soma de dois termos. O primeiro contém a corrente resultante que flui através de uma superfície delimitada pelo trajeto fechado. E o segundo contém a taxa de variação, no tempo, do fluxo do campo elétrico para uma superfície delimitada pelo trajeto.

Assim, as equações de Maxwell fazem uma correlação entre os campos elétricos e magnéticos [4].

B. Energia e Potência

Os campos eletromagnéticos (medidos em V/m) têm a capacidade de transportar energia, sendo que a potência (P) corresponde à energia desenvolvida ou dissipada em um certo intervalo de tempo. Essas grandezas são fundamentais para que as redes sem fio funcionem, uma vez que os receptores necessitam de uma potência mínima para reconhecimento do sinal [5].

A potência contida no campo elétrico é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico, conforme Equação (5).

$$P \sim E^2 \quad (5)$$

III. METODOLOGIA

A. Hardware

Para os testes realizados neste trabalho, foi utilizado um computador desktop, com sistema operacional Linux Ubuntu e placa de rede configurada como Access Point (AP) numa rede Wi-Fi de 2.4GHz (padrão IEEE 802.11). Para o acesso remoto ao computador, foi utilizado um notebook DELL Inspiration, Intel Core i5. A bancada de testes está ilustrada na Figura 2.



Fig. 2. Bancada de testes.

B. Software

No computador torre foi utilizado o Linux Ubuntu, por ser um sistema operacional que permite acesso ao hardware da placa de rede e com maiores funções do que um sistema operacional comercial. Foram utilizados scripts de visualização da potência recebida no AP em dBm. Para o acesso remoto ao computador, foi utilizado um notebook com sistema operacional Windows 7 e software PuTTY, que permite o acesso remoto ao Access Point.

C. Script de acesso

O script permite a visualização da potência recebida em dBm por um AP, de um laptop conectado na rede Wi-Fi desta base. Com o afastamento ou aproximação do laptop ao AP, é possível verificar a variação da potência do sinal recebido. O script foi definido para coletar dados a cada um segundo.

D. Access Point

Em um link padrão IEEE 802.11, a potência é medida em miliwatts ou dBm. As medidas tomadas com o AP têm como saída a potência em dBm. Para transformá-la em energia, são utilizadas as seguintes equações.

$$M = 10 \log \frac{P}{1mW} \quad (6)$$

$$10^{M/10} \cdot 1mW = P \quad (7)$$

As equações (6) e (7) têm como objetivo a transformação da potência em dBm, fornecida pelo Access Point, para miliWatt. Sendo que o “M” é a medida da potência recebida no AP, coletada no experimento e “P” é a potência em miliWatt. Sabendo-se que 1 Watt é igual a 1 Joule/segundo, é possível determinar a Energia irradiada por determinado período de tempo.

IV. COLETA DE DADOS

A. Primeiro experimento

Em um primeiro momento, foi feita a medição da potência recebida no AP durante 5 minutos, com intervalo de 1 segundo entre as medidas. A Figura 3 ilustra o esquema utilizado para o primeiro experimento (sem obstáculos entre laptop e AP). Neste primeiro experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $7,88 \times 10^{-7}$ Joules.



Fig. 3. Medição sem obstáculos (primeiro experimento).

B. Segundo experimento

No segundo experimento, foi feita a medição da potência do AP durante o mesmo período de tempo, com uma pessoa servindo de obstáculo. A Figura 4 ilustra o esquema utilizado para o segundo experimento (com uma pessoa funcionando como obstáculo entre laptop e AP). Neste segundo experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $5,74 \times 10^{-8}$ Joules.



Fig. 4. Uma pessoa como obstáculo (segundo experimento).

C. Terceiro experimento

No terceiro experimento, foi feita a medição da potência do AP durante o mesmo período de tempo, com um muro como obstáculo. A Figura 5 ilustra o esquema utilizado para o terceiro experimento (com um muro como obstáculo entre laptop e AP). Neste terceiro experimento, a energia irradiada (E) pelo AP foi de $2,98 \times 10^{-9}$ Joules.



Fig. 5. Um muro como obstáculo (terceiro experimento).

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A colocação de barreiras (corpo humano no segundo experimento e muro no terceiro experimento) entre o AP e o notebook teve como objetivo estimar a quantidade de energia absorvida por esses obstáculos, comparando os resultados do segundo e do terceiro experimentos com o caso base sem nenhum obstáculo (primeiro experimento).

Os resultados dos três experimentos podem ser sintetizados de acordo com a Tabela I.

Tabela I: Energia irradiada para os três experimentos

Experimento	Energia Irradiada (J)
Primeiro	$E_1 = 7,88 \times 10^{-7}$
Segundo	$E_2 = 5,74 \times 10^{-8}$
Terceiro	$E_3 = 2,98 \times 10^{-9}$

Mais especificamente, a partir dos resultados coletados, pode-se estimar a quantidade de energia absorvida pelo corpo humano (E_{CH}) ao ser exposto a uma rede Wi-Fi durante 5 minutos, de acordo com a Equação (8).

$$E_{CH} = E_1 - E_2 = (7,88 \times 10^{-7}) - (5,74 \times 10^{-8}) = 7,30 \times 10^{-7} J \quad (8)$$

A título de comparação, pode-se estimar a quantidade de energia absorvida por um muro (E_M) ao ser exposto a uma rede Wi-Fi durante 5 minutos, de acordo com a Equação (9).

$$E_{CH} = E_1 - E_3 = (7,88 \times 10^{-7}) - (2,98 \times 10^{-9}) = 7,85 \times 10^{-7} J \quad (9)$$

Cabe ressaltar que, neste trabalho, não foi considerada a quantidade de energia que pode ser refletida pelos corpos.

VI. CONCLUSÕES

Como conclusões deste trabalho, pode-se destacar que foi possível estimar a energia associada aos campos eletromagnéticos em edificações pela radiodifusão proveniente de redes Wi-Fi padrão IEEE 802.11. A partir dos resultados obtidos, pôde-se concluir que o corpo humano absorve energia proveniente das redes Wi-Fi IEEE 802.11 e, mais ainda, pôde-se estimar essa energia absorvida. É de se esperar que a quantidade de energia absorvida pelo corpo esteja relacionada com o tempo de exposição do mesmo, com a quantidade de APs no ambiente e com possíveis danos à saúde, aspectos que deverão ser tratados em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas) e ao CNPq pelo suporte a este trabalho.

REFERENCES

- [1] P. Charith, et al. "Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of Things". Wiley Online Library.
- [2] C.P.C. Marques. Identificação de ofensores via análise da sensibilidade de estações na vazão de redes IEEE 802.11, 2013.
- [3] Termografia infrarroja, Available: www.investigacionengestiondeportiva.es. Access: 05/2014.
- [4] F. J. Keller, et al. Física. Clemson University. Vol. 2, 1999.
- [5] Pietrosemoli. "Wireless Networking in the Developing World. Third Edition", 2013.

Cite this article:

Coelho, L., Mota, A. e Mota, L.; 2015. Estimação da Energia de Campos Eletromagnéticos em Edificações pela Radiodifusão proveniente de redes IEEE 802.11. SET EXPO PROCEEDINGS. ISSN Print: 2447-0481. ISSN Online: 2447-049X. v.1. doi: 10.18380/setep.2015.1.3. Web-link: <http://dx.doi.org/10.18380/setep.2015.1.3>