

Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário

Relatório Final de Pesquisa RDT – ANTT – Triunfo|CONCEPA



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	JUSTIFICATIVA	6
1.2	OBJETIVOS	9
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4	ETAPAS E MÉTODOS DA PESQUISA	9
2	FORMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS PRAÇAS DE PEDÁGIO	11
2.1	OTIMIZAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	13
2.1.1	Climatização	14
2.1.2	Iluminação	19
2.1.3	Superfícies externas	21
2.2	MICROGERAÇÃO DE ENERGIA E DOMÓTICA APLICÁVEIS À PRAÇAS DE PEDÁGIO	26
2.2.1	Geradores alimentados por combustíveis	27
2.2.2	Energia solar	27
2.2.3	Energia geotermal.....	29
2.2.4	Energia eólica	29
2.2.5	Energia hidráulica	31
2.2.6	Coletores piezoelétricos	32
2.2.7	Outras técnicas de geração de energia	33
2.2.8	Comparação entre as diferentes tecnologias	34
2.3	MAPEAMENTO DOS SISTEMAS EXISTENTES E DEMANDAS DE ENERGIA	35
2.3.1	Praça de Santo Antônio da Patrulha – P1.....	35
2.3.2	Praça de Gravataí – P2.....	38
2.3.3	Praça de Eldorado do Sul – P3.....	40
2.4	MODO DE COBRANÇA DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA – CONCESSIONÁRIA ELÉTRICA VERSUS GERAÇÃO AUTÔNOMA	41
3	GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS PAVIMENTOS.....	43

3.1	REVISÃO DA LITERATURA EM GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE PAVIMENTOS.....	43
3.1.1	Sistema piezoelétrico	43
3.1.2	Geometrias utilizadas na geração de energia com sensores piezoelétricos ..	44
3.1.3	Custos de implantação da energia piezoelétrica	52
3.1.4	Sistema fotovoltaico	53
3.1.5	Sistemas coletores térmicos	55
3.2	NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA	57
3.3	PIEZOELETRICIDADE.....	58
3.4	APLICAÇÃO NA BR-290 – PILOTO PARA PROVA DE CONCEITO	61
3.4.1	Circuito elétrico equivalente e sensores utilizados	61
3.4.2	Concepção do protótipo.....	67
3.4.3	Implantação do sistema de geração elétrica piezoelétrica na pista 1.....	69
3.4.4	Coleta de dados da geração e modificações do sistema	73
3.5	CONSIDERAÇÕES DO SISTEMA INSTALADO E PROPOSTA PARA USO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO RODOVIÁRIAS	79
4	RECOMENDAÇÕES PARA MELHORIAS DE EFICIÊNCIA NAS PRAÇAS DE PEDÁGIO	80
4.1	DISCUSSÃO SOBRE O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA COM RECOMENDAÇÕES PARA OTIMIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA	80
4.1.1	Conforto térmico	82
4.1.2	Geradores a diesel e biodiesel	84
4.1.3	Painéis solares fotovoltaicos.....	86
4.1.4	Geradores eólicos do tipo Wind Tree	89
4.1.5	Geradores hidrocínéticos	92
4.1.6	Resumo das alternativas.....	95
4.2	DESAFIOS NOS ABASTECIMENTOS PONTUAIS AO LONGO DA RODOVIA E POTENCIAL DO USO DA MICROGERAÇÃO PARA ABASTECIMENTO DE SISTEMAS ITS	98
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100

6 EQUIPE EXECUTORA 102

1 INTRODUÇÃO

A Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre, CONCEPA, é a operadora do trecho da rodovia BR290/RS, conhecido como Freeway, que conecta os municípios de Osório, Porto Alegre e Guaíba (entroncamento da Rodovia BR116/RS) desde julho de 1997, totalizando 121 km de rodovia explorados pela concessionária. Desses, uma extensão de 25 km apresenta duas faixas por sentido (do km 96 ao 112,3 da BR290/RS e do km 291,2 ao 299,9 da BR116/RS), e o restante da extensão compreende 96 km com mais de duas faixas por pista. Em julho de 2017, estendeu sua concessão por um período adicional de um ano, para viabilizar a transição para o novo período de concessionamento previsto pela ANTT. Três praças de pedágios são operadas e estão localizadas nos municípios de Santo Antônio da Patrulha, Gravataí e Eldorado do Sul.

No decorrer do seu período de 20 anos de concessão, a CONCEPA vem trazendo novidades ao panorama rodoviário estadual e nacional, por meio dos serviços prestados para este importante corredor que conecta o estado do Rio Grande do Sul ao norte do país. Há vários anos, a concessionária é parceira de diversas empresas e instituições, contribuindo para o desenvolvimento de pesquisas na área de infraestrutura rodoviária através de recursos disponibilizados pelo RDT (Recursos de Desenvolvimento Tecnológico) junto à ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), cenário no qual esta pesquisa está inserida.

Dentro do sistema de concessionamento rodoviário uma das partes vitais da operação são as praças de pedágio. Fundamentalmente um local estrategicamente definido onde os veículos fazem o pagamento da tarifa, estas localidades têm uma série de funções paralelas: pontos de apoio para motoristas muitas vezes com suporte de informações, banheiros, bares, etc. Servem também de base de apoio operacional da concessionária com sistemas de segurança para lidar com as tratativas financeiras, possuem zona de descanso, vestuários e alimentação dos funcionários e, por serem áreas normalmente com ampla disponibilidade de espaço, são também muitas vezes ocupadas para depósitos ou oficinas de trabalho.

Essas áreas são compostas de uma série de edificações e dispositivos que devem ser pensados de forma a otimizar a operação da Concessionária e fornecer segurança ao usuário e ao tráfego de informações com a Agência, atingindo seu propósito primordial de possibilitar uma operação confiável livre de falhas.

Com uma série de novas praças de pedágio previstas para construção no novo plano de concessões esperado para o estado do Rio Grande do Sul, torna-se evidente a necessidade de se avaliar as possibilidades disponíveis para melhoria das eficiências destas praças. Usualmente com prazos curtos para projeto e execução, são elementos críticos que alavancam o início da instalação de uma nova empresa concessionária, que precisa, desde o momento da sua implantação, dividir esforços entre as várias tarefas necessárias, muitas vezes ainda com grupos de trabalho em formação.

Com a intenção de auxiliar na identificação de possíveis sistemas ou dispositivos que possam ser apoiadores no desenvolvimento tecnológico destas complexas estruturas, este projeto realizou um apanhado de soluções e propôs algumas estratégias que possam ser incorporadas às novas praças de pedágio que venham a ser instaladas no Rio Grande do Sul ou em qualquer outro estado, principalmente no que tange a geração e o consumo de energia por parte dessas estruturas. Uma das ferramentas propostas como 'prova de conceito' foi a geração de energia a

partir dos pavimentos, conhecida na literatura internacional como "*Energy Harvesting from Pavements*". Desta maneira geral, este relatório apresenta em seu conteúdo *Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário*.

1.1 JUSTIFICATIVA

A dependência da matriz energética elétrica ao longo do tempo vem crescendo a largos passos. Sucessivas revoluções no campo da tecnologia vêm trazendo grandes impactos na forma como a sociedade produz e atende suas demandas. Nos dias de hoje, a energia elétrica é responsável pelo funcionamento da maioria dos equipamentos utilizados no diário coletivo. Sua geração é proveniente imprescindivelmente da natureza, independente de como for realizada a conversão.

Em especial no Brasil, temos sentido cada vez mais os efeitos dessa dependência. Em 2001, o país passou por uma grave crise energética, resultado da combinação de falta de investimentos no setor com a longa estiagem, que baixou os níveis das hidrelétricas, principais fontes de produção de energia elétrica nacional. Desde então, a conscientização e a busca de fontes alternativas de energia vêm crescendo no país (CASTELLANELLI et al., 2007).

Mais recentemente, em março de 2018, tivemos novamente um caso de apagão de grandes proporções, que deixou 70 milhões de pessoas sem luz em 14 estados das regiões Norte e Nordeste, além de afetar indiretamente outras regiões do país (PAMPLONA, 2018). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), houve falha humana na operação da subestação da usina de Belo Monte. Entretanto, a empresa responsável pela operação, a Belo Monte Transmissora de Energia (BMTE), diz que o problema foi agravado pela condição provisória do sistema, decorrente da ausência de uma segunda conexão prevista entre a usina e a subestação, que deveria estar em funcionamento desde a inauguração da usina, mas só entrou em operação na semana seguinte ao apagão.

Neste sentido, grandes demandas de energia elétrica podem requerer a implantação de novas fontes geradoras, que por sua vez, podem acarretar danos ao meio ambiente dependendo de como essas forem concebidas. Esta energia pode ser traduzida de diversas formas: ampliação da condição de luminosidade, redução dos sistemas climatizadores para mitigação dos efeitos de amplitude térmica, aparelhos com reduzida demanda de potência, etc.

Uma praça de pedágio é uma estrutura com demanda intensa e necessidade de elevada disponibilidade, necessitando assim de energia estável e economicamente atrativa. Um dos importantes aspectos de rodovias próximas a regiões metropolitanas é que o pico de fluxo se dá no horário de pico de fornecimento de energia; isto significa que a praça demanda mais energia para seu funcionamento no horário de tarifa mais elevada. Para que se tenha um conceito sustentável é necessário que se abracem vários tipos de dispositivos que possam melhor subsidiar o micro gerenciamento de demandas.

A geração de energia, ou colheita de energia (*Energy Harvesting*) já é objeto de diversos estudos no mundo; exemplos de rodovias com pavimentos munidos de placas fotovoltaicas vêm trazendo um importante conceito para as rodovias autossustentáveis, a exemplo de Krommenie-Wormerveer, na Holanda (figura 1) que instalou a primeira "*Solar Road*" da Europa. Mais atualmente também foram veiculadas na mídia notícias da pintura dos pavimentos em Los Angeles na cor branca, para propiciar uma redução do calor absorvido pelos pavimentos,

sugerindo uma redução na temperatura do entorno que poderia chegar a uma variação de -10°C com relação ao pavimento asfáltico convencional (figura 2).

Figura 1 – Solar road em Krommenie, Amsterdã

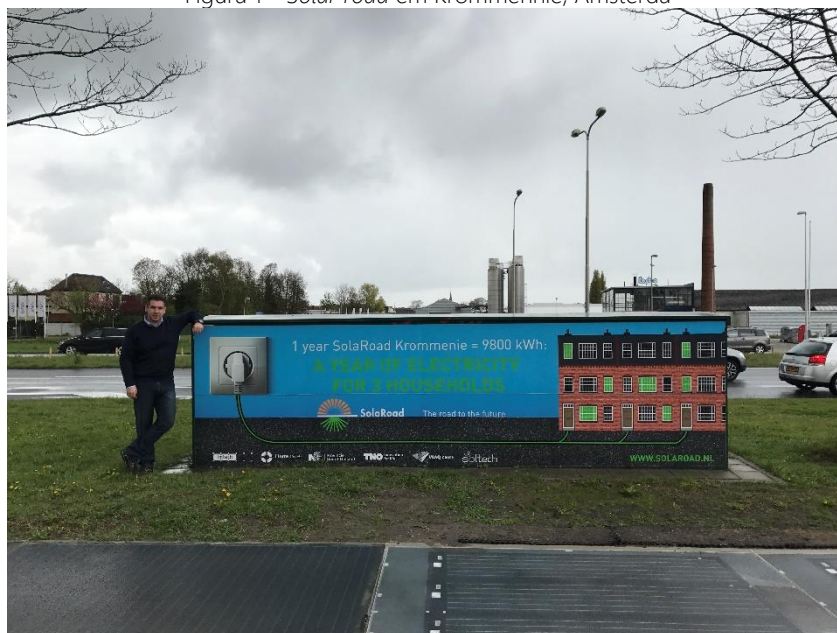


Figura 2 – “Pavimento Fresco” em teste na Califórnia – redução de até 10°C na temperatura do pavimento



A microgeração de energia através da ‘colheita de energia’, do inglês *energy harvesting*, consiste na utilização dos recursos energéticos renováveis disponíveis no meio ambiente para alimentação de dispositivos eletrônicos, ofertando uma fonte de energia limpa e sustentável. Esta abordagem vem sendo utilizada no desenvolvimento da humanidade, há muito tempo, com moinhos de vento e rodas d’água. Atualmente, utiliza-se fontes alternativas como energia térmica, solar e vibração. Essa demanda configura uma oportunidade para o desenvolvimento e utilização das microfontes alternativas, principalmente para aplicações que requerem baixo consumo.

O crescimento de produtos eletrônicos de baixa potência e consumo de energia ultrabaixo permitiu um rápido crescimento de dispositivos autossuficientes, podendo ser de dispositivos móveis com baixo consumo a sensores independentes e redes de sensores usados na

monitoração ambiental, industrial e militar. Assim, a gama de aplicações tem sido impactada por tais tecnologias em áreas como aeronáutica, engenharia civil, engenharia biomédica, domótica, dentre outras.

Equipamentos eletrônicos alimentados com baterias promoveram a difusão inicial destes dispositivos portáteis, graças à sua autonomia e capacidade relativamente alta de armazenamento de energia. Contudo, elas tornaram-se um problema no desenvolvimento destes equipamentos, especialmente quando lidam com sensores *place and forget*, quando estes dispositivos são utilizados em locais de difícil acesso. Com a utilização de baterias criou-se o problema associado à manutenção: substituição, vida útil limitada e preocupações ambientais com o processo de reciclagem e descarte.

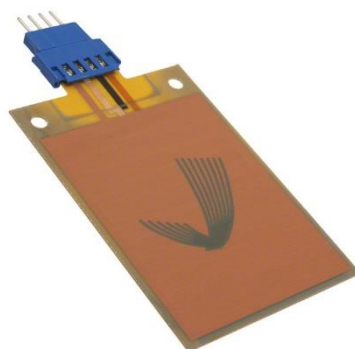
Durante a última década, o interesse na utilização de fontes de energia presentes no ambiente para alimentar sistemas eletrônicos de baixa potência tem sido um crescente. Na Colheita de Energia, a mesma é coletada do ambiente e entregue a uma carga, através de micro geradores capazes de converter a energia disponível no ambiente em energia elétrica. Inicialmente, o argumento ambiental para captação de energia não exige a utilização de centrais elétricas de maior porte. Define-se Colheita de Energia como o processo de alimentar pequenos dispositivos eletrônicos a partir do aproveitamento energético de variáveis presentes no ambiente, que de alguma forma, estava sendo desperdiçada.

Muitas fontes de captação estão presentes no ambiente próximo ao dispositivo, por exemplo: vibrações, radiações eletromagnéticas, radiações fotônicas, gradientes de temperatura, dentre outros. Muitos efeitos conhecidos podem ser utilizados na conversão com cada uma das fontes com piezoelectricidade, eletromagnetismo, eletrostática, piroelectricidade, efeito Seebeck.

A micro geração de energia através de transdutores piezoelétricos baseia-se na conversão de energia mecânica em energia elétrica a partir da deformação. Sua utilização é uma tendência em aplicações como nos sensores sem fio, onde a localização dificulta a instalação de sistemas cabeados e existe a necessidade de alimentação dos mesmos. Em certas aplicações ocorre a integração de geração a partir da vibração mecânica com outras fontes como, por exemplo, solar e térmica.

Em faixas de rodagem, com a passagem de automóveis, ocorre a deformação mecânica das mesmas. O princípio piezoelétrico pode ser utilizado para transformar essa energia mecânica em elétrica para alimentar sistemas de baixa potência. Atualmente, elementos coletores de energia são disponibilizados, como pode ser observado na figura 3. Esse dispositivo pode gerar até 15 mW.

Figura 3 – Elemento coletor de energia piezoelétrico



Trazer estes conceitos para dentro de uma edificação de alta demanda energética será seguramente uma demanda para o próximo ciclo de 30 anos. Pensar nas ferramentas que parecem hoje ainda incipientes é assegurar lugar para elas no futuro e garantir a natural evolução tecnológica.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo principal avaliar estratégias de eficiência energéticas que possam ser aplicadas a praças de pedágio rodoviária com a intenção de melhorar condições de conforto, segurança e otimização dos recursos de disponibilidade energética, demonstrando soluções que se encaixem dentro do perfil de uso destas praças no futuro próximo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos desta pesquisa:

- estudar as novas ferramentas para gerenciamento de energia em edificações comerciais que possam ser adequadas a uma praça de pedágio;
- sugerir conceitos de domótica¹ e microgeração de energia nestas edificações;
- estudar a viabilidade técnica para a utilização de coletores de energia do tipo piezoelétrico em uma rodovia;
- avaliação da potência e energia gerada nas condições propostas;
- prova de conceito do funcionamento do sistema através do projeto de subsistema de sinalização horizontal com tachas sinalizadoras de fluxo autoalimentadas.

1.4 ETAPAS E MÉTODOS DA PESQUISA

As etapas do projeto realizadas visando o atendimento dos objetivos propostos estão abaixo descritas. Também estão referenciados os itens deste relatório onde cada item foi aludido.

Etapas 1 - Formas de eficiência nas praças de pedágio - Conceituação

- Revisão da literatura sobre novos sistemas de microgeração de energia e domótica aplicáveis à praça pedágio (item 2.2)
- Mapeamento dos sistemas existentes e demandas de energia (item 2.3)
- Modo de cobrança dos sistemas de abastecimento de energia – concessionária elétrica *versus* geração autônoma (item 2.4)

¹ O termo domótica resulta da junção da palavra latina "Domus" (casa) com "Robótica" (controle automatizado de algo). É este último elemento que rentabiliza o sistema, simplificando a vida diária das pessoas, satisfazendo as suas necessidades de comunicação, de conforto e segurança

Etapas 2 - Geração de energia a partir dos pavimentos

- Revisão da literatura em geração de energia através de pavimentos (item 3.1)
- Tipos de geração e sensores utilizados (item 3.4.1)
- Montagem de sensores para geração de energia (3.4.2)
- Estudo de cargas e potenciais de geração por tipo de sistema (itens 3.1, 3.2 e 3.3)
- Proposta para uma prova de conceito - uso de sistemas de geração para auxílio da sinalização das praças (item 3.4)
- Implantação de um sistema para prova de conceito em sinalização com geração de energia a partir de pavimentos (Item 3.4.3)
- Coleta de dados da geração (corrente, disponibilidade, características) (item 3.4.4)
- Avaliação do sistema instalado e proposta para uso em praças de pedágio rodoviárias (item 3.5)

Etapas 3 - Recomendações para melhorias de eficiência energética nas praças de pedágio

- Discussão sobre o sistema de abastecimento de energia com recomendações para otimização de eficiência (4.1)
- Desafios nos abastecimentos pontuais ao longo da rodovia e potencial do uso da microgeração para abastecimento de sistemas ITS (4.2)
- Sistemas de domótica com potencial de utilização nas praças de pedágio e sistemas inteligentes futuros (diversos itens)

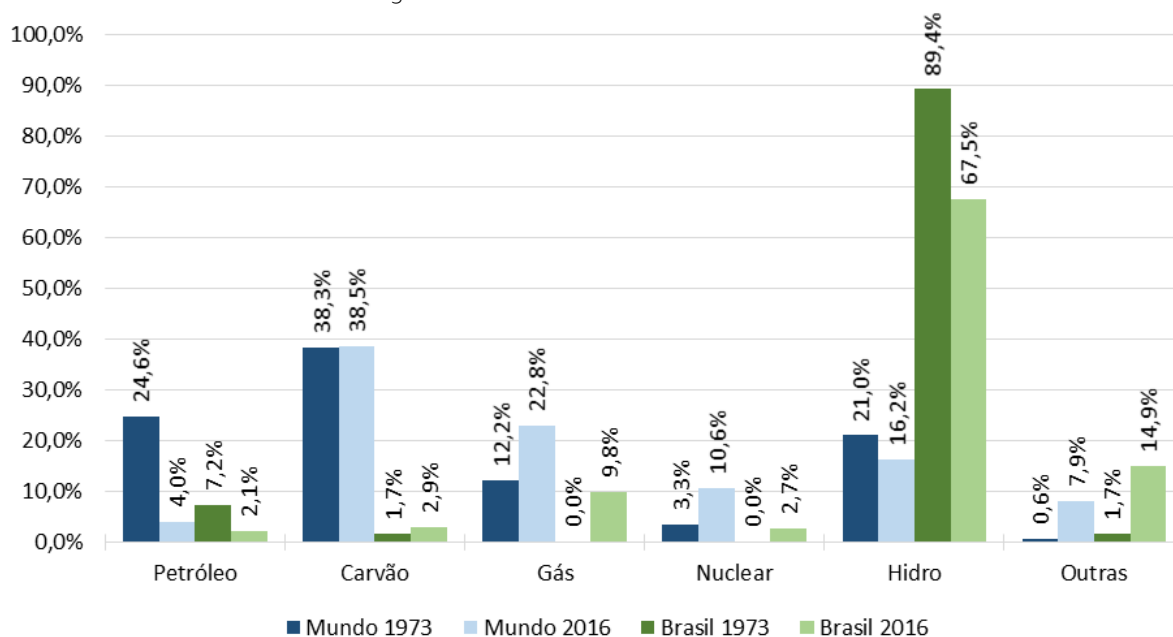
2 FORMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS PRAÇAS DE PEDÁGIO

A partir da Revolução Industrial, em meados do século XVIII, o mundo começou a depender intensamente da energia extraída da natureza. Lenha, carvão e petróleo eram amplamente utilizados para alimentar máquinas e meios de transporte, assim como para trazer conforto às residências que se tornavam cada vez mais numerosas nos grandes centros urbanos. Com o avanço da tecnologia, essa alimentação foi aos poucos sendo substituída por outras de maior eficiência e segurança, como derivados do petróleo e eletricidade.

Nos dias de hoje, é praticamente impossível imaginar o nosso cotidiano sem energia elétrica. Nossa dependência da eletricidade muitas vezes passa despercebida, pois tomamos como certa a sua oferta. Mas bastam alguns minutos de falta de energia para nos darmos conta da importância e do impacto que ela tem sobre a vida moderna. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017a), a produção mundial de energia elétrica em 1973 foi de 6.115 TWh. Em 2016, esse número cresceu para aproximadamente 24.789 TWh, um aumento de mais de 300% em menos de 45 anos.

Esse aumento veio acompanhado de um crescimento do uso de fontes não-renováveis de energia, como gás, carvão e energia nuclear, como pode ser observado na figura 4. Consequentemente, aumentaram os problemas relacionados com o meio ambiente, como poluição, emissão de CO₂, elevação da temperatura global, entre outros. Segundo Rütther (2004), todas as usinas geradoras convencionais têm problemas inerentes, tais como poluição (e.g. usinas termelétricas a óleo ou carvão), dependência de fornecimento de combustível (e.g. óleo, carvão, urânio) ou oposição do público quanto à sua construção e operação (e.g. usinas nucleares, térmicas a carvão e também hidroelétricas). Além disto, usinas geradoras centralizadas deixam um grande número de consumidores vulneráveis a *blackouts* elétricos. Com isso, vem crescendo nos últimos anos, a conscientização da necessidade de buscarmos fontes alternativas de energia, que exerçam menos impacto na natureza e não esgotem nossos recursos naturais.

Figura 4 - Matriz elétrica brasileira e mundial



(fonte: adaptado de MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017a)

Comparado a maioria dos países, o Brasil possui uma matriz elétrica muito mais limpa do que a média mundial. Em 2016, 80,4% de toda a oferta interna de energia elétrica nacional veio de fontes renováveis (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017a). Entretanto, o Brasil ainda é fortemente dependente da energia proveniente das hidrelétricas. De toda a energia gerada no país em 2016, 67,5% foram extraídos dessa única fonte. Embora isso seja interessante para o meio ambiente, essa grande dependência das águas pode apresentar um alto risco para a distribuição de energia nacional. A crise energética de 2001 e o consequente racionamento de energia elétrica na época são provas disso. A falta de investimentos no setor somada ao longo período de estiagem culminou no déficit de geração de energia elétrica no país, trazendo apagões e a necessidade do racionamento de energia (BARDELIN, 2004).

Com relação aos investimentos no setor, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (2018), ao final de maio de 2018 existiam 6.807 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação no Brasil, totalizando 159.067.773 kW de potência instalada. A agência ainda prevê uma adição de 17.310.768 kW na capacidade de geração do país, proveniente de 192 empreendimentos em construção e 392 novos empreendimentos para o futuro. As tabelas a seguir resumem os empreendimentos em operação (tabela 1), em construção (tabela 2) e com construção prevista para os próximos anos (tabela 3). Os dados são atualizados frequentemente, sendo os apresentados a seguir referentes a 23 de maio de 2018.

Tabela 1 – Empreendimentos geradores de energia elétrica em operação

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Relação Potência Fiscalizada/Total
Central Geradora Hidrelétrica	676	645.585	647.821	0,41%
Central Geradora Undi-elétrica	1	50	50	0,00%
Central Geradora Eólica	526	12.888.439	12.865.643	8,09%
Pequena Central Hidrelétrica	425	5.055.119	5.030.853	3,16%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	1.948	1.306.205	1.283.947	0,81%
Usina Hidrelétrica	220	101.897.047	95.794.468	60,22%
Usina Termelétrica	3.009	43.213.115	41.454.991	26,06%
Usina Termonuclear	2	1.990.000	1.990.000	1,25%
Total	6.807	166.995.560	159.067.773	100,00%

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018)

Tabela 2 – Empreendimentos geradores de energia elétrica em construção

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Relação Potência Outorgada/Total
Central Geradora Hidrelétrica	5	4.898	0,06%
Central Geradora Eólica	111	2.521.650	30,39%
Pequena Central Hidrelétrica	26	306.610	3,69%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	17	490.220	5,91%
Usina Hidrelétrica	6	1.254.100	15,11%
Usina Termelétrica	26	2.371.262	28,57%
Usina Termonuclear	1	1.350.000	16,27%
Total	192	8.298.740	100,00%

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018)

Tabela 3 – Empreendimentos geradores de energia elétrica previstos

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Relação Potência Outorgada /Total
Central Geradora Hidrelétrica	2	2.512	0,03%
Central Geradora Eólica	97	2.145.110	23,80%
Pequena Central Hidrelétrica	126	1.656.068	18,38%
Central Geradora Solar Fotovoltaica	46	1.120.291	12,43%
Usina Hidrelétrica	7	694.180	7,70%
Usina Termelétrica	114	3.393.867	37,66%
Total	392	9.012.028	100,00%

(fonte: adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018)

Em particular nas praças de pedágio em rodovias, além das questões já citadas, a distância pode ser um agravante para o fornecimento de energia. Muitas vezes, essas praças não estão inseridas dentro de grandes centros urbanos, sendo necessária a implantação de vários quilômetros de linhas de transmissão para alimentar essas instalações. Com a distância, crescem as dificuldades no fornecimento e a probabilidade de falha na entrega do serviço de energia. Como forma de mitigar esses riscos, atualmente muitas praças de pedágio trabalham com sistemas de *backup* que variam entre geradores a diesel, painéis solares, bancos de baterias, etc. Além disso, a necessidade de desenvolvimento de complexos estudos de licenciamento ambiental e grandes investimentos em obras para grandes centrais de geração de energia incentivam o estudo e projeto de fontes energéticas renováveis e próximas ao local que alimentam.

Considerando a necessidade de manutenção, conservação e construção de novas rodovias no Brasil, o número de praças de pedágio tende a aumentar e, conseqüentemente, novas e maiores demandas energéticas existirão. O aumento da demanda de energia, o crescimento da conscientização quanto ao meio ambiente, a necessidade de diversificação das fontes de energia elétrica e as complicações decorrentes da distância fazem com que surja a necessidade de soluções alternativas sustentáveis para atender a demanda de energia elétrica em praças de pedágio. Desse modo, é de grande importância a pesquisa de novas formas de geração de energia, bem como utilizar tecnologias já confirmadas, que geram energia sem utilização de recursos não-renováveis. Sendo assim, a seguir são apresentados dois grupos de soluções possíveis para esse cenário: a redução da demanda de energia, por meio da otimização da eficiência energética; e o aumento da oferta de energia, por meio da microgeração elétrica dentro da própria praça de pedágio. Especialmente nessa pesquisa será estudado de forma experimental a microgeração de energia elétrica através de sensores piezoelétricos.

2.1 OTIMIZAÇÃO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A abundância de combustível barato após a II Guerra Mundial e a enorme expansão das técnicas construtivas, fizeram que os arquitetos passassem a desconsiderar a questão ambiental da arquitetura (CORBELLÁ; YANNAS, 2009). Com o desenvolvimento de novos sistemas artificiais para o condicionamento de ar e iluminação, tornou-se mais fácil adquirir conforto térmico e, com isso, os projetistas passaram a ignorar as características climáticas.

Segundo Lukiantchuki (2010), a crise do Petróleo e as preocupações ambientais relacionadas à exploração dos recursos naturais da década de 70 despertaram a atenção para temas como a

eficiência energética. As primeiras ações ambientais começam a ser exploradas em todos os campos. Segundo a autora, o avanço no campo da bioclimatologia e da eficiência energética dos últimos anos não demonstrou uma influência eficaz sobre as práticas de projeto de arquitetos.

Guimarães (2010) enfatiza a diferença na nossa perspectiva histórica, onde a história de ontem trazia como consequência da Segunda Guerra Mundial a necessidade de medidas urgentes no sentido de reestruturar as cidades europeias de maneira geral. Atualmente, o grande desafio da arquitetura é propor soluções capazes de reverter ou amenizar os efeitos da crise ambiental energética. Os êxitos não dependem exclusivamente das iniciativas do primeiro mundo, mas de um elevado nível de consciência e mobilização por parte de todas as nações diante da gravidade do problema.

Nos dias atuais, cresce o número de empreendimentos com certificação ambiental, como exemplo os selos mais conhecidos *LEED* e *Aqua*. Entre os diversos benefícios obtidos em decorrência dos requisitos atendidos, pode-se citar a diminuição de custos operacionais, melhorias da saúde e bem-estar dos trabalhadores através de melhores condições no ambiente, uso racional e redução da extração dos recursos naturais do meio ambiente, economia no consumo de energia, redução de emissões atmosféricas, entre outros. Estes itens são associados ao conforto do usuário em uma edificação e minimização de impactos no meio ambiente.

Diferente das grandes cidades, os locais onde geralmente estão alocadas as praças de pedágio possuem um ambiente mais natural em relação à movimentação do ar e incidência solar, tornando possível que o projeto de edificações no entorno possa ser melhor desenvolvido. Certamente o traçado da pista existente é um limitante, além de criar um “microclima”, mas menos intenso quando comparado à situação de grandes centros urbanos.

2.1.1 Climatização

A sensação térmica de cada pessoa apresenta inúmeras variáveis, mas, como em todos os processos, busca-se alguma forma de padronização, em um número menor possível, as diferentes temperaturas que podem ser consideradas agradáveis para a maioria. Condições específicas de metabolismo, vestimenta, tipo de atividade desenvolvida, e até mesmo questões psicológicas podem afetar no tipo de climatização e sua aceitação por parte do usuário. Além disso, grandes variações de temperatura também afetam diretamente a sensação térmica. Segundo Tanabe (1988), pode-se citar parâmetros físicos que influenciam no conforto térmico: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade. Já em relação aos fatores “humanos” podemos citar a taxa metabólica e o vestuário por exemplo.

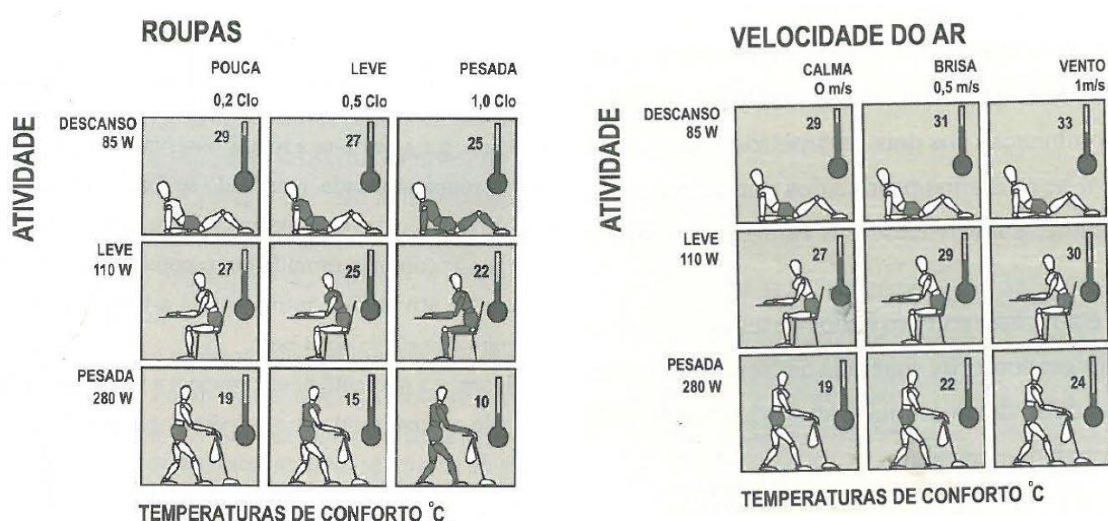
De acordo com Lamberts (2003), diversos fatores influenciam na sensação térmica experimentada pelo ser humano. As variáveis climáticas juntamente com as características individuais do ser humano relacionadas à percepção de calor e frio dificultam a padronização de uma temperatura ideal. Variáveis como temperatura, umidade e velocidade do ar, temperatura radiante, taxa metabólica corporal e índice de isolamento das roupas – além de outras, caracterizadas como psicofisiológicas, compõe as variáveis para atingir as condições ideais de conforto térmico.

Conforme citam Corbella & Yannas (2009), se a temperatura do ar for muito baixa há grande perda de calor, mas outros fatores influenciam na perda ou ganho de calor como a umidade

relativa do ar, a existência de radiação infravermelha de superfícies vizinhas, o movimento do ar, a radiação solar, o tipo de atividade e o vestuário.

Por experiência própria, sabe-se que o conforto térmico corporal está diretamente vinculado às atividades realizadas, tipo de roupa, umidade, ventilação e temperatura do ar. Seja em casa ou no escritório, é possível observar diferentes necessidades entre as pessoas em um ambiente conforme a variação de temperatura. Estudos realizados na área de conforto térmico apresentam a importância da movimentação do ar, do vestuário e atividades desenvolvidas em um ambiente em relação a temperatura e conforto térmico. A figura 5, extraída do livro “Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental” de Corbella & Yannas (2009), representa estas variáveis em relação ao conforto térmico.

Figura 5 – Conforto Térmico para duas situações: imagem da esquerda – roupas x atividade e imagem da direita velocidade do ar x atividade



(fonte: CORBELLA; YANNAS, 2009)

Conforme Corbella & Yannas (2009), na figura 5, imagem da esquerda variou-se o vestuário e as atividades para determinação do conforto térmico. Já na imagem da direita da figura 5, variou-se as atividades e a velocidade do ar na determinação da condição ideal considerada como de conforto térmico. Fato interessante que pode ser analisado é a influência da movimentação do ar na sensação térmica, de modo que temperaturas mais altas na presença de vento são agradáveis e na ausência de vento precisam ser diminuídas. A umidade relativa foi mantida em 60% em todos os casos, enfatizando que o controle da umidade e renovação do ar é sempre importante e necessário para manter níveis saudáveis em todos ambientes. É importante salientar que além destas influências, o conforto térmico depende da exposição à radiação infravermelha produzida pelos objetos e à radiação solar. Controlar os ganhos de calor é de grande importância para evitar que a estrutura irradie calor.

De modo geral, um ambiente em que o conforto térmico seja considerado agradável deve controlar ganhos ou perdas de calor, controlar a umidade e permitir a movimentação do ar. Deve-se pensar na sinergia das diferentes áreas de projetos, buscando controlar a entrada de energia solar, bem como a absorção destas pelas paredes e telhado.

Muitas vezes, o projeto ideal que possibilite uma maior ventilação não é possível em decorrência de diversos fatores, entre eles a necessidade de segurança que acaba por eliminar áreas de livre circulação, por exemplo. Sendo assim, a maioria dos prédios comerciais necessita de uma edificação com poucas aberturas, eliminando a possibilidade de conforto térmico em

decorrência da ventilação, justificando a instalação de climatização com utilização de ar condicionado. Mesmo assim, o projeto deve considerar o controle da iluminação e da incidência solar, fatores importantes na redução do consumo energético desnecessário.

Na utilização de ar condicionado, o projeto de aberturas capazes de isolar os ambientes de maneira eficiente é de grande importância para que se possa controlar as trocas de ar e manter a temperatura ideal. Ainda no caso de uso de ar condicionado, deve-se prever a utilização de exaustores ou ventiladores, permitindo uma movimentação do ar agradável e reduzindo a necessidade de temperaturas extremas que os aparelhos de ar condicionado podem atingir.

Considerando a utilização de ar condicionado, é mister que este propicie conforto térmico, eficiência energética e economia. Deste modo, o projeto deve definir o tipo de ar condicionado que deverá ser instalado, a sua localização, o uso do ambiente e os materiais construtivos do local. Além disso, deve-se prever e acompanhar a instalação dos equipamentos, bem como enfatizar a importância da manutenção periódica para um bom funcionamento de acordo com o projeto. Em relação às normas de climatização, cita-se a NR 17 do Ministério de Trabalho, a Resolução – RE/ANVISA nº 9, e a NBR ISO 9241-11:2011 que determinam diversos parâmetros para climatização e qualidade do ar.

Sobre os ambientes de trabalho, a NR17 do Ministério do Trabalho determina, entre outros itens, diretrizes para a climatização de ambientes:

“17.5.2. Nos locais de trabalho onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros, são recomendadas as seguintes condições de conforto:

- a) níveis de ruído de acordo com o estabelecido na NBR 10152, norma brasileira registrada no INMETRO;
- b) índice de temperatura efetiva entre 20°C (vinte) e 23°C (vinte e três graus centígrados);
- c) velocidade do ar não superior a 0,75m/s;
- d) umidade relativa do ar não inferior a 40 (quarenta) por cento”

Ainda, a NBR ISO 9241-11:2011 recomenda temperatura de 20 a 24 graus no verão e 23 a 26 graus no inverno, com umidade relativa entre 40% e 80%. Sobre a movimentação do ar, estabelece que esta não deve superior a 0,75 m/s.

Conforme a Resolução – RE/ANVISA nº 9 de 16 de janeiro de 2003, que cita padrões referentes à climatização e em ambientes de uso público e coletivo, e estabelece faixas de temperatura padrão que devem ser adotadas:

“A faixa recomendável de operação das Temperaturas de Bulbo Seco, nas condições internas para verão, deverá variar de 23°C a 26°C, com exceção de ambientes de arte que deverão operar entre 21°C e 23°C. A faixa máxima de operação deverá variar de 26°C a 27°C, com exceção das áreas de acesso que poderão operar até 28°C. A seleção da faixa depende da finalidade e do local da instalação. Para condições internas para inverno, a faixa recomendável de operação deverá variar de 20°C a 22°C.”

Os projetos de climatização devem considerar diversos fatores buscando o conforto dos usuários, como incidência de iluminação, irradiação de calor, potência necessária, disposição e uso dos ambientes, localização das saídas de ar, entre outros. Uma vez definidos todos os critérios, também é importante determinar e informar a temperatura padrão a ser adotada em um ambiente coletivo, permitindo que as pessoas possam prever um vestuário (entre outros

hábitos) que esteja de acordo com o ambiente. A definição de padrões através da automação dos aparelhos de ar condicionado, possibilitando o controle de temperatura, umidade, pressão, ventilação de acordo com as influências externas (incidência solar) e internas (número de funcionários e outras fontes de geração de calor) é de grande importância na eficiência, economia e conforto térmico. A interferência exercida através do controle pessoal da temperatura em ambientes coletivos é vista como prejudicial, tanto no quesito de eficiência e economia, como no conforto térmico das demais pessoas que estejam utilizando o mesmo ambiente.

Edificações projetadas para operar com ar condicionado devem considerar a maior vedação possível, de modo que trocas de ar sejam somente as necessárias para manter o ar saudável. Em se tratando de edificações normalmente existentes em praças de pedágio, o controle das aberturas das edificações adjacentes às faixas de cobrança é mais viável em comparação às cabines, já que estas necessitam áreas de abertura para cobrança e comunicação com o usuário da via. Soluções que minimizem a entrada de calor (ou frio dependendo da época e região) nas cabines devem ser aplicadas para permitir maior conforto térmico e menor gasto energético.

No caso das cabines, os projetos de climatização devem considerar que se trata de um ambiente utilizado de forma geralmente individual. Promover a automação da climatização nessas áreas e ao mesmo tempo permitir alternativas de conforto térmico com opções de variações de frio/calor previamente padronizadas é uma maneira eficiente de controle. Analisando as sensações térmicas provocadas pela movimentação do ar, prever uma ventilação eficiente pode reduzir a necessidade de temperaturas extremamente baixas do ar condicionado durante períodos muito quentes, onde diminuir a diferença de temperatura interna e externa certamente aumenta a eficiência dos aparelhos de ar condicionado e impacta na economia de energia. Ainda, buscando evitar temperaturas extremas e sensações desfavoráveis do usuário da cabine, é interessante que a climatização nas cabines seja prevista antes da entrada do funcionário através de automação. A sensação térmica nas cabines em horários de pico em dias quentes provavelmente seja a parte mais sensível do projeto de climatização. No desenvolvimento das cabines, é de grande importância o cuidado para renovação e manutenção da qualidade do ar, bem como uma temperatura que propicie conforto térmico para os operadores.

No que se refere as alternativas de climatização de ambientes temos diferentes sistemas, e suas utilizações devem ser definidas em projeto de acordo com as necessidades estabelecidas e recursos disponíveis. Basicamente, tem-se o sistema de climatização VRF (Fluxo de Gás Refrigerante Variável), onde existe um sistema de ar condicionado central e apenas uma condensadora externa ligada a várias evaporadoras internas. Há o Split, onde existe uma unidade evaporadora interna e outra condensadora externa, representado por diferentes modelos: convencional, *inverter*, frio ou quente/frio, de parede ou de teto/piso. Na questão de Split convencional e *inverter*, o modelo *inverter* representa um menor consumo energético e maior conforto térmico, pois o compressor funciona em rotação variável e contínua ao contrário do convencional, que tem funcionamento intermitente. Ambientes maiores geralmente utilizam refrigeração por expansão direta com centrais de água gelada.

Outras alternativas como geotermal, de modo a regular a temperatura ambiente com a temperatura do solo profundo, o qual apresenta pequenas amplitudes térmicas ao longo do ano, também podem ser consideradas. Nessa linha, estão sendo desenvolvidos estudos liderados pelo Professor Alberto Hernandez Neto, do grupo de Pesquisa em refrigeração, Ar Condicionado e Conforto Térmico (GREAC), Departamento de Engenharia Mecânica (PME) da Escola

Politécnica da Universidade de São Paulo. O objetivo é utilizar o sistema geotérmico para captações rasas de modo a utilizar para resfriamento de ambientes internos, visto que o solo apresenta temperaturas variando de 18 a 21°C em média ao longo do ano. Conforme dados da pesquisa, através da instalação do sistema em uma escola, a instalação do sistema é mais onerosa quando comparada com ar condicionado convencional, mas o consumo energético (proveniente de motores para permitir movimentação do ar) é quatro vezes menor.

Em se tratando de coeficiente de eficiência energética para ar condicionado do tipo Split tem-se quatro classes energéticas que podem ser comercializadas no Brasil: A, B, C e D. Na tabela 4 são apresentados os coeficientes de eficiência energética permitidos para de cada faixa.

Tabela 4 – Classe e coeficientes de eficiência energética para Split comercializados no Brasil

Classe	Coeficiente de eficiência energética (w/w)		
A	3,23	< CEE	
B	3,02	< CEE ≤	3,23
C	2,81	< CEE ≤	3,02
D	2,60	≤ CEE ≤	2,81

(fonte: adaptado de INMETRO, 2017)

Atualmente, a faixa E já não é mais comercializada no Brasil e há discussões para que em breve sejam estabelecidos planos para retiradas gradativas das faixas D e C, de modo a incentivar a comercialização de aparelhos mais eficientes. O Ministério de Minas e Energia (2017b) abriu consulta pública sobre a eficiência de refrigeradores, congeladores e condicionadores de ar, onde informa a intenção de eliminar a produção de equipamentos das faixas C e D.

“O setor residencial consumiu cerca de 29% do consumo total de energia elétrica no país em 2016, sendo estes equipamentos responsáveis em média por mais de 60% deste consumo. A proposta de novos níveis mínimos de eficiência energética para os refrigeradores, congeladores e condicionadores de ar fabricados e comercializados no país com a consequente retirada dos menos eficientes do mercado é uma política pública eficaz e impactante para promover o uso mais eficiente de energia elétrica atendendo as metas do planejamento energético estabelecidas pelo Ministério de Minas e Energia. A proposta é impactante e estabelece a retirada escalonada do mercado de duas faixas atuais de coeficiente de eficiência energética para o caso de condicionadores de ar e de níveis máximos de consumo para refrigeradores e congeladores do Programa Brasileiro de Etiquetagem, as C e D.”

No site da Anvisa é possível acessar as classificações de diferentes marcas de aparelhos de ar condicionado quanto a sua faixa de eficiência energética, de modo que alguns modelos de produtos já operam na faixa A (INMETRO, 2018).

No caso das edificações adjacentes, grande parte dos ambientes, como sala administrativa, almoxarifado, tesouraria, sala de convivência, descanso podem ser climatizadas e isoladas termicamente. No entanto, áreas como banheiro e cozinha devem ter um projeto que torne possível a não utilização de ar condicionado a maior parte do tempo, visto serem áreas que necessitam de grande circulação de ar, o que torna o uso de ar condicionado oneroso. Nesse caso, a importância de um projeto que considere e facilite a movimentação do ar e controle térmico são circunstanciais.

2.1.2 Iluminação

Conforme Corbella & Yannas (2009), o projeto de iluminação natural deve integrar-se ao de iluminação artificial evitando o desperdício de energia elétrica. Os projetos de iluminação devem considerar inicialmente o posicionamento solar da construção e definição da luminosidade natural onde a obra está inserida. Para permitir o uso da iluminação natural, devem ser definidas aberturas que permitam a entrada da luz externa, tomando o cuidado de avaliar se a quantidade de radiação solar é satisfatória para o ambiente. Poder contar com uma boa iluminação depende da organização dos espaços internos e seus usos, da definição das dimensões de abertura, das cores das superfícies internas, do controle da entrada de luz e dos materiais utilizados.

Sabe-se dos benefícios da luz natural, de modo que permitir o desenvolvimento de atividades sem utilização de luz artificial é satisfatório para o ser humano. Ao mesmo tempo, em decorrência de variações climáticas e horários de trabalho, entre outras condicionantes, sabemos que isto nem sempre é possível. Desse modo, é importante que um projeto de iluminação seja eficiente tanto do ponto de vista operacional como energético. Projetos de iluminação com utilização de sensores que possam detectar a necessidade de luz necessária para a atividade desenvolvida devem ser estudados e aplicados. Alternativas de utilização de algumas áreas com iluminação natural e outras não, devem ser avaliadas, sendo importante haver a possibilidade de controle de diferentes áreas conforme uso e iluminação natural que estas recebem em diferentes momentos.

De acordo com Corbella & Yannas (2009), o projeto pensado como um todo é de grande importância. Saber o tamanho correto para permitir a entrada de iluminação natural faz com que haja menor consumo energético em iluminação e evita grandes aberturas desnecessárias, que acarretam num aquecimento excessivo do ambiente.

Sobre os ambientes de trabalho, a NR17 do Ministério do Trabalho determina, entre outros itens, diretrizes para a iluminação de ambientes:

“17.5.3. Em todos os locais de trabalho deve haver iluminação adequada, natural ou artificial, geral ou suplementar, apropriada à natureza da atividade.

17.5.3.1. A iluminação geral deve ser uniformemente distribuída e difusa.

17.5.3.2. A iluminação geral ou suplementar deve ser projetada e instalada de forma a evitar ofuscamento, reflexos incômodos, sombras e contrastes excessivos.

17.5.3.3. Os níveis mínimos de iluminamento a serem observados nos locais de trabalho são os valores de iluminâncias estabelecidos na NBR 5413, norma brasileira registrada no INMETRO.

17.5.3.4. A medição dos níveis de iluminamento previstos no subitem 17.5.3.3 deve ser feita no campo de trabalho onde se realiza a tarefa visual, utilizando-se de luxímetro com fotocélula corrigida para a sensibilidade do olho humano e em função do ângulo de incidência.

17.5.3.5. Quando não puder ser definido o campo de trabalho previsto no subitem 17.5.3.4, este será um plano horizontal a 0,75m (setenta e cinco centímetros) do piso.”

A NBR ISO/CIE 8995-1:2013 (substitui a NBR 5413) especifica os requisitos de iluminação para locais de trabalho internos e as condições para que os profissionais desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança durante o período de atividade, indicando aspectos quantitativos e qualitativos da iluminação. Questões como controle de ofuscamento,

índice de reprodução de cor e níveis de iluminância são descritos na norma. Outras definições importantes constam na norma e devem ser consideradas em projetos de iluminação.

Referente a iluminação artificial, a adoção de equipamentos mais eficientes geralmente apresenta um custo de instalação menor quando comparados com o custo de energia atual praticado no país. Conforme Berni (2015), a eficiência de iluminação artificial está vinculada basicamente às características técnicas e ao rendimento de um conjunto de elementos, como: lâmpadas, luminárias, reatores, circuitos de distribuição, cores das superfícies internas, mobiliário, necessidades de iluminação do ambiente e utilização da luz natural. A eficiência, o rendimento luminoso e a vida útil dos equipamentos são aspectos importantes em um sistema de iluminação artificial.

Segundo Berni (2015), na iluminação artificial industrial podem ser utilizadas lâmpadas que produzem uma descarga elétrica de alta intensidade em seu interior, conforme tecnologia *High-Intensity Discharge* (HID). Estas são divididas em lâmpadas de baixa pressão (mercúrio fluorescente e sódio) e de alta pressão (mercúrio, sódio, mista e vapores metálicos). Buscando uniformidade e suavidade à propagação da luz, além de evitar qualquer tipo de sombreamento ou aquecimento do ambiente, o *LED Light Pipe* é um sistema de tubos ópticos de polycarbonato cristal com *Optical Lighting Film* (OLF), filme empregado na distribuição da luz através do processo de reflexão interna total. Recursos de iluminação com menor consumo de energia, tais como lâmpadas de indução magnética, combinam alta qualidade com elevada eficácia e lâmpadas de vida longa. Comparada a antiga lâmpada incandescente, a de indução magnética é cerca de quatro vezes mais eficiente e no mínimo 20 vezes mais durável. Esses sistemas proporcionam redução dos custos em consumo de energia e manutenção, especialmente nas instalações onde a iluminação é de difícil acesso e manutenção. Recursos em pesquisas de tecnologias de iluminação, incluindo sistemas de fibra óptica e tubos de luz que utilizam uma variedade de fontes de luz, como lâmpadas de enxofre, LEDs e sistemas híbridos de iluminação natural/artificial, oferecem inúmeras vantagens industriais.

Os *Light-Emitting Diodes* (LEDs – diodos emissores de luz) são vistos como a solução para a iluminação do futuro. Em vez de filamentos aquecidos em vácuo, como nas lâmpadas incandescentes, ou através da ionização de um gás, como nas lâmpadas fluorescentes, os LEDs são lâmpadas de estado sólido. Como pontos positivos, possuem maior durabilidade quando comparadas às melhores lâmpadas fluorescentes compactas atuais e consomem uma quantidade de energia muito menor. LEDs operam em baixa tensão (< 33 V) e oferecem segurança para os usuários durante sua instalação e operação, com vida útil de mais de 50 mil horas. Os *Organic Light-Emitting Diodes* (OLEDs – diodos orgânicos emissores de luz) são a novidade em termos de LEDs, pois podem ser fabricados de maneira mais rápida e barata. Os OLEDs são construídos com materiais à base de carbono, que podem ser produzidos em larga escala em indústrias químicas tradicionais, ao contrário dos LEDs tradicionais, os quais utilizam os mesmos materiais empregados na construção dos chips de computador, os chamados semicondutores. Pesquisadores do laboratório Pacific Northwest, nos Estados Unidos, sintetizaram um novo material que aumenta a eficiência energética dos OLEDs em 25%. O material emite uma luz azul profunda e pode ser a base para a construção de OLEDs brancos (BERNI, 2015).

Conforme reportagem da Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias – ABCR (2015a), a substituição da iluminação convencional por LED está presente em diversos setores e já ocorre em praças de pedágio. Como exemplo, pode-se citar a iluminação das pistas e praças de

pedágio da BR-163/MS, operada pela CCR MSVia. Na via, nove postos de pedágio e trechos ao longo da rodovia receberam novo sistema de iluminação baseado na tecnologia LED. A duração da lâmpada LED é geralmente superior a convencional, reduzindo o tempo de manutenção. Conforme Paulo Candura, especialista em iluminação pública com ênfase em gestão de projetos:

“Iluminação pública deve ser encarada como um meio de aumentar a segurança ao tráfego seja para o motorista ou para o pedestre. Nesse sentido, o LED desponta como tecnologia superior capaz de aumentar a visibilidade das vias, reduzir consumo energético e, adicionalmente, gerenciar o nível de luminosidade de acordo com a incidência de luz necessária”.

Em iluminação pública, estima-se que o LED pode reduzir o consumo de energia em mais de 50% se comparado às tecnologias tradicionais. Quanto ao descarte, Alexandre Ferrari cita:

“As lâmpadas de LED possuem o benefício de não conterem mercúrio em sua fórmula, o que facilita o seu descarte ao não poluir o meio ambiente”.

2.1.3 Superfícies externas

A discussão quanto à proteção das superfícies ao aquecimento ocorre visto que este estudo tem como foco a aplicação em construções inicialmente situadas no Brasil, país de clima tropical. Considerações diferentes podem ser avaliadas para regiões muito frias por exemplo, mas de forma geral as ações que buscam o tratamento térmico possuem características benéficas em diferentes condições climáticas. Conforme Corbella & Yannas (2009), para regiões tropicais a principal causa de desconforto se dá pelo ganho de calor produzido pela absorção de energia solar que atinge as superfícies dos ambientes construídos, seja pelas aberturas das construções ou por absorção desta energia pelas paredes e coberturas externas.

A construção desordenada acaba por abandonar itens essenciais para o desenvolvimento de projetos. Diretriz atualmente utilizada para obtenção de selos de qualidade, a orientação solar é o item inicial de projeto e determina a área da edificação que estará mais ou menos exposta ao aquecimento solar. As necessidades construtivas podem contar com dispositivos que reduzem a exposição ao sol em caso de grande exposição solar que não possam ser evitadas, como uso de vegetação, películas filtrantes ou geradoras de energia, *brise soleils*, marquises, tintas claras, tintas térmicas, etc. Além da orientação solar, o projeto deve considerar a utilização da movimentação do ar natural existente no local, de modo ajudar na renovação do ar, ventilação de telhados, passagens de ar, etc.

A definição dos materiais construtivos também influencia bastante no conforto térmico e deve ser considerada na fase de projeto. Referente ao tipo de material utilizado em construções, é importante avaliar o conceito de inércia térmica. Conforme Corbella & Yannas (2009), inércia térmica é a capacidade que os corpos têm de permanecer no estado em que se encontram em relação à temperatura. Uma edificação possui uma grande inércia térmica quando consegue conservar a temperatura interna. A disposição de determinados materiais dispostos no envelope ou nas divisões internas é responsável por regular as flutuações de temperatura, ajudando no conforto ambiental. Deve-se conhecer duas características principais dos materiais: a difusividade e a efusividade, onde a primeira é a propriedade do material em propagar uma onda de temperatura em meio sólido e a segunda é a propriedade de um material absorver energia térmica do ar num período de tempo.

Segundo Brito et al. (2017), materiais de mudança de fase (PCMs – *Phase Change Materials*) possuem capacidade de armazenamento térmico maior que materiais convencionais. Desse modo, dependendo do clima local, podem ser interessantes para aumentar a inércia térmica dos ambientes. Esses produtos são comercializados nos Estados Unidos e países europeus (como por exemplo parafina microencapsulada na Alemanha), mas ainda não são adaptados para a realidade brasileira.

Conforme Ikematsu (2007), diversos fatores climáticos determinam o clima em uma edificação, como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e a velocidade dos ventos. Esses fatores têm influência na transferência de calor entre a habitação e o meio ambiente através de paredes, telhados, portas e janelas.

Sabe-se que áreas que recebem maior incidência solar geralmente possuem algum tratamento especial de proteção. Esse tratamento deve considerar o conceito de inércia térmica, seja pela adoção do tipo de material, utilização de tintas térmicas, incremento de vegetação, entre outros. É mister enfatizar a importância do projeto arquitetônico quanto à orientação solar, consideração da ventilação e materiais construtivos, de modo que aliada a essas questões de projeto, existem soluções que podem ser aplicadas em construções existentes (remediando situações críticas) ou em projetos novos.

A utilização de telhado verde é uma opção construtiva que tem como premissas básicas a diminuição da sensação térmica em terraços, aumento da inércia térmica, diminuição da absorção de calor para o interior e diminuição da vazão do telhado em períodos chuvosos. A adoção de telhados verdes em projetos novos e, principalmente, em estruturas existentes deve considerar os esforços do peso próprio da estrutura bem como a impermeabilização da área. Referente a normas, não existe normatização para telhados verdes, de modo que apenas deve-se considerar a NBR 6120:1980 versão corrigida: 2000, que determina as diretrizes quanto às cargas para o cálculo de estruturas de edificações.

Telhados verdes, ecotelhados ou telhados vivos são estruturas que se caracterizam pela aplicação de cobertura vegetal nas edificações, considerando a impermeabilização e drenagem adequadas. Basicamente são compostas por uma camada de vegetação, uma camada de substrato (onde a água é retida e a vegetação é escorada) e uma vegetação camada de drenagem responsável pela retirada da água adicional (CASTRO, 2011).

Os telhados verdes podem ser de dois tipos diferentes, extensivo e intensivo. Conforme Pledge e Scholz-barth (2005), o extensivo é mais leve e raso, de 7 a 12 cm, destinado para o crescimento de plantas mais resistentes ao meio e de menor porte. O intensivo é mais elaborado e pode possuir paisagem com flores, jardins e até mesmo árvores. No mercado brasileiro também é oferecido o tipo de telhado semi-intensivo, uma opção intermediária.

Como referência mundial tem-se o telhado verde do *Green Roof* sobre a prefeitura de Chicago, com mais de 1.800 m² de área verde composta por de 20.000 plantas herbáceas e 100 arbustos, 40 videiras e 3 árvores. A figura 6 representa um típico dia de agosto com 90-95°F (aproximadamente 32-35°C), de modo que a temperatura no topo do prédio com o telhado verde é de 7-10°F menor (aproximadamente 26-30°C). No prédio ao lado, sem presença de vegetação, foi efetuada a medição da temperatura indicando pontos próximo a 150°F (aproximadamente 65°C).

Figura 6 – Comparação da temperatura de um prédio sem telhado verde e com o *Green Roof* sobre a prefeitura de Chicago.



(fonte: CHICAGO CLIMATE ACTION PLAN, 2008)

A sensação térmica na superfície é muito mais agradável com a presença da vegetação e propicia um isolamento térmico em relação ao andar inferior. Certamente a influência do aquecimento da superfície do prédio sem telhado verde será revertido em calor no ambiente logo abaixo da cobertura.

Beyer (2006), através de um estudo comparativo, analisou o desempenho térmico de um telhado verde sobre um telhado antigo convencional de amianto. Foram avaliadas duas estruturas: uma com e outra sem o telhado verde. No caso da estrutura com telhado verde a temperatura interna foi praticamente a mesma que a externa de 34°C a 39°C, geralmente com 1°C a menos. Já a estrutura sem o telhado verde a temperatura interna foi superior, variando de 43°C a 47°C, quase 10°C a mais que a temperatura externa. Outro fato observado foi que a temperatura interna durante a noite ficou mais quente.

Nesse experimento é possível perceber a inércia térmica maior da cobertura com a inserção do telhado verde. Ao mesmo tempo não há grande diminuição da temperatura a noite, de modo que se esta seja almejada, é importante promover uma ventilação.

Conforme Catuzzo (2013), ao analisar diversos casos de estudos com telhado verde conclui que além de absorver e emitir a maior parte da radiação, há o aumento da umidade em decorrência da evaporação, da evapotranspiração e redução do aquecimento. Como consequência, é uma boa opção para projetos em regiões denominadas "ilhas de calor".

Castro (2011) comenta que existem algumas limitações que precisam ser observadas no momento da implementação de um telhado verde. Para a maioria dos climas, os telhados verdes precisam ser compostos por espécies de plantas tolerantes a épocas de estiagem, sem precipitação, ou então prever um sistema de drenagem. Outra questão que deve ser considerada é o limite construtivo referente à inclinação, de modo que pode haver variação de 0 a 40°. Ainda, em alguns casos é importante salientar que a carga na estrutura de edificações existentes pode inviabilizar o uso.

Segundo Castro (2011), as coberturas verdes propiciam uma melhor distribuição do escoamento superficial através da diminuição da velocidade de liberação do excesso de água retido nos poros do substrato, além de uma redução do volume retidas por algumas espécies vegetais. Ainda, salienta que há alguma alteração na água quando comparada aos telhados convencionais, principalmente em relação aos valores de sólidos totais, fósforo total, nitrogênio, nitrato, turbidez

e DBO₅, sendo necessário algum tipo de tratamento caso pretenda-se utilizar a água para algum fim específico.

De forma geral, a aplicação de telhado verde em edificações tem como principais benefícios a melhoria do conforto ambiental, a proteção física do telhado contra as oscilações da temperatura, retenção temporária, diminuição do escoamento pluvial e possíveis melhorias na qualidade do ar e da água escoada. Além de ambientais, o investimento em telhados verdes pode proporcionar economias em outras áreas de projeto, como menor diâmetro de tubulações, evitar necessidade de grandes bacias de retenção, diminuir temperatura interna em climas quentes com consequente diminuição de uso de ar condicionado, entre outros itens. Questões de qualidade da água dependem do tipo de substrato, fertilizante e outros componentes da construção do telhado, e devem ser avaliados ao longo do tempo.

Outro item bastante utilizado atualmente para tratamento de superfícies externas é a tinta térmica. Segundo Ikematsu (2007), nos Estados Unidos a utilização de produtos como telhas, tintas e barreiras radiantes é uma alternativa na redução do consumo energético e aumento do conforto térmico.

Em se tratando de absorção ou não da radiação é importante o conceito de refletância. Conforme NBR 15220, a refletância à radiação é definida como o quociente da taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície, de modo que os valores variam de 0 a 1. O valor de 1 é considerado para uma superfície que reflete toda radiação incidente. Já a emitância é quantidade de energia emitida por uma superfície em comparação com um corpo negro ideal, que emite 100%. Revestimentos frios são considerados como de alta refletância e emitância (PEREIRA, 2014).

Prado (1961) apresenta valores de refletância para diferentes cores, de modo que na tabela 5 são apresentadas algumas cores. É possível observar que cores claras são naturalmente mais refletivas e consequentemente absorvem menos calor. Mas sabe-se que a cor não é o único fator na determinação de refletância, a composição dos materiais também possui grande interferência de modo que novas tecnologias oferecem alta refletância até mesmo em cores diferentes.

Tabela 5 – Fatores de reflexão (r) de algumas cores

CORES	p (%)
Escuras	15-30
Médias	30-50
Claras	50-70
Branças	85-95
Verde	12-60
Vermelha	10-35

(fonte: adaptado de PRADO, 1961)

Em seu estudo, Ikematsu (2007) aplicou diversas cores de tintas em uma telha de fibrocimento, de modo que, exceto a de cor branca, nenhuma apresentou redução significativa da temperatura superficial. Comparando tintas refletivas (com pigmentos cerâmicos refletivos) com tintas convencionais há uma correlação dos valores de refletância em relação às cores. Mas existe grande diferença na refletância à radiação infravermelha, de modo que as tintas refletivas apresentam refletância elevada. Desse modo, a utilização de apenas cores claras, não é indicativo

de alta refletância à radiação solar, tintas escuras e sem brilho também podem apresentar elevada refletância à radiação infravermelha de acordo com sua composição.

Conforme Castro et al. (2003), a refletância das cores não é a mesma nas parcelas visível e de infravermelho do espectro solar, de modo que cores claras podem apresentar baixa refletância no infravermelho e alta no visível, totalizando baixa refletância. O contrário também foi observado no caso de tintas escuras. Segundo Pereira (2014), deve-se realizar uma análise espectral para determinar a refletância, para determinar o comprimento de onda da radiação incidente.

Pereira (2014) conclui com base em diversos estudos que em regiões de clima quente é importante a adoção de revestimentos externos de alta refletância. Revestimentos refletivos são os que refletem grande parte da radiação solar, absorvendo menos calor que os demais materiais. Estudos apresentam que a economia com energia de resfriamento em edificações com uso de materiais refletivos pode chegar a 80% em residências e 35% em ambientes coletivos. Analisando diversos estudos é difícil determinar a redução exata que a utilização de revestimentos refletivos pode provocar, por conta de fatores de clima local, material da construção de toda edificação, etc.

Juntamente com tintas, deve-se considerar o tipo de cobertura utilizado. Nessa questão, Michels (2007) cita que as telhas cerâmicas apresentam melhor desempenho térmico do que as de fibrocimento devido a sua capacidade de absorção de água. Deste modo, a água proveniente de condensação durante a noite propicia que parte da radiação que incide seja utilizada na evaporação durante o dia, antes que as telhas comecem a aquecer.

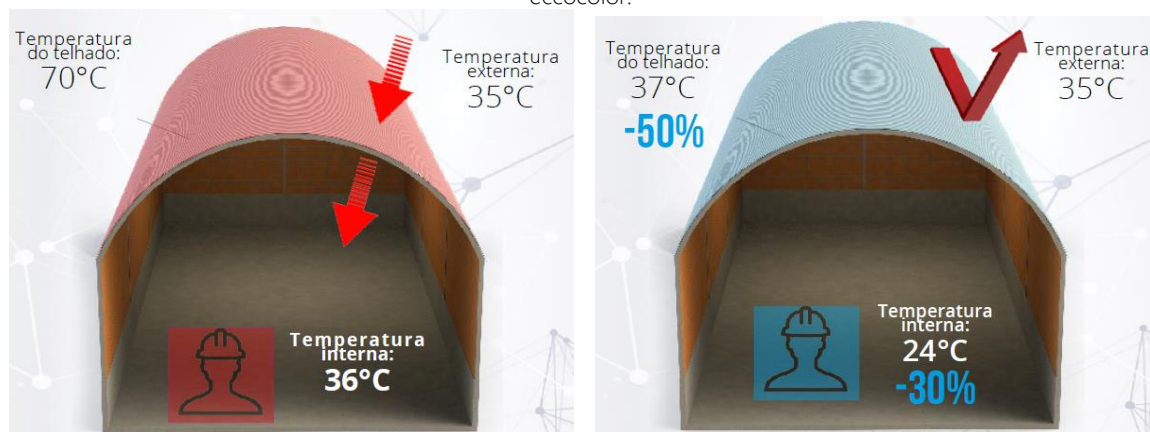
Conforme Pereira (2014), há estudos de materiais termocrômico, que mudariam sua refletância de acordo com a temperatura, possibilitando a absorção de radiação em épocas frias. Esta seria uma solução viável para lugares que apresentam períodos equivalentes de frio e calor. Mas ainda não existem conclusões e produtos em aplicação para esta tecnologia. Valores de refletância diferenciados podem ser considerados de acordo com o clima local. O autor cita que os materiais de alta refletância devem ser utilizados em locais de clima predominantemente quente, visto a possibilidade de provocar a necessidade de aquecimento em períodos frios, e enfatiza a importância da manutenção das superfícies de alta refletância, visto sua redução de refletividade como na presença de sujeira por exemplo.

Através de análise computacional, Pereira (2014) busca uma maneira para definir valores de refletância solar e emitância térmica mais indicado para edificações nos diferentes climas brasileiros. De forma geral, na maior parte do território brasileiro alta refletância e alta emitância são requeridas, mas em regiões mais frias, baixa emitância pode ser considerada para evitar necessidade de aquecimento no inverno.

Referente ao mercado atual, sabe-se da existência de tinta utilizada para isolamento térmico industrial – Eccolust. Importante também no conforto térmico, conforme indicações técnicas o material ajuda na eliminação da condensação através da pintura interna. Segundo as descrições do fabricante, telhados tradicionais podem atingir temperaturas de 80°C através do aquecimento dos raios solares. Como já foi discutido, esse calor é transferido para o interior dos ambientes. Deste modo, o fabricante propõe que com a aplicação de Eccocolor (tinta térmica da empresa Eccolust) o telhado reflete 96% dos raios solares UVA e UVB através de microesferas de boro-silicato, não somente por ser branca, já que dispõe de 469 cores para o produto. A aplicação indica a redução em até 50% a temperatura do telhado e 30% a temperatura interna. Na figura

7 é apresentado o resultado esperado com a aplicação do produto. Ainda, em climas frios, a aplicação do produto ajuda a preservar a temperatura interna. Na especificação, consta que o produto é autolimpante. Existem vários locais que o produto já foi aplicado, mais informações podem ser acessadas no site da empresa: <http://www.eccolust.com.br/eccocolor.php>.

Figura 7 – Imagem da direita sem aplicação do produto x imagem da esquerda com aplicação do produto eccocolor.



(fonte: ECCOLUST, 2018)

2.2 MICROGERAÇÃO DE ENERGIA E DOMÓTICA APLICÁVEIS À PRAÇAS DE PEDÁGIO

Embora exija, muitas vezes, um investimento inicial considerável, a microgeração de energia no âmbito da própria praça de pedágio talvez seja a solução mais interessante a longo prazo. Primeiramente, essa solução proporciona uma maior autonomia energética da praça de pedágio, uma vez que ela deixa de depender exclusivamente da eletricidade fornecida pelas concessionárias de energia elétrica. Com isso, os impactos de eventuais falhas na entrega do serviço elétrico podem ser minimizados ou até mesmo completamente eliminados. Além disso, a eletricidade gerada internamente na praça de pedágio deixa de ser consumida da rede geral, ficando disponível para outros clientes da concessionária de energia e reduzindo os gastos com as contas de luz. Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regularizou a micro e mini geração de energia, permitindo a ligação com a rede convencional de energia elétrica através da Resolução n. 482. Desde então, é possível “emprestar” a energia gerada pela própria unidade consumidora à concessionária de energia em troca de créditos de energia ativa, que devem ser consumidos dentro de um prazo de até 60 meses (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

A microgeração de energia dentro de praças de pedágio pode ocorrer, basicamente, de duas formas distintas: com o uso de geradores a base de combustíveis ou a partir da extração de energia do próprio meio. Com relação aos combustíveis, os mais comuns são o diesel e os biocombustíveis. Já para a extração de energia do meio, Wang et al. (2018) relatam que diversas fontes são normalmente utilizadas, sendo solar, eólica, hidráulica, termal e cinética as mais comuns, e que outras técnicas vêm sendo aplicadas, como piezoelétrica, termoelétrica, eletromagnética e fotovoltaica. Ainda segundo os autores, a quantidade de energia extraída do meio pode variar significativamente de acordo com o método utilizado. Alguns possuem um maior potencial de geração de energia, sendo aplicáveis diretamente no abastecimento e na

matriz elétrica. Por outro lado, os métodos que geram uma quantidade menor de energia ainda podem ser utilizados em iluminação, dispositivos de tráfego autossuficientes ou aquecimento do pavimento em regiões com risco de congelamento da pista. Importante salientar que a eficiência energética e a capacidade de geração de métodos novos geralmente tendem a uma evolução rápida que os tornam viáveis, caso de muitas tecnologias consagradas atualmente que em algum momento eram consideradas pouco viáveis em decorrência de investimentos e capacidade de geração energética efetiva.

2.2.1 Geradores alimentados por combustíveis

Atualmente, essa é a forma mais comum de geração de energia elétrica em praças de pedágio. Os geradores são normalmente abastecidos com óleo diesel e são utilizados como fonte secundária de energia, para suprir pelo menos parte da demanda em casos de eventuais faltas de energia elétrica. O consumo de combustível e a capacidade de produção de energia variam de acordo com o modelo do gerador utilizado, que pode ser dimensionado de acordo com a demanda local. Estudos realizados por Castellaneli et al. (2007) em praças de pedágio no Rio Grande do Sul apontam que os geradores consumiam, em média, 2,5 e 3,2 L de óleo diesel por hora para gerar, respectivamente, 81 e 180 kVA/h.

Embora seja uma alternativa viável para suprir a demanda de energia em situações de emergência, o consumo de óleo diesel não é a alternativa mais econômica, além de ter como consequência grandes impactos ambientais. O custo da eletricidade gerada a partir dos motores a óleo diesel chega a ser 2,7 vezes o valor cobrado pelas concessionárias de energia elétrica (CASTELLANELLI et al., 2007). Além disso, os motores a diesel têm índices elevados de emissão de poluentes como dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx).

Como alternativa ao óleo diesel, os mesmos geradores podem ser alimentados por combustíveis menos nocivos ao meio ambiente, como o biodiesel. Apesar de ser um pouco menos eficiente do que o diesel convencional, o ganho econômico e ambiental é enorme. Segundo Castellaneli et al. (2007), o biodiesel obtido do óleo de fritura seria uma opção muito vantajosa. Além de dar destino ao resíduo que já possui uma rede de coleta definida e que necessita de receptores para viabilizar o processo, a redução das emissões nos geradores alimentados com o biodiesel é considerável quando comparamos com motores a óleo diesel: -42,2% nas emissões de CO₂, -37,7% nas de HC e -13,0% nas de NOx, em média. Economicamente, os benefícios também são expressivos. O custo para atender a mesma demanda energética com os geradores movidos a biodiesel foi 70,7% inferior ao dos geradores a óleo diesel, sendo mais barata, inclusive, que a eletricidade fornecida pelas próprias concessionárias (-21,8%).

2.2.2 Energia solar

Possivelmente uma das fontes alternativas mais promissoras do ponto de vista ambiental, a energia solar baseia-se em gerar eletricidade a partir da radiação emitida pelo Sol. Em média, a superfície da Terra recebe do Sol cerca de 10.000 vezes mais energia do que o consumido por toda a sua população (MACHADO; MIRANDA, 2015). Infelizmente, ainda perdemos grande parte

dessa energia por conta da ineficiência da conversão para energia elétrica, e os custos de implantação dos dispositivos são elevados e dependem de incentivos do governo, como redução de impostos por exemplo. Por outro lado, isso incentiva, cada vez mais, a pesquisa e o desenvolvimento de métodos de extração e conversão da energia solar em eletricidade.

Embora seja extremamente abundante na Terra, a radiação solar não é uniformemente distribuída através de toda a superfície do planeta. Regiões com maior incidência de dias nublados têm um potencial bastante limitado para geração de energia a partir do Sol, motivo pela qual a energia é tratada apenas como alternativa. Por outro lado, países como o Brasil possuem uma enorme incidência de radiação durante todo ou grande parte do ano, o que torna a energia solar muito mais eficiente e viável.

2.2.2.1 Células Fotovoltaicas

Uma das formas de converter a energia solar em eletricidade é através do efeito fotovoltaico, descoberto pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839. O efeito ocorre em materiais semicondutores expostos à radiação solar, gerando uma corrente elétrica enquanto durar a exposição. Grande parte das células fotovoltaicas disponíveis no mercado são feitas de cristais de silício dopados com outros elementos, como fósforo e boro. A dopagem do silício com fósforo acrescenta elétrons ao cristal, tornando-o carregado negativamente (tipo n). Por outro lado, a dopagem com boro deixa o cristal com menos elétrons, carregando-o positivamente (tipo p). As células fotovoltaicas são constituídas de uma camada do semicondutor tipo n e outra do tipo p. Quando expostas à radiação solar, a energia dos fótons é capaz de mover os elétrons entre as camadas, criando uma corrente elétrica contínua.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos sobre a utilização de tecnologias fotovoltaicas em rodovias. Um deles, de Kang-Won e Andrew (2010), analisou a viabilidade da utilização de um filme fino de células fotovoltaicas sobre o pavimento. Os autores concluíram que essa configuração apresenta dificuldades na manutenção da durabilidade do dispositivo submetido a várias cargas, fluxos e condições climáticas. Sendo assim, propuseram que novas configurações de células solares em filmes finos deveriam ser estudadas para o uso sob essas condições.

Uma concepção um pouco diferente foi adotada na Holanda em 2014 pelo consórcio *Solar Road* para construir uma ciclovia de 100 m. Os painéis solares foram cobertos com uma camada final de 1 cm de vidro temperado e geraram 350 kWh de eletricidade em um ano. Infelizmente, os painéis nessa configuração (completamente horizontais) têm apenas 1/3 da eficiência de painéis solares usados em telhados (WANG et al., 2018). Para o uso em praças de pedágio, a utilização de dispositivos fotovoltaicos diretamente sobre o pavimento talvez não seja a opção mais aconselhável. Além da eficiência reduzida devido ao fato das placas não poderem ser alinhadas perpendicularmente ao ângulo de maior incidência solar, a sombra gerada pelos veículos reduz ainda mais a geração de energia. Ainda assim, existem outras formas em relação à instalação de painéis solares, como inserir dispositivos sobre os telhados dos prédios da praça, ou até mesmo criar áreas com cobertura sobre a rodovia para instalação dos painéis.

2.2.2.2 Coletores Solares e Geradores Termoelétricos

Outra forma de transformar a energia solar em elétrica é através calor absorvido pelos pavimentos. Geradores termoelétricos são capazes de gerar eletricidade com base em um gradiente de temperatura. Aplicado a rodovias, um sistema termoelétrico consistiria de uma rede de tubos instalados abaixo do pavimento conectados a um gerador termoelétrico. Através dos tubos, circula um fluido responsável pelo transporte do calor absorvido pelo pavimento até o gerador. Como benefício, além da geração de energia, o sistema é capaz de reduzir a temperatura do pavimento substancialmente. Estudos de laboratório realizados por Hasebe et al. (2006) apontaram uma redução de 30°C na temperatura superficial do pavimento – de 60°C para 30°C. Essa redução da temperatura do pavimento traz maior conforto para os usuários da rodovia e ainda minimiza a necessidade de climatização durante o verão das cabines de cobrança e demais prédios das praças de pedágio. Em locais com invernos rigorosos, por outro lado, o calor coletado pode ser armazenado e utilizado para aquecer o pavimento e evitar o congelamento, ao invés de gerar energia.

Embora seja interessante do ponto de vista da eficiência energética, essa solução apresenta certas dificuldades de instalação e manutenção, uma vez que toda a rede responsável por coletar o calor está abaixo do pavimento. Qualquer intervenção no sistema implica na demolição e reconstrução de todo o pavimento acima dela. Além disso, o potencial energético não é muito grande. Estudos de Wu e Yu (2012) simularam um gradiente de 20 K em um módulo termoelétrico, resultando numa geração de cerca de 0,05 mW e eficiência de apenas 2,05%. A energia seria suficiente para alimentar dispositivos de monitoramento do pavimento com circuito integrado, mas nem perto de atender a demanda dos prédios de uma praça de pedágio.

2.2.3 Energia geotermal

Similar ao método que extrai energia elétrica do calor do pavimento, esse método pode fazer uso das altas temperaturas de camadas mais profundas do subsolo. Nos EUA, essa metodologia já é usada desde 1948 para aquecer o pavimento e evitar o seu congelamento (WANG et al., 2018). Segundo os autores, embora essa seja uma fonte atrativa de energia renovável, ainda existem poucos estudos focados no impacto ambiental de sistemas geotermiais. Além disso, a instalação dessa tecnologia exige profundas inspeções do solo, não sendo viável em muitas situações.

2.2.4 Energia eólica

Outra fonte interessante do ponto de vista ambiental é a energia eólica, que consiste em extrair energia a partir da força dos ventos. O conceito é antigo, e foi bastante aplicado no passado em moinhos de trigo. Infelizmente, essa ainda é uma fonte energética pouco utilizada, de modo que em 2016, apenas 3,9% da eletricidade de todo o mundo foi gerada por turbinas eólicas. No Brasil, esse valor foi de 3,7% no mesmo ano (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017a).

No modo tradicional, a velocidade do vento move as pás de imensas turbinas, normalmente dispostas ao longo de vastas áreas (figura 8). Embora ideal para grande geração de energia em regiões de ventos intensos, essa concepção não se adequa muito bem ao âmbito de rodovias e, em específico, praças de pedágio. Além da grande área necessária para a construção de uma turbina eólica convencional e de todos os desafios decorrentes de uma obra dessas proporções, tais geradores precisam de ventos de no mínimo 4 ou 5 m/s (14 ou 18 km/h) para iniciarem a movimentação das pás (NEW WOLRD WIND, 2018). Em contrapartida, já existem no mercado produtos que são capazes de gerar energia com ventos inferiores a 2 m/s, como a *Wind Tree* (figura 9), produzida pela francesa *New World Wind*. Dispositivos como esses poderiam facilmente ser instalados ao redor da praça de pedágio ou, ainda, ao longo da via ou no canteiro central para aproveitar os deslocamentos de ar criados pelos veículos em movimento, como é o caso do dispositivo Enlil (figura 10), em estudo na Turquia.

Figura 8 – Parque eólico de Osório/RS



(fonte: ENERFÍN, 2018)

Figura 9 – Gerador eólico *Wind Tree*

(fonte: NEW WOLRD WIND, 2018)

Figura 10 – Gerador eólico Enlil, em estudo na Turquia



(fonte: DEVECITECH, 2018)

2.2.5 Energia hidráulica

Atualmente a fonte renovável mais utilizada ao redor do mundo, a energia hidráulica baseia-se em extrair energia de água em movimento através de algum tipo de turbina. O princípio já era utilizado no Antigo Egito e, também, por gregos e romanos desde os primeiros séculos da Era Comum. Historicamente, era usada em rodas d'água para mover moinhos. Nos dias de hoje, usinas hidrelétricas são construídas junto a represas, capazes de maximizar a geração de energia aumentando a carga hidráulica antes de conduzir a água para as turbinas. Em 2016, segundo dados do Ministério de Minas e Energia (2017a), a energia hidráulica era responsável por 16,2% da geração elétrica de todo o mundo, sendo que no Brasil esse percentual é de 67,5%.

Embora seja uma fonte renovável de energia, a construção de grandes represas, assim como qualquer outra grande central geradora de energia, tem um impacto ambiental e socioeconômico considerável. Com o intuito de aumentar a carga hidráulica sobre as turbinas, imensas áreas às margens dos corpos hídricos são alagadas, afetando a fauna e flora locais, assim como eventuais populações ribeirinhas que vivem em áreas próximas. Em contraponto, como benefício, além da geração de energia, a construção de represas pode minimizar o impacto de chuvas de grande intensidade, controlando o nível dos rios.

Para a utilização em praças de pedágio, a construção de usinas hidrelétricas, mesmo que pequenas – Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), como são conhecidas – pode não ser o mais adequado. Os custos seriam elevados e grandes áreas seriam necessárias. Entretanto, já existem no mercado turbinas capazes de gerar eletricidade, ainda que com menor intensidade, a partir do fluxo natural de um rio. Em janeiro de 2012, uma companhia chamada *Verdant Power* recebeu uma licença para instalar 30 turbinas no *East River*, na cidade de Nova York, com uma geração estimada de até 1 MW de energia (VERDANT POWER, 2018). Os canadenses da *New Energy Corporation* trabalham com produtos similares (figura 11), capazes de gerar até 125 kW com velocidades de 3 m/s (NEW ENERGY CORP., 2018).

Figura 11 – Gerador hidrelétrico EnCurrent 125 Series



(fonte: NEW ENERGY CORP., 2018)

2.2.6 Coletores piezoelétricos

O princípio básico dos coletores piezoelétricos consiste em tirar proveito de uma propriedade especial que certos materiais possuem: a piezoelectricidade. Quando submetidos a deformações, materiais piezoelétricos são capazes de gerar uma pequena diferença de potencial entre suas extremidades. Reversivelmente, aplicando-se uma diferença de potencial sobre um material piezoelétrico é possível deformá-lo. Sendo assim, ciclos de compressão e decompressão sobre tais materiais podem criar uma corrente alternada (CA), o mesmo tipo de corrente que recebemos em nossas casas das concessionárias de energia.

Os materiais piezoelétricos podem ser classificados nas seguintes categorias (WANG et al., 2018):

- a) materiais cristalinos (como quartzo);
- b) piezocerâmicas;
- c) semicondutores piezoelétricos;
- d) polímeros;
- e) compósitos piezoelétricos;
- f) cerâmicas de vidro.

Segundo os autores, as características piezoelétricas e mecânicas variam entre os diversos materiais, mas que os mais comuns são os polímeros e as cerâmicas. Os polímeros são flexíveis e geram menos energia, enquanto as cerâmicas são mais rígidas e podem gerar mais energia.

Diversas concepções vêm sendo estudadas no mundo todo. A apresentada por Moure et al. (2016) seria capaz de gerar 65 MWh em um ano a partir de 30.000 dispositivos ao longo de 100 metros de uma rodovia.

2.2.7 Outras técnicas de geração de energia

Diversas outras potenciais fontes de energia vêm sendo propostas e estudadas atualmente, o que mostra, mais uma vez, a importância do campo no mundo atual. Grande parte delas ainda são muito conceituais e existem apenas em estudos preliminares. Entretanto, embora não possam ser aplicados imediatamente, vale o registro dessas novas técnicas para conhecimento e para a possibilidade de futuros estudos.

Azzouz et al. (2013) propuseram um sonorizador composto por aletas que podem ser pressionadas para baixo quando um veículo passa sobre elas. As aletas, através de um sistema de engrenagens, fazem girar um eixo que transmite o movimento para o gerador. Um protótipo do sonorizador proposto é apresentado na figura 12. A energia estimada pelos autores para cada compressão da aleta foi de 798 J que, extrapolada para o fluxo de 374.000 carros/dia de uma rodovia na Califórnia, corresponderia a uma produção de 166 kWh/dia. O custo de cada dispositivo, incluindo instalação e manutenção, foi estimado em US\$ 1.000, valor que se pagaria em cerca de 2,2 anos de uso. Embora financeiramente atraente, por ter um custo relativamente baixo e um curto período de retorno, provavelmente dispositivos como esse não seriam interessantes em praças de pedágio, por conta do conforto dos usuários. Por outro lado, seu uso seria bastante indicado em locais onde, de outra forma, sonorizadores convencionais já seriam utilizados em rodovias, como em proximidades de escolas ou de travessias de pedestres, e locais de redução de velocidade em geral, por exemplo.

Figura 12 – Protótipo do sonorizador

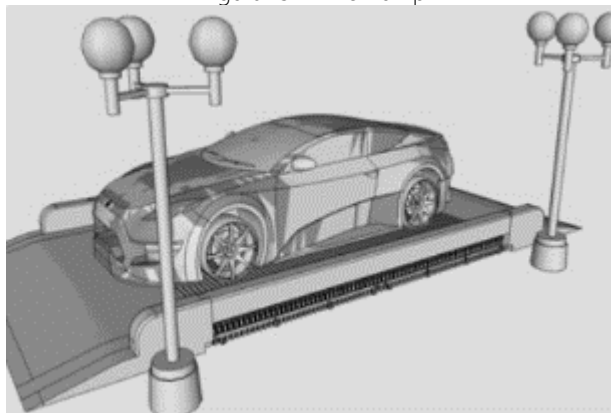


(fonte: AZZOUZ et al., 2013)

Outro conjunto de dispositivos para extração de energia em rodovias é o proposto pela empresa americana KinerPower (2018). Alguns são recomendados para tráfegos mais lentos, como a KinerBump (figura 13), uma lombada capaz de se deslocar verticalmente, gerando energia com o fluxo de veículos. Outro dispositivo, esse com menos interferência para o usuário da via, é o KinerCarpet, indicado para zonas com alto fluxo de veículos. Ele é composto por uma série de faixas transversais à via (figura 14), que trabalham como pistões. Quando pressionadas pelos veículos (figura 15), essas faixas são capazes de bombear um gerador de energia. Segundo a empresa, 200 m desse dispositivo seriam capazes de gerar até 16,5 GWh/ano com um tráfego

diário de 3.500 veículos. Entretanto, até o momento não há dados disponíveis de aplicações reais dessas tecnologias.

Figura 13 – KinerBump



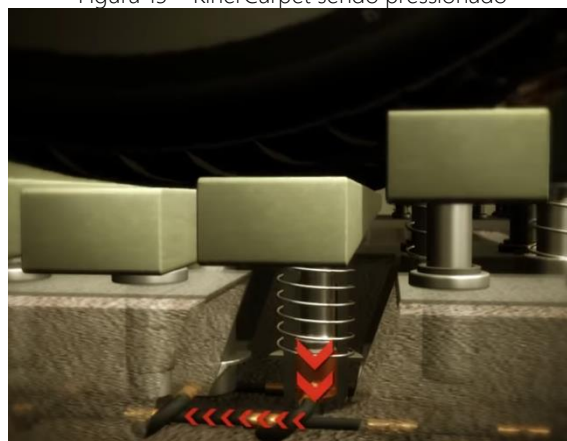
(fonte: KINERGYPOWER, 2018)

Figura 14 – KinerCarpet



(fonte: KINERGYPOWER, 2018)

Figura 15 – KinerCarpet sendo pressionado



(fonte: KINERGYPOWER, 2018)

O eletromagnetismo também vem sendo empregado na microgeração de energia elétrica. Os dispositivos eletromagnéticos baseiam-se no princípio da indução estudado por Faraday, onde um campo magnético em movimento relativo a um condutor é capaz de induzir uma corrente elétrica nesse condutor. Normalmente, para geração de energia, são utilizadas bobinas movidas dentro de um campo magnético criado por ímãs. Os microgeradores aplicados em rodovias são normalmente instalados em locais suscetíveis a vibrações, como pontes e viadutos. Nesses locais, a vibração é capaz de criar o movimento entre a bobina e o campo magnético necessário para a geração de energia. Atualmente, a eficiência da geração de energia com essa tecnologia ainda é baixa e estudos buscam seu aperfeiçoamento (WANG et al., 2018).

2.2.8 Comparação entre as diferentes tecnologias

A seguir, a tabela 6 apresenta a comparação de custo e nível de maturidade de cada tecnologia. Um nível de maturidade igual a 1 significa que a tecnologia se encontra a nível básico de pesquisa, enquanto um nível igual a 9 indica implementação da nova tecnologia com sistema existente.

Tabela 6 – Comparação do custo-benefício das diferentes tecnologias de microgeração

Tecnologia	Custo (US\$/kWh)	Nível de Maturidade
Fotovoltaica	0,45	9
Coletores solares (para degelo)	4,21	4
Termoelétrica	95,74	3
Geotermal (para degelo)	0,16	9
Piezoelétrica	106,38	4

(fonte: adaptado de WANG et al., 2018)

É importante salientar que tanto o custo como o nível de maturidade variam de acordo com o avanço dos estudos e dos incentivos governamentais. As novas tecnologias predominantemente iniciam seus processos com custos elevados e nível de maturidade baixos, mas os avanços tecnológicos atuais provocam alterações muito rápidas nesse cenário, fato que fomenta a importância de estudos de novas tecnologias.

2.3 MAPEAMENTO DOS SISTEMAS EXISTENTES E DEMANDAS DE ENERGIA

A seguir, serão caracterizadas as 3 praças de pedágio estudadas, em termos de edificações e demandas energéticas. Esses dados serão importantes para a análise da eficiência energética das praças, assim como para a determinação de soluções para a otimização do uso de energia elétrica.

2.3.1 Praça de Santo Antônio da Patrulha – P1

A primeira praça na BR-290 encontra-se no km 19 da rodovia, no município de Santo Antônio da Patrulha. Ela possui 15 cabines de cobrança, sendo 1 equipada para cobrança automática, além de uma faixa exclusiva para cobrança automática (sem existência de cabine). A figura 16 representa uma visão geral da praça. A cobrança é feita apenas no sentido capital-litoral e as cabines de 1 a 4 permanecem com as cancelas abertas para manter o fluxo livre no sentido litoral-capital. Em 2013, o volume diário médio de veículos pedagiados era de 14.006 veículos/dia, com maior volume durante o verão (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2014), pois está na rota para o litoral. Essa é a segunda praça mais movimentada da Concepa, com movimento pouco inferior a P2 de Gravataí.

Figura 16 – Praça de Santo Antônio da Patrulha



Quando comparada às demais praças de pedágio da concessão, esta apresenta diferenças construtivas, justificadas pelo fato de já existir a construção no início da concessão da Concepa, decorrente de outra administração da rodovia. Das três praças administradas pela Concepa, essa é a única que possui um túnel subterrâneo para o acesso às cabines (figura 17), o que reduz a necessidade de os funcionários atravessarem as faixas com tráfego de veículos no sentido capital-litoral, onde não há cobrança de pedágio. Sendo assim, o túnel facilita a circulação dos trabalhadores, evitando o cruzamento das faixas no sentido capital-litoral, mas por questões operacionais não é permitido o acesso a todas as cabines que o túnel atinge, de modo que a movimentação entre as cabines no sentido capital-litoral é realizada na superfície, da mesma forma das outras praças da concessão. Além disso, nas últimas 6 cabines, conforme figura 18, não há acesso ao túnel pois estas são resultados da ampliação da praça construídas durante a concessão da Concepa, de modo que não foi prevista ampliação do túnel.

Figura 17 – Túnel de acesso subterrâneo às cabines



Figura 18 – Cabines construídas durante a concessão da Concepa



Além das cabines de arrecadação, o complexo ainda conta com edificações adjacentes, composta por um prédio principal, um de apoio médico e dois *boulevards* (local de alimentação comercial para atendimento ao público). O prédio principal serve de apoio para a operação de arrecadação e conta com um setor administrativo, tesouraria, refeitório, cozinha e banheiros para os funcionários, depósitos, supervisão, sala de treinamento, etc. Em um ambiente exclusivo localizado no prédio principal encontra-se o gerador a diesel, para suprir a demanda em casos de falta de energia, e, em anexo, o apoio mecânico, que presta serviço aos usuários da rodovia em casos de acidentes ou panes mecânicas. O prédio de apoio médico também serve de auxílio aos usuários da rodovia em casos de emergência. Os *boulevards* oferecem sanitários, lanches e produtos de conveniência aos usuários, tanto no sentido capital-litoral quanto no sentido inverso. A tabela 7 apresenta as áreas aproximadas das construções da praça. O termo “área fechada” foi utilizado para indicar as áreas fechadas atendidas com climatização e iluminação, excluindo áreas cobertas sem paredes, como a cobertura da área de cobrança, que foram consideradas apenas como “área de cobertura”.

Tabela 7 – Áreas dos prédios da praça de Santo Antônio da Patrulha

Prédio	Área fechada (m ²)	Área de cobertura (m ²)
Cabines de arrecadação	74,00	1650,00
Prédio principal	630,00	630,00
Túnel subterrâneo	214,00	0,00
Apoio mecânico	100,00	100,00
Apoio médico	80,00	80,00
<i>Boulevard 1</i>	222,00	222,00
<i>Boulevard 2</i>	178,00	178,00
Total	1498,00	2860,00

Todas as cabines da praça são equipadas com aparelhos de ar condicionado *split* individuais e a iluminação é feita através de lâmpadas fluorescentes compactas. Para a iluminação das áreas externas são utilizados postes e refletores com lâmpadas halógenas.

O prédio principal, o apoio mecânico e o apoio médico são iluminados em quase sua totalidade com lâmpadas fluorescentes, com alguns pontos com lâmpadas LED. A climatização é feita individualmente em cada peça através de aparelhos *split* e, em poucas peças, com aparelhos do “tipo janela” (mais antigo).

Com relação ao abastecimento de energia elétrica, essa praça é atendida pela CEEE. No ano de 2017, a praça consumiu um total de 281.537 kWh, sendo 35.626 kWh no horário de ponta. O valor pago à concessionária de energia foi de R\$ 192.343,90, com uma média mensal de R\$ 16.028,66/mês. De forma alternativa, a praça conta com um gerador a diesel para atender a demanda em casos de problemas no fornecimento de energia pela concessionária, assim como com um banco de baterias para emergências, com autonomia de cerca de 4 horas. O gerador a diesel é acionado periodicamente para assegurar seu funcionamento em caso de necessidade.

2.3.2 Praça de Gravataí – P2

Instalada no município de Gravataí, no km 77 da BR-290, essa é atualmente a maior praça da Concepa, com 24 cabines, sendo duas equipadas para cobrança automática. A figura 19 apresenta uma imagem geral da praça. A praça ainda conta com mais 2 faixas de cobrança exclusivamente automática, (sem a presença de cabine, conforme figura 20), totalizando 27 faixas, com a cobrança sendo realizada nos dois sentidos da rodovia. Segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014), a média de veículos pedagiados no ano de 2013 foi de 20.823 veículos/dia no sentido capital-litoral e 21.064 veículos/dia no sentido litoral-capital. Dentre as três praças administradas pela Concepa, essa é a que possui o maior volume de tráfego, sendo assim a que tem o maior potencial de geração de energia através do tráfego.

Figura 19 – Praça de Gravataí



Figura 20 – Faixas de cobrança automática em Gravataí



Além das cabines de arrecadação, o complexo ainda conta com um prédio principal, um de apoio mecânico, uma cobertura para veículos de apoio médico e um *boulevard*. O prédio principal serve de apoio para a operação de arrecadação e conta com um setor administrativo, copa e banheiros para os funcionários, depósitos, supervisão, etc. Em anexo ao prédio principal, fica o prédio onde funciona o gerador a diesel para suprir a demanda em casos de falta de energia. Os prédios de apoio médico e mecânico prestam serviço aos usuários da rodovia em casos de acidentes, panes mecânicas, entre outros. O *boulevard* oferece sanitários, lanches e produtos de conveniência aos usuários da rodovia. A tabela 8 apresenta as áreas aproximadas dos prédios da praça. O termo “área fechada” foi utilizado para indicar as áreas fechadas atendidas com climatização e iluminação, excluindo áreas cobertas sem paredes, como a cobertura da área de cobrança, que foram consideradas apenas como “área de cobertura”.

Tabela 8 – Áreas dos prédios da praça de Gravataí

Prédio	Área fechada (m ²)	Área de cobertura (m ²)
Cabines de arrecadação	125,00	2683,00
Prédio principal	357,00	280,00
Prédio anexo	178,00	178,00
Apoio mecânico	167,00	167,00
Apoio médico	143,00	143,00
<i>Boulevard</i>	170,00	130,00
Total	1140,00	3581,00

Todas as cabines da praça são equipadas com aparelhos de ar condicionado *split* individuais e a iluminação é feita através de lâmpadas fluorescentes compactas. Para a iluminação das áreas externas são utilizados postes e refletores com lâmpadas halógenas. O prédio principal é iluminado em parte com lâmpadas LED, em outra com lâmpadas fluorescentes, com alguns

pontos com temporizadores com sensores de movimento. A climatização é feita individualmente em cada peça por aparelhos *split* e do “tipo janela” (mais antigo).

Com relação ao abastecimento de energia elétrica, essa praça é atendida pela RGE. No ano de 2017, a praça consumiu um total de 287.976 kWh, sendo 29.154 kWh no horário de ponta. O valor pago à concessionária de energia foi de R\$ 193.607,29, com uma média mensal de R\$ 16.133,94/mês. De forma alternativa, a praça conta com um gerador a diesel para atender a demanda em casos de problemas no fornecimento da concessionária de energia, assim como com um banco de baterias para emergências. O gerador a diesel é acionado periodicamente para assegurar seu funcionamento.

2.3.3 Praça de Eldorado do Sul – P3

Situada no km 110 da BR-290, dentro do município de Eldorado do Sul, essa praça possui 8 cabines de cobrança, sendo 7 exclusivamente manuais e 1 equipada para cobrança automática. Além disso, a praça conta com uma faixa exclusiva para cobrança automática (sem a presença de cabine), totalizando 9 faixas para arrecadação, que é feita apenas no sentido capital-interior (figura 21). Conforme informado pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (2014), a média diária de veículos cobrados nessa praça no ano de 2013 foi de 10.692 veículos/dia, o menor movimento registrado dentre as três praças da Concepa.

Figura 21 – Praça de Eldorado do Sul



Além das cabines de arrecadação, o complexo ainda conta com um prédio principal, um de apoio mecânico, outro de apoio médico, um *boulevard* e um prédio com balança da ANTT. O prédio principal serve de apoio para a operação de arrecadação e conta com um setor administrativo, refeitório, cozinha e banheiros para os funcionários, depósitos, supervisão, etc. Os prédios de apoio médico e mecânico prestam serviço aos usuários da rodovia em casos de acidentes, panes mecânicas, entre outros. No prédio de apoio mecânico também fica instalado o gerador a diesel para suprir a demanda em casos de falta de energia. O *boulevard* oferece sanitários aos usuários e, atualmente, é cedido à empresa Sem Parar, que oferece dispositivos e planos de pagamento automático dos pedágios. Por fim, o prédio da ANTT serve de apoio à pesagem dos veículos de carga que trafegam pela rodovia. A tabela 9 apresenta as áreas

aproximadas dos prédios da praça. O termo “área fechada” foi utilizado para indicar as áreas fechadas atendidas com climatização e iluminação, como a cobertura da área de cobrança, excluindo áreas cobertas sem paredes, que foram consideradas apenas na “área de cobertura”.

Tabela 9 – Áreas dos prédios da praça de Eldorado do Sul

Prédio	Área fechada (m ²)	Área de cobertura (m ²)
Cabines de arrecadação	38,00	987,00
Prédio principal	407,00	331,00
Apoio mecânico	112,00	112,00
Apoio médico	152,00	152,00
<i>Boulevard</i>	200,00	135,00
Balança	28,00	28,00
Total	937,00	1745,00

Todas as cabines da praça são equipadas com aparelhos de ar condicionado *split* individuais e a iluminação é feita através de lâmpadas fluorescentes compactas. Para a iluminação das áreas externas são utilizados postes e refletores com lâmpadas halógenas. O prédio principal é iluminado em parte com lâmpadas LED, em outra com lâmpadas fluorescentes, com alguns pontos com temporizadores com sensores de movimento. A climatização é feita individualmente em cada peça por aparelhos *split* e do “tipo janela” (mais antigo). As instalações do apoio médico não possuem ar condicionado e a iluminação é feita com lâmpadas fluorescentes compactas e de tubo. O prédio junto à balança possui climatização com ar *split* e iluminação LED.

Com relação ao abastecimento de energia elétrica, essa praça é atendida pela CEEE. No ano de 2017, a praça consumiu um total de 253.738 kWh, sendo 29.995 kWh no horário de ponta. O valor pago à concessionária de energia foi de R\$ 163.027,67, com uma média mensal de R\$ 13.585,64/mês. De forma alternativa, a praça conta com um gerador a diesel para atender a demanda em casos de problemas no fornecimento da concessionária de energia, assim como com um banco de baterias para emergências. O gerador a diesel é acionado periodicamente para assegurar seu funcionamento.

2.4 MODO DE COBRANÇA DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA – CONCESSIONÁRIA ELÉTRICA VERSUS GERAÇÃO AUTÔNOMA

Convencionalmente, praças de pedágio em rodovias são abastecidas pela rede elétrica local. A cobrança da energia elétrica através da concessionária para essas praças é realizada conforme a divisão em duas tarifas: ponta e fora ponta. A tarifa de ponta custa cerca de 4 vezes o valor da tarifa fora ponta, o que justificaria o uso de fontes alternativas de energia durante o período de pico. Além disso, conforme já discutido anteriormente, essa forte dependência da energia distribuída pelas concessionárias de energia costuma trazer problemas às praças de pedágio, principalmente àquelas que se encontram mais afastadas dos grandes centros metropolitanos. Para suprir a demanda em caso de falta de energia, grande parte das praças de pedágio trabalham com sistemas de *backup*, como geradores a diesel e bancos de baterias, normalmente com autonomia de poucas horas. No caso de utilização de geradores, há o gasto de abastecimento de diesel, também de valor de mercado somado ao valor de manutenção especializado realizado por terceiros.

Por outro lado, grandes esforços vêm sendo feitos para aumentar a autonomia das praças de pedágio. Conforme discutido anteriormente, em 2012 a ANAEEL regularizou no Brasil a micro e mini geração de energia, de modo que a energia gerada de forma autônoma pode ser jogada na rede elétrica e convertida em créditos com a concessionária elétrica. Além disso, em regiões mais isoladas, praças de pedágio autossuficientes eletricamente poderiam funcionar independentes da rede elétrica (*off-grid*).

Conforme Sharpe (2013), em 2013 foi aberta no Zimbábue a primeira praça de pedágio totalmente independente da rede elétrica. O abastecimento é feito por uma combinação de energia solar fotovoltaica ligada a um banco de baterias, responsável por suprir cerca de 80% do consumo, e geração a diesel, usado como *backup* durante a noite ou em períodos de pouca incidência de sol durante o inverno. Entretanto, para isso ser viável também foram necessários investimentos para reduzir o consumo de energia global da praça. O consumo com iluminação foi reduzido pela metade com a implementação de lâmpadas LED orgânicas (OLED), e outras melhorias na eficiência energética da praça reduziram a demanda de 30 kW para 17 kW.

No Brasil, o grupo de concessionárias de rodovias EcoRodovias também vem investindo em placas fotovoltaicas em suas praças de pedágio. Na praça Batistini (figura 22), na Rodovia dos Imigrantes em São Paulo, a instalação de placas fotovoltaicas em 2012 foi capaz de reduzir a conta de luz em 20% (BLUE SOL, 2017). No Rio Grande do Sul, o grupo também instalou painéis solares na praça da EcoSul de Capão Seco, com geração de cerca de 20.000 kWh por ano e uma economia de aproximadamente 16% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS, 2015b).

Figura 22 – Praça Batistini, em São Bernardo do Campo, SP



(fonte: Blue Sol, 2017)

3 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DOS PAVIMENTOS

Existem diferentes maneiras de gerar energia através dos pavimentos. Wang et al. (2018) realizaram uma revisão de literatura dos métodos possíveis para *Energy Harvesting*, onde listaram como alternativas painéis fotovoltaicos, coletores térmicos, piezoelétricos, geotérmicos, eletromagnéticos para pontes e ainda em estágio de desenvolvimento, vento e eletrostáticos.

Além dos modelos trabalharem separadamente, existe a possibilidade de utilização de dois ou mais em um mesmo ponto de uma rodovia. Symeoni (2012), em uma tese de mestrado, propôs modelos híbridos dessa tecnologia para a obtenção da maior quantidade de energia possível. Uma dessas propostas sugere a utilização de barreiras de sons de material fotovoltaico, a presença de dutos coletores térmicos e sensores piezoelétricos.

3.1 REVISÃO DA LITERATURA EM GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE PAVIMENTOS

No setor de transportes, o *Energy Harvesting* pode ser aplicado em pavimentos, onde existe uma grande quantidade de energia desperdiçada, como a energia mecânica gerada pelos carros e ventos, energia térmica e a radiação solar incidente. A energia convertida poderia então abastecer sensores, balanças, câmeras e iluminação ao longo da rodovia, sem a necessidade de rede elétrica em primeiro momento, e até mesmo aplicações de larga escala, como utilização em domicílios ou carregamento de veículos elétricos, dependendo do potencial da tecnologia.

O presente capítulo considerou três tipos principais de geração de energia, sendo eles:

- a) sistema piezoelétrico;
- b) sistema fotovoltaico;
- c) sistema coletores solares.

Esses sistemas são descritos a partir nos próximos itens desse relatório.

3.1.1 Sistema piezoelétrico

Materiais com características piezoelétricas geram eletricidade quando são submetidos a tensões mecânicas, ou inversamente, geram deformações ao aplicar um campo elétrico sobre os mesmos (WANG et al., 2018). Esse comportamento trouxe a atenção de muitos pesquisadores em diversos setores e, recentemente, a possibilidade de aplicação na área da pavimentação, para estudos dos possíveis potenciais dessa tecnologia.

No setor de transportes, os conversores piezoelétricos podem ser adaptados nas suspensões dos veículos (LI et al., 2013, ZUO; ZHANG, 2013) ou então embutidos no pavimento, transformando a deformação proveniente da tensão aplicada pelos veículos em energia elétrica. A energia, portanto, gerada pelo sistema não é contínua, variando ao longo do tempo, conforme o número de passagens de veículos e a magnitude das cargas passantes (XIONG et al., 2014).

O principal material utilizado para a criação de conversores piezoelétricos é o Titanato zirconato de chumbo, conhecido pela abreviação PZT. Esse material cerâmico possui efeitos piezoelétricos e está presente em uma grande quantidade de conversores desenvolvidos por pesquisadores. Esse material geralmente é o que possui uma melhor resposta elétrica (SODANO et al., 2005).

Além do PZT, outro material é o fluoreto de polivinidileno (PVDF). Esse material foi estudado por Lee et al. (2005) e apresenta como vantagem a capacidade de ser mais flexível e resiste a maiores cargas e níveis de deformação. A vida de fadiga também aumentaria, pois, o PZT é um material extremamente rígido, tornando-o propenso a fadiga. Ressalta-se que é importante que o material aplicado no pavimento tenha uma boa vida útil, diminuindo a necessidade de manutenção nos pavimentos.

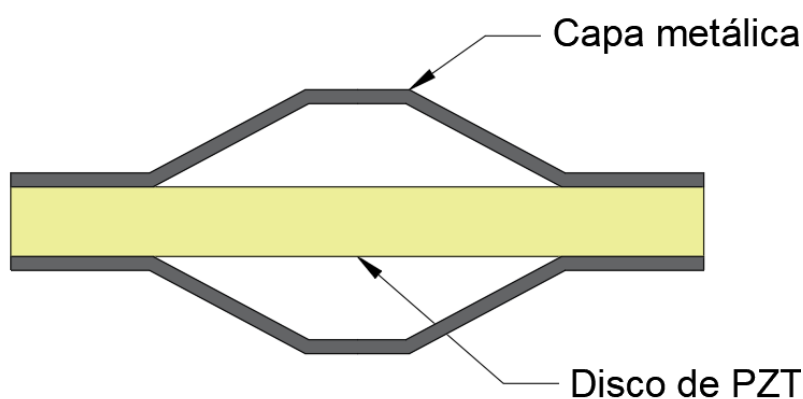
A montagem de um sistema piezoelétrico possui a utilização de um modo de acoplamento, chamados de modo 3-1 ou 3-3. O modo 3-1 ocorre quando a força aplicada no material ocorre perpendicularmente a direção dos polos do material, enquanto o modo 3-3 ocorre quando os esforços são aplicados na mesma direção. Esse segundo modo, apresentado por duToit et al. (2005) normalmente gera maior energia.

3.1.2 Geometrias utilizadas na geração de energia com sensores piezoelétricos

A geometria da montagem dos conversores interfere também para a energia gerada. Diversos pesquisadores apresentaram diferentes propostas, buscando eficiência, facilidade de montagem, baixo custo de construção, melhor resistência às altas cargas das rodovias. Propostas e modelos matemáticos de conversores piezoelétricos são apresentadas nesse capítulo.

Zhao et al. (2010) buscaram avaliar diferentes tipos de címbalos para captação de energia. O címbalo possui duas capas de metal e uma camada de PZT interna, com polarização no sentido da espessura. O desenho padrão desse tipo de conversor pode ser observado na figura 23 abaixo.

Figura 23 - Representação de um conversor címbalo



Conforme apontado anteriormente por Kim et al. (2004), o címbalo possui uma boa resistência sobre a aplicação de altas cargas, além de uma boa eficiência e um custo relativamente baixo. Zhao et al. (2010) resolveram aplicar esse formato na área da pavimentação, por julgar um bom formato.

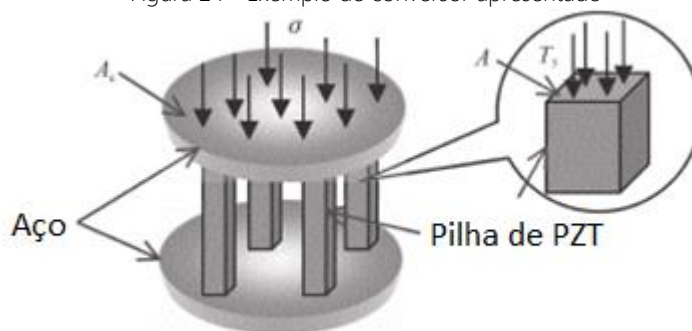
Os autores utilizaram análises de elementos finitos para encontrar dimensões apropriadas para a utilização na pavimentação, e conforme os mesmos, a primeira estimativa para essa geometria na área. O estudo concluiu que um aumento do diâmetro total do címbalo aumenta a energia gerada, porém aumenta o custo de produção. Sugeriu-se então a utilização de um címbalo com 32 mm de diâmetro, com capacidade de gerar até 1,20 mW de energia elétrica poderia ser gerado com uma frequência de 20 Hz de carga dos veículos.

Seguindo estudos na área de *Energy Harvesting*, Zhao et al. (2012) utilizaram novamente elementos matemáticos para comparar diferentes propostas de conversores piezoelétricos existentes nas demais áreas, pensando na aplicação em pavimentos. Os formatos estudados foram o *multilayer*, *MFC*, *Moonie*, *Cymbal*, *Bridge* e o *THUNDER*, utilizados para microgeração de energia em demais setores.

O estudo comparativo aponta que o modelo *Moonie* não é um bom dispositivo para utilização na pavimentação, *THUNDER* e o *MFC* ambos possuem baixa rigidez e, portanto, não são aconselhados, mesmo com o primeiro tendo uma boa eficiência. O *Multilayer* resultou em boa eficiência, porém possui um módulo bastante elevado o que diminui suas aplicações. Os modelos címbalo e *Bridge* possuem uma eficiência razoável, além de um módulo intermediário, tornando-os compatíveis ao uso em pavimentos asfálticos. Esses modelos ainda possuem uma alta durabilidade, o que pode fazer com que resistam as cargas ao longo da vida útil do pavimento.

Seguindo os estudos apresentados anteriormente, Zhao et al. (2014) avaliaram que a energia dos conversores convencionais seria baixa, caso eles fossem embutidos no pavimento. Baseado nisso, propuseram um protótipo gerador, que envolve em duas placas de aço, com pilhas de PZT internas, conforme pode ser visualizado na figura 24.

Figura 24 - Exemplo de conversor apresentado



(fonte: adaptado de ZHAO et al., 2014)

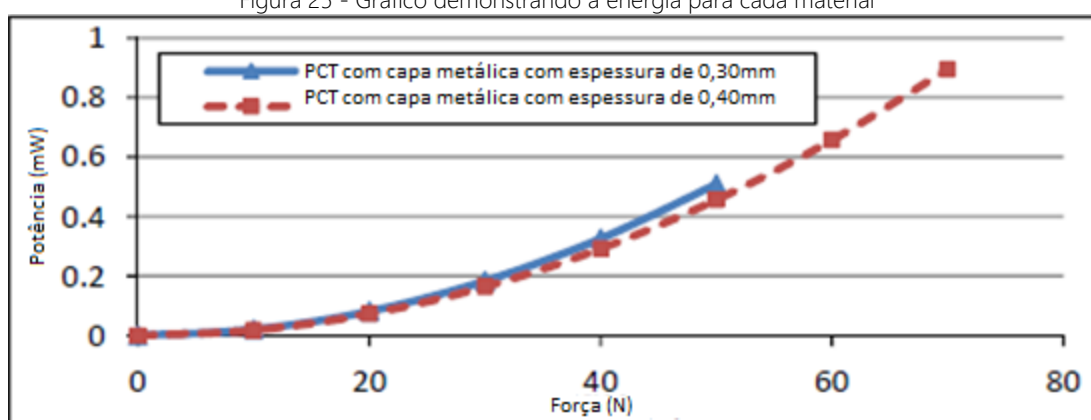
Após análises com elementos finitos, os autores sugerem que o número de pilhas deve ser entre 8 a 16, de formato circular, distribuindo melhor as tensões. Estima-se que seria possível captar até 50 kW/h com um gerador, considerando um tráfego de 600 veículos por hora. Outra possibilidade levantada pelo estudo seria a utilização dos geradores como sensores para identificação dos tipos e velocidades de cargas atuando sobre o pavimento.

Em experimentos laboratoriais realizados por Yao et al. (2011) foi comparado qual formato seria mais eficiente para um transdutor *Bridge*. Os resultados demonstraram que um formato em arco possui um maior desempenho elétrico, porém menor resistência a cargas elevadas. Li (2015) também encontrou resultados similares em outro experimento comparando ambos formatos. Os resultados desse estudo indicam que a utilização de um transdutor *Bridge* em arco pode ser ineficaz para pavimentos, onde altas cargas poderiam destruir o sistema.

Em outra análise de um conversor címbalo, Chua et al. (2014) estudaram alguns parâmetros do disco para a saída de energia. Os autores concluíram que um címbalo de 32 mm de diâmetro, poderia gerar um *output* de 0,46 mW de potência elétrica, quando uma força de 50 N fosse aplicada com uma resistência de carga de 3 M Ω , para uma capa de aço de 0,3 mm. O estudo ressalta que ao embutir os címbalos nos pavimentos, a carga que atinge o conversor precisa ser estimada com base na pressão de contato do pneu com o pavimento.

Os autores concluíram também que a utilização de uma estrutura de aço gera melhores resultados que o alumínio, além que a espessura da capa altera a resposta máxima de energia. Para uma mesma força, uma capa de 0,4 mm geraria levemente menos energia, conforme gráfico representado na figura 25, porém possui uma maior resistência a cargas, permitindo chegar a um máximo de 0,90 mW com uma aplicação de 70 N.

Figura 25 - Gráfico demonstrando a energia para cada material



(fonte: adaptado de CHUA et al., 2014)

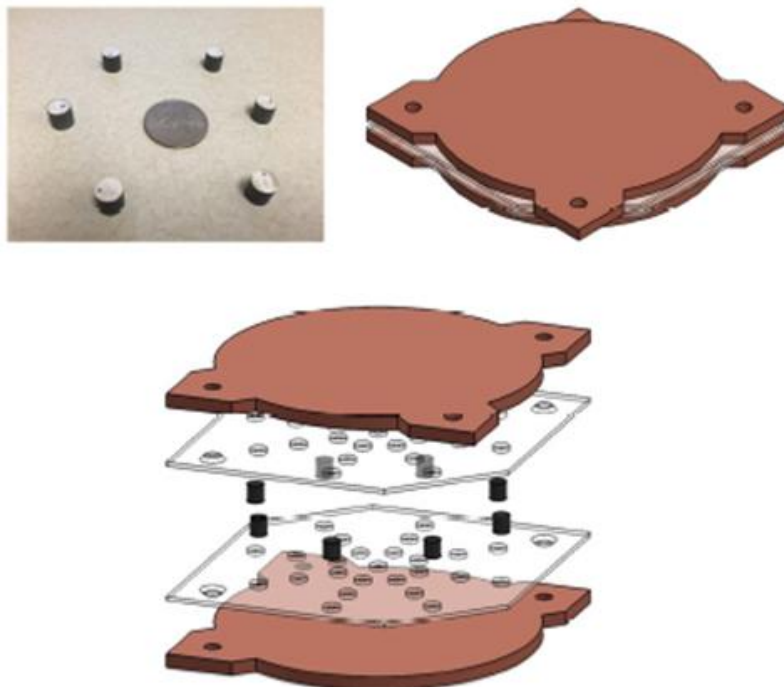
Xiang et al. (2013) realizaram um estudo teórico considerando o pavimento como uma viga Bernoulli-Euler infinita sobre uma fundação Winkler. Através desse estudo, analisou-se o módulo Winkler da fundação, o amortecimento e a velocidade dos veículos, além de fornecer uma base para estimativa da energia gerada. Esse estudo apontou que existe uma velocidade crítica, que conforme os veículos se aproximam dela, maior a conversão dos materiais piezoelétricos, porém é necessário considerar que a velocidade crítica nesse caso é de aproximadamente 170 m/s, impraticável para condições reais.

Em um estudo similar, Zhang et al. (2015) consideraram uma modelagem diferente para a abordagem matemática, pois as equações de Xiang et al. (2013) não possuíam uma resposta a pavimentos com um subleito mole. Nessa nova abordagem, o pavimento é descrito como uma placa sobre uma fundação Winkler. Esse novo modelo ainda conta com a diferenciação de uma carga de roda simples e a carga de quatro rodas.

Os resultados demonstram que é um erro considerar a energia convertida pela passagem de uma carga de quatro rodas sendo apenas uma carga de uma roda quatro vezes maiores, pois existem interações entre as cargas e conversores, que podem anular parte da geração. O estudo demonstra que o posicionamento adequado dos conversores, além da velocidade do veículo, posição da carga e condição da fundação alteram os resultados de voltagem e energia. Um máximo de 41,2 mW e 47,3 mW foram encontrados para a passagem de cargas de uma e quatro rodas, respectivamente.

Um estudo de viabilidade foi desenvolvido por Roshani et al. (2016) para a aplicação de um protótipo de gerador piezoelétrico, desenvolvido com discos de material PZT inseridos entre duas placas de cobre (figura 26), para ser embutido nos pavimentos.

Figura 26 - Protótipo desenvolvido com cobertura de cobre

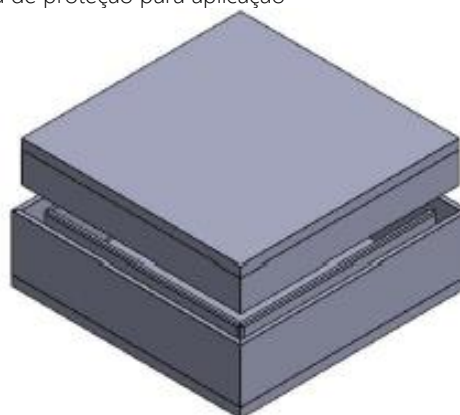


(fonte: ROSHANI et al., 2016)

A viabilidade do protótipo foi testada através de testes de compressão uniaxial com uma *Universal Testing Machine* (UTM). Entre as conclusões do estudo, a consistência de geração do protótipo indicou que existe uma boa durabilidade. A temperatura também mostrou pouca influência para cargas maiores, quando dentro do intervalo entre 4°C e 22°C. A energia atingida com base nos ensaios laboratoriais é de aproximadamente 1080 Wh por ano, considerando um tráfego diário de 100 mil veículos, com um custo de protótipo de aproximadamente US\$ 200,00.

Em novo estudo laboratorial, Roshani et al. (2018) testaram dois protótipos, um semelhante ao apresentado previamente, e outro constituído de vários cilindros de PZT com diâmetro de 50 mm e espessura de 3 mm, conforme figura 27. A partir dos testes com equipamentos laboratoriais, realizou-se análises de elementos finitos para quantificar a energia que poderia ser obtida com cada protótipo. Os protótipos 1 e 2 geraram então 360 e 170 Wh anuais, respectivamente, para uma passagem de 40 mil veículos diários.

Figura 27 - Protótipo de discos de PZTe caixa de proteção para aplicação



(fonte: adaptado de ROSHANI et al., 2018)

Estudo similar foi desenvolvido por Papagiannikis et al. (2016), onde 2 protótipos foram ensaiados também e analisados. O primeiro protótipo era composto de 3 camadas de 25 elementos de retangulares, com os espaços entre os mesmos preenchidos por epóxi. O protótipo IV era composto de 5 camadas circulares de PZT, gerando um cilindro de aproximadamente 36 mm de altura. Os autores estimaram que seria possível atingir uma quantidade de energia elétrica de até 240 Wh com o protótipo IV e aproximadamente 93 Wh com o I, considerando a passagem de 30 mil veículos.

Xiong e Wang (2016) desenvolveram um Coletor de Energia Piezoelétrico (PEH, na sigla em inglês) e testaram em um trecho experimental. O protótipo consistia em discos de PZT dentro de um pacote de proteção feito de plásticos, de acordo com a figura 28.

Figura 28 - Protótipo de Coleta de Energia (PEH) testado em trecho experimental



(fonte: XIONG; WANG, 2016)

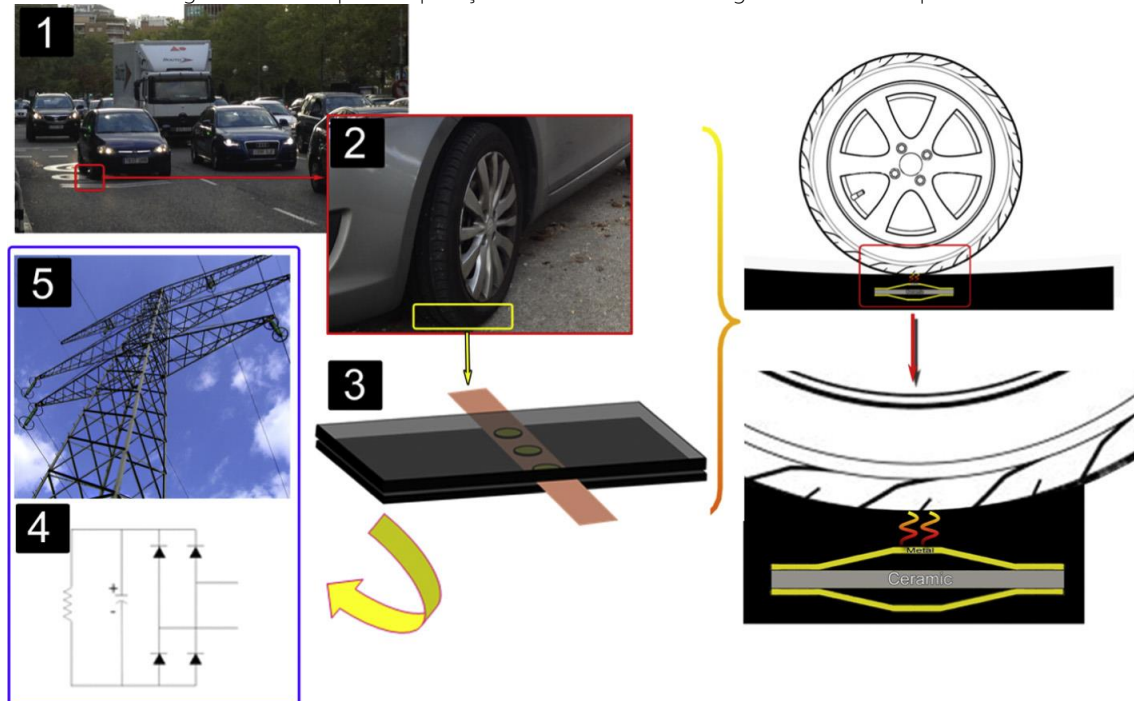
Esse pacote impede a contaminação do PZT por químicos, mantém o material seco, evitando possíveis curtos da parte elétrica e transfere os esforços de maneira distribuída para os discos internos. A saída média de potência foi de 3,106 mW, sendo essa dependente do total de carga do eixo. Uma análise dos resultados indicou que apenas 14,43% da carga aplicada ao pavimento é transmitida para o sistema piezoelétrico. Baseado nisso, os autores concluem que ainda existe espaço para melhorias no sistema e ressaltam que mesmo assim os resultados são animadores para uma tecnologia ainda em desenvolvimento.

Em um estudo com aplicação em pavimentos asfálticos experimentais, conforme demonstra a figura 29, Moure et al (2016) testaram diversas configurações de címbalos com 29 mm de diâmetro. Os conversores que tiveram melhores resultados em laboratório foram aplicados em

um pavimento asfáltico para avaliação. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade de atingir uma conversão de 0,126 W em 100 metros, onde poderia se colocar até 30 mil conversores címbalos.

Considerando o tráfego das regiões de Madrid, os autores concluem que é possível atingir até 1,65 kWh de energia elétrica a cada 100 metros, ou uma densidade energética de 5,18 kWh/m². O estudo ainda aponta para uma densidade energética efetiva, considerando apenas a área dos címbalos. Desse modo a densidade energética poderia atingir 45,29 MWh/m² na região mais movimentada da cidade, uma densidade energética próxima a painéis fotovoltaicos.

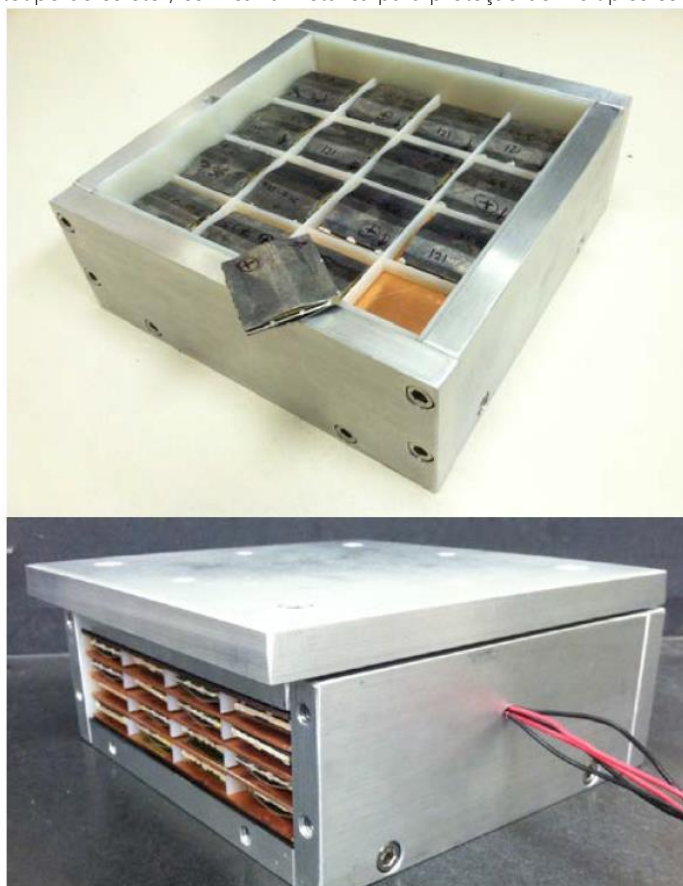
Figura 29 - Exemplo de aplicação de um coletor de energia címbalo na Espanha



(fonte: MOURE et al., 2016)

Baseando-se nos projetos dos címbalos, Yesner et al. (2016) desenvolveram um novo modelo Bridge, operando no modo d_{33} . Um protótipo para geração de energia foi criado utilizando 64 bridges individuais, demonstrado na figura 30, gerando 2,1 mW para uma carga de 500 libras com uma frequência de 5 Hz e carga resistiva de 400 k Ω . Os autores ainda concluíram que uma carga simples gerava uma saída de energia linear, indicando que esse protótipo poderia ser utilizado como sensor para distinguir os tipos de veículos, possibilitando a monitoração do nível de tráfego.

Figura 30 - Protótipo de coletor, com caixa metálica para proteção de múltiplos conversores Bridge

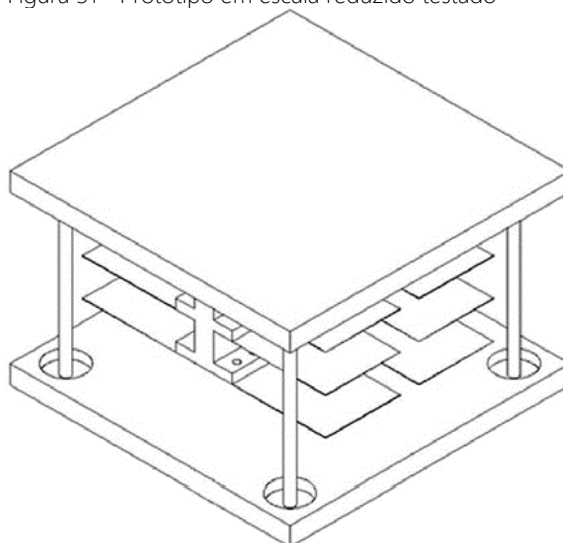


(fonte: YESNER et al., 2016)

Esses formatos foram testados em novo estudo, (YESNER et al., 2017), onde os autores testaram a confiabilidade do formato, porém houve falhas mecânicas após diversas repetições de ciclos, ocorrendo normalmente na resina epóxi. Além disso foi constatado que as capas metálicas geralmente usadas possuem uma rigidez elevada, dificultando a deformação do PZT e diminuindo dessa forma a possibilidade de geração de energia elétrica. Os autores recomendam a utilização de capas de aço mais finas ou a substituição por capas de bronze.

Outro protótipo de geração de energia foi proposto por Song et al. (2016). O gerador se baseia na utilização de vigas de material piezoelétrico em balanço, com um pedaço de cobre posicionado na ponta, para manter a vibração da viga em uma frequência natural de aproximadamente 13 Hz. O gerador proposto tem dimensões de 30x30x10 cm, com capacidade para um total de 48 vigas. O teste experimental usou uma escala reduzida, com um gerador de 15x15x10 cm e uma capacidade de 12 vigas internas, representado na figura 31.

Figura 31 - Protótipo em escala reduzido testado

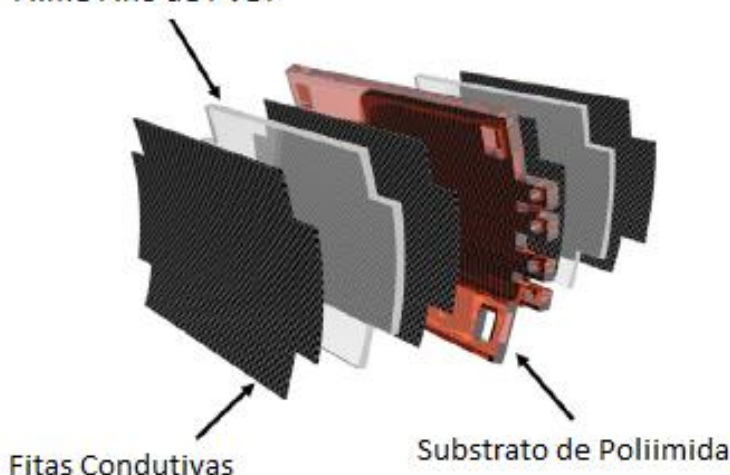


(fonte: SONG et al., 2016)

Através dos resultados obtidos pela escala reduzida, o protótipo em escala normal poderia gerar uma densidade energética de $4,91 \text{ Wh/m}^2$ com a passagem de 600 veículos sobre o gerador. Um total de energia de 2,95 kWh poderia ser atingido ao longo de 1 quilômetro de rodovia. Os autores ressaltam que esses resultados são baseados em um estudo em escala, e precisam de uma aplicação real para a validação desses resultados, além de mais estudos sobre a tecnologia.

Outro tipo de gerador foi apresentado por Jung et al. (2017), utilizando um módulo com conversores baseadas em PVDF, demonstrados na figura 32, em alternativa aos materiais PZT convencionais utilizados pelos outros autores. Os testes laboratoriais desse módulo atingiram até 200 mW. Além da energia significativa, os autores ressaltam que as características flexíveis do PVDF permitem que mais conversores sejam alocados em paralelo dentro de um módulo, gerando maior quantidade de saída de potência e energia.

Figura 32 - Exemplo de conversor com Filme de PVDF

Filme Fino de PVDF

(fonte: adaptado de JUNG et al., 2017)

Na tentativa de gerar diretrizes para o estudo dos materiais piezoelétricos em pavimentos, Chen et al. (2016) criou um mecanismo de testes em escala reduzida, demonstrado na figura, para testar as características que interferem na geração de energia elétrica a partir da energia

mecânica. Utilizando um teste desenvolvido e aplicando uma lei de escala, foi possível demonstrar que a energia depende do tempo de aplicação da carga, a velocidade dos veículos, espaçamentos entre veículos, posicionamento e tamanho dos geradores piezoelétricos.

3.1.3 Custos de implantação da energia piezoelétrica

Os custos de implantação da tecnologia piezoelétrica não são um consenso entre os pesquisadores. Em um relatório para a Comissão de Energia da Califórnia, Hill et al. (2014) estimaram que o preço dessa tecnologia varia entre faixas de 0,08 e 0,20 US\$/kWh, utilizando dados fornecidos pelos fabricantes. Esse custo é altamente dependente do volume de tráfego esperado nas vias onde a tecnologia seria instalada. Os autores estimaram que seria necessária uma densidade energética próxima aos 300 W/ft² para atingir esse nível econômico.

Considerando que Roshani et al. (2018) citou que a energia convencional custa nos Estados Unidos entre a faixa de 0,15 até 0,30 US\$/kWh, os valores estimados por Hill et al. (2014) colocariam a tecnologia piezoelétrica em um patamar de competitividade, mas esses números possuem grande variação em diferentes estudos.

Wang et al. (2018) estimaram valores teóricos para os diferentes tipos de *Energy Harvesting* com base em estudos anteriores. O valor encontrado foi aproximadamente 106 US\$/kWh. Entretanto no mesmo estudo, Wang et al. classificaram a tecnologia com um TRL de 4, conforme mencionado previamente. Isso indica que ainda existe espaço para melhorias da tecnologia, e os valores devem cair se utilizados apenas em regiões com alto volume de tráfego.

Em outra estimativa teórica, Guo e Lu (2017a) fizeram estudos sobre os potenciais de *Energy Harvesting* em todas as vias da Flórida, para sistemas térmicos ou piezoelétricos. Baseando-se no estado atual da tecnologia, os valores variam entre 35 a 106 US\$/kWh quando considerada uma vida útil de 5 a 15 anos. Os preços caem conforme a vida útil aumenta, devido ao custo baixo de manutenção e alto de implantação inicial. O custo alto estimado cai drasticamente quando apenas as áreas com o maior custo de tráfego são consideradas, podendo chegar ao valor de 1,77 US\$/kWh, começando a tornar a tecnologia mais atrativa.

Guo e Lu (2017b) ainda propuseram outro sistema, utilizando uma camada de material piezoelétrico, envolto em duas camadas de pavimento condutivo, inseridas entre as camadas da estrutura. Esse tipo de tecnologia teria um alto valor inicial de aplicação, entretanto utilizando valores obtidos por testes laboratoriais seria possível atingir um valor de 19 US\$/kWh durante uma vida útil de 15 anos. O modelo apresenta um alto valor em primeiro momento, mas traz diversos benefícios a estrutura de modo geral, como a possibilidade de facilitar o *healing* do pavimento, utilizando a própria condutividade dos materiais para isso.

Moure et al. (2016) realizaram uma estimativa de preço para a geração de energia produzida por címbalos instalados em um trecho experimental. Baseando-se nos dados de tráfegos de Madrid, os autores estimaram que a tecnologia no estado atual pode atingir valores de 1,98 €/kWh, para volumes de tráfego médios para alto.

O estudo ainda ressalta que por ser uma tecnologia ainda em estágio inicial, o preço tende a cair. Considera-se que o custo para produção de energia através de materiais piezoelétricos possa cair até 90% em decorrência dos avanços dos estudos e aplicação na área, tornando-se competitiva com outras energias renováveis.

3.1.4 Sistema fotovoltaico

A utilização de painéis fotovoltaicos para a geração de energia já é uma prática bem documentada e utilizada em larga escala. A utilização de um sistema fotovoltaico no pavimento é um modo de otimização para os dois sistemas, preenchendo a demanda de espaço geográfico dos coletores, otimizando as vastas extensões de ruas e pavimentos. Conforme Wang et al. (2018), a primeira aplicação dessa tecnologia em ruas foi o protótipo de estacionamento solar em 2009, desenvolvido pela FHWA.

Um exemplo que demonstra claramente o potencial dessa tecnologia é a aplicação realizada em Amsterdã de uma ciclovía com tecnologia solar embebida na estrutura, no ano de 2014, noticiada pelo website CleanTechnica e representada na figura 33. O teste, realizado pela empresa SolaRoad, foi considerado uma aplicação bem-sucedida, com os resultados dos 70 metros implantados gerando mais que os 70 kWh/m² previstos em testes laboratoriais, atingindo 9.800 kWh anuais. Esses valores seriam o suficiente para abastecer o consumo médio de três moradias holandesas.

Figura 33 - Ciclovía Solar instalada em Amsterdã



(fonte: CLEANTECHINICA²)

Em outro teste com esse princípio na França, noticiado pelo jornal The Guardian em 2016, um trecho de teste de 1 km foi revestido com um protótipo de rodovias solares, semelhante a representada na figura 34. A empresa criadora do protótipo afirma que o produto é capaz de gerar a energia para abastecer uma residência francesa média com 20 m² de pavimento. Além dessa quantidade energética elevada, a companhia afirma, em seu *website* que as placas

² Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2017/03/12/dutch-solar-bike-path-solaroad-successful-expanding/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

utilizadas possuem um cuidado aos problemas de atrito e resistência que podem ocorrer com o tráfego pesado.

Figura 34 - Exemplo da rodovia solar aplicada na França



(fonte: Website da empresa COLAS³)

A possibilidade de utilização de painéis fotovoltaicos em rodovias não está apenas na aplicação direta em pavimentos. Nordmann e Clavadetscher (2004) realizaram estudos das aplicações em barreiras sonoras. Conforme os autores mencionaram, essa tecnologia já vinha sendo desenvolvida na Europa desde os anos 1989, na Suíça.

Segundo estudo, a presença de barreiras sonoras entre rodovias é uma exigência das leis europeias. A utilização dos painéis fotovoltaicos nas barreiras, serve para preencher essa obrigatoriedade, além de gerar vantagens, como um aproveitamento melhor do espaço, alto potencial, fácil acessibilidade para manutenção e poderia receber incentivos do governo para instalação nas rodovias públicas. A geração potencial na Europa Central estimada pelos autores foi de 680 GWh por ano.

Dezfooli et al. (2017) testaram dois protótipos de pavimentos com capacidade de conversão fotovoltaica para geração de energia em pavimentos. Um desses protótipos envolve uma placa solar embebida em duas camadas de pavimentos de borracha. Os testes foram desenvolvidos medindo parâmetros considerados críticos para a aplicação dessas placas em rodovias, como resistência a derrapagem, escoamento de água e como a energia é afetada com a passagem de carros. A carga dos carros causa uma diminuição na energia e gera a necessidade de utilização de uma camada de proteção para não danificar os cabos.

Wang et al. (2018) estimaram o preço da energia elétrica gerada por painéis fotovoltaicos como sendo de 0,45 US\$/kWh. Os autores estimaram o TRL dessa tecnologia em 9, a máxima na escala. O potencial de geração desse sistema é superior ao demais e seu preço por kWh é menor. Em contrapartida, os autores ressaltam que a utilização na pavimentação ainda possui desafios que devem ser superados, como o atrito do contato pneu-pavimento e a resistência das placas.

³ Disponível em: < <http://www.wattwaybycolas.com/en/#applications> >. Acesso em: 09 mar. 2018.

A previsão de geração de energia depende basicamente da irradiação solar e de horas de sol sobre a placa. Dependendo da localização, certos ângulos auxiliam no potencial de geração, entretanto para aplicação em rodovias essas placas estarão na horizontal, sobre a superfície, ou em vertical, como barreiras.

3.1.5 Sistemas coletores térmicos

Os sistemas coletores térmicos, ou coletores solares, são construídos com a instalação de dutos embebidos na estrutura do pavimento, onde um fluxo de fluídos é responsável por absorver o calor presente no revestimento.

A utilização de dutos preenchidos por fluídos teve em suas primeiras aplicações o descongelamento da neve sobre a pista, e sua primeira aplicação registrada na Suíça em 1994, conforme relata Eugster (2007). O sistema batizado de SERSO coleta o calor próximo a superfície do pavimento durante o verão, e estoca a água em um depósito abaixo das rochas locais. Nos períodos de inverno o calor estocado é reutilizado para o controle da temperatura da superfície, mantendo-a superior aos 0°C e, conseqüentemente, impedindo a formação de gelo na pista e acúmulo de neve.

Outras aplicações possíveis para o sistema foram propostas por Lee et al. (2014) que, ao estudar sistemas pilotos dessa tecnologia, afirmam que existe a possibilidade de utilização desses dutos para o abastecimento de água quente ou aquecimento das residências.

Procurando determinar as melhores características para os coletores solares, Bobes-Jesus et al. (2013) realizaram uma revisão na bibliografia até a época, estudando diferentes padrões, como geometria, espaçamento, material e diâmetro dos tubos e propriedades térmicas dos pavimentos. O estudo demonstrou que considerando a parte térmica, a melhor distribuição para a tubulação é no formato de serpentina, e o uso de cobre como material mais eficiente.

Os autores ainda apontam que a condutividade dos pavimentos é um elemento que permite que os dutos estejam em uma maior profundidade, entretanto não altera a temperatura de superfície.

Outra proposta apresentada foi a de Pascual-Muñoz et al. (2014). Nesse estudo, os autores eliminam a utilização de dutos, considerando uma camada de pavimento altamente poroso entre duas camadas de um pavimento *gap-graded*. Análises demonstraram que esse sistema possui uma boa eficiência térmica, chegando até 95%.

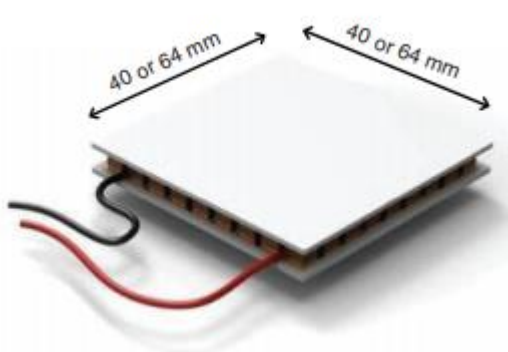
A maior parte dos estudos divulgados sobre o sistema coletor térmico foca na eficiência térmica, não focando na possibilidade de produção de eletricidade. Um dos estudos pioneiros no âmbito dessa conversão está o estudo de Hasebe et al. (2006). A proposta dos autores envolve a utilização de um gerador termoelétrico no sistema. Esse tipo de gerador gera energia elétrica a partir do diferencial de temperatura da água quente e fria. Dutos no pavimento fornecem a água quente, enquanto os autores propõem a utilização da água de um rio próximo. Quanto maior a diferença de temperatura, maior a possibilidade de geração de energia elétrica pelo sistema.

Esse comportamento foi demonstrado através de testes, onde próximo ao meio dia a temperatura da água do rio esteve no seu valor máximo, e a quantidade de potência gerada atinge o mínimo. O potencial desse sistema é altamente dependente da eficiência do gerador

termoelétrico. Estudos de Kraemer et al. (2014) específicos para esse tipo de gerador mostram uma eficiência de 8-10%, com uma possibilidade de atingir 14%.

Um método em desenvolvimento baseado em geradores termoelétricos é a utilização do gradiente de temperatura presente no pavimento, porém sem a utilização de fluídos. Um protótipo desenvolvido por Datta et al. (2017), demonstrado na figura 35, consiste em duas placas de cerâmica com materiais termoelétricos no interior. Um coletor de calor colocado próximo a superfície aumentaria a temperatura da cerâmica superior, aumentando o gradiente. O interior de um pavimento possui um gradiente de temperatura de em torno de 20°C conforme os autores. Esse gradiente poderia gerar 0,5 kWh por dia segundo os autores com um apenas um protótipo.

Figura 35 - Protótipo coletor termoelétrico



(fonte: DATTA et al., 2017)

Outra proposta para geração de energia é a utilização de uma turbina solar, conforme proposto por Garcia e Partl (2014). O sistema proposto pelos autores envolve a utilização de dutos de ar e uma chaminé. A utilização de ar ao invés de água possui vantagens, como a eliminação do risco de vazamentos que podem danificar a estrutura. O formato apontado como mais eficiente para utilização de água por Bobes-Jesus et al. (2013), uma serpentina de cobre é de difícil manutenção.

Garcia e Partl (2014) encontraram num primeiro momento uma eficiência de 12% para a chaminé e 10% no aquecimento do ar, gerando uma eficiência total do sistema de aproximadamente 1% para a geração elétrica. Os autores, entretanto, dizem que o sistema possui grande margem para melhorias.

Seguindo estudos para o sistema apresentado, Chiarelli et al. (2015) realizou mais estudos em protótipos desse sistema, demonstrado na figura 36. Os autores concluíram que o sistema é viável. A eficiência de coleta de energia poderia ser de até 15% com dimensões e diâmetros da chaminé projetados para a geração de energia.

Os pesquisadores consideraram que o sistema ainda pode ser utilizado para controle de temperatura da superfície, sendo uma ferramenta para descongelamento ou resfriamento. A diminuição da temperatura é de interesse, pois colabora com a diminuição das deformações permanentes do pavimento.

Outro benefício que atrai atenção é a mitigação dos efeitos da Ilha de Calor Urbana. A temperatura alta dos pavimentos é uma das grandes responsáveis pela Ilha de Calor. Consequentemente, a diminuição dessa temperatura combateria os efeitos negativos causados, inclusive gerando economias de resfriamento nas edificações próximas as vias.

Um protótipo dos estudos anteriores foi desenvolvido por Chiarelli et al. (2017) para ser testado e utilizar simulações computacionais. Esse estudo focou na parte da diminuição da temperatura de superfície do asfalto. A câmara coletora de ar, batizada pelos autores de caixa de ar, deve ser projetada para a necessidade, seja ela geração de energia ou redução da temperatura.

Figura 36 - Protótipo de um sistema de coleta de energia a ar



(fonte: Chiarelli et al. 2015)

A caixa de ar é um dos fatores determinantes da temperatura de saída da chaminé. Uma maior temperatura resulta em um maior potencial de coleta de energia do material, entretanto isso indicaria um menor potencial da redução da temperatura do pavimento.

Na tentativa de quantificar o custo da geração de energia através de coletores solares, Guo e Lu (2017a) realizaram análises quantitativas. O estudo concluiu que seria possível obter até 55 GWh no estado da Flórida, caso toda as rodovias recebam o sistema coletor térmico. Considerando os custos de implantações e manutenção teóricos, os autores concluíram que é possível atingir um valor de 2,31 US\$/kWh.

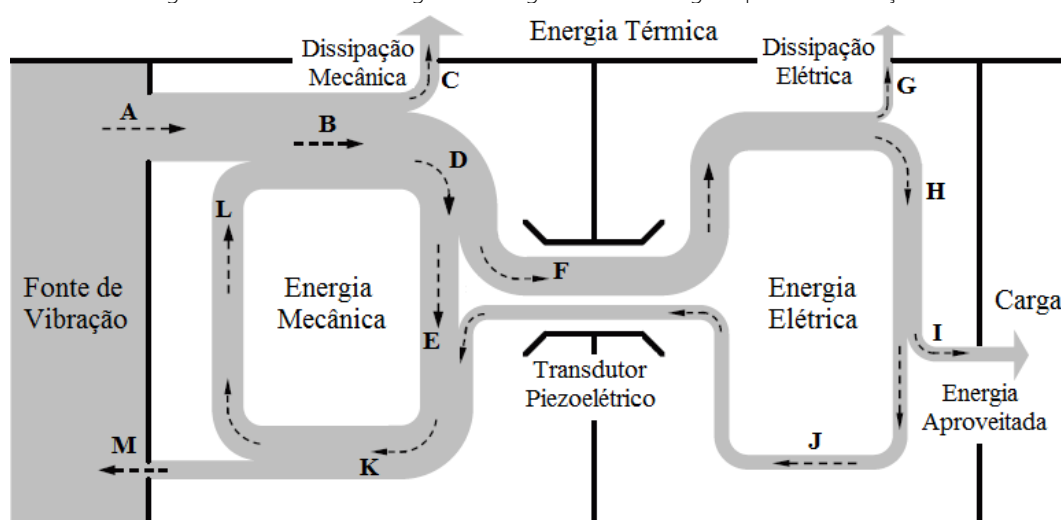
Wang et al. (2018) também realizaram levantamentos do preço do kWh gerado pelo sistema. Nos cálculos dos autores, essa energia possui um preço de aproximadamente 4,21 US\$/kWh. Os autores ressaltam que essa tecnologia ainda possui bastante espaço de crescimento, com a capacidade de estocar água quente, descongelamento e resfriamento da superfície bem desenvolvidos, necessitando mais estudos para uma conversão eficiente para energia elétrica.

3.2 NÍVEIS DE ENERGIA EM UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA

A figura 37 apresenta uma visão geral de três formas de energia (mecânica, elétrica e térmica) relacionadas nos dispositivos de micro geração de energia piezoelétricos. As energias mecânica e elétrica estão conectadas por meio do transdutor piezoelétrico, sendo este um caminho bidirecional. Os dois tipos de energia são convertidos em energia térmica por elementos

dissipativos, tais como amortecedores mecânicos ou resistências elétricas, sendo um tipo de energia que é desperdiçada.

Figura 37 – Níveis de energia em um gerador de energia a partir de vibrações



Este fluxograma de energia representa, de forma intuitiva, os caminhos percorridos por cada um dos diferentes tipos de energia a cada ciclo de vibração. A fonte de vibração do ambiente é a entrada de energia para o sistema na forma mecânica, ramo **A**. Uma porção da energia mecânica é mantida no domínio mecânico como a energia vibratória, laço que percorre **B-D-E-K-L-B**. Um parte desta energia vibratória é dissipada, ou seja, convertida em energia térmica, ramo **C**. Outra quantidade de energia mecânica é convertida em energia elétrica, ramo **F**, a partir de um transdutor piezoelétrico.

No domínio elétrico, para o caso de circuito aberto (nenhuma carga conectada ao transdutor piezoelétrico) a energia elétrica é armazenada temporariamente na capacitância interna do componente e, posteriormente, retorna para o domínio mecânico. Com os diferentes tipos de circuitos conectados, esta energia elétrica pode ter diferentes destinos:

- ser convertida em energia térmica, ramo **G**, ou seja, dissipada;
- ser captada em um dispositivo de armazenamento de energia e/ou utilizado para alimentar uma carga, ramo **I**;
- retornar ao domínio mecânica, ramo **J**.

A energia não utilizada irá retornar à fonte de vibração do ambiente, ramo **M**. A captação e dissipação de energia são duas funções básicas que ocorrem dentro de um dispositivo de colheita. Devido às não idealidades dos componentes, o circuito de interface gera dissipação de energia durante o processo.

3.3 PIEZOELETRICIDADE

A descoberta do efeito piezoelétrico ocorreu no ano de 1880 pelos irmãos Curie e sua primeira utilização prática foi em sonares durante a primeira guerra mundial por Paul Langevin. Nesta aplicação foram usados cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz. A necessidade de uma

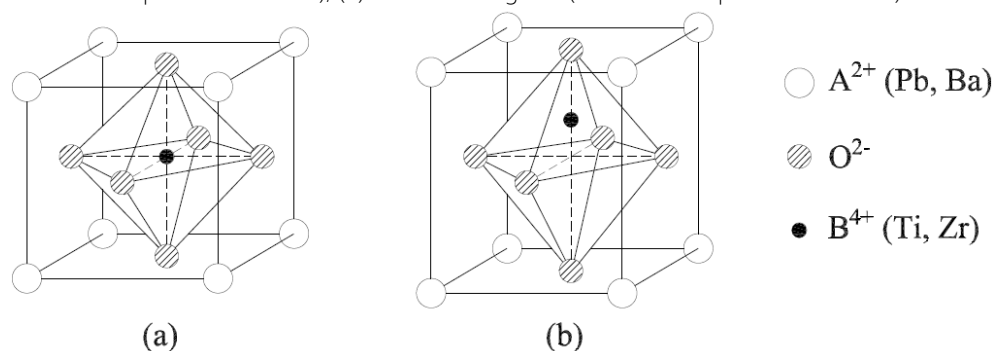
fonte de alta tensão para excitar os transdutores dificultava sua utilização, iniciando assim, o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos.

A piezoeletricidade é definida como sendo a propriedade que alguns materiais dielétricos possuem desenvolvendo uma deformação mecânica quando são submetidos a um campo elétrico. De forma inversa, quando um material piezoelétrico é submetido a uma deformação mecânica, este irá gerar uma polarização elétrica. Nas duas aplicações, a inversão no sentido da aplicação da força, mecânica ou elétrica, irá gerar a inversão no sentido do efeito.

O efeito piezoelétrico ocorre de forma natural em um número elevado de cristais, sendo alguns deles o de quartzo, de turmalina e o tartarato de potássio e sódio. Para estes cristais apresentarem o efeito piezoelétrico, devem apresentar a estrutura interna sem centro de simetria. Um componente de tensão mecânica (sendo compressão ou tração) aplicado a este tipo de cristal irá alterar a distância dos elementos de carga positivas e negativas em uma célula elementar, causando assim uma polarização elétrica na superfície do cristal. Este efeito é aproximadamente linear, assim a intensidade da polarização varia proporcionalmente com a intensidade e direção da tensão mecânica aplicada.

Além dos cristais mencionados anteriormente, um grupo importante de materiais piezoelétricos sintéticos são as cerâmicas piezoelétricas, sendo um exemplo de PZT. Estes materiais são ferroelétricos policristalinos com a estrutura de cristal com forma Perovskita (estrutura tetragonal/Romboedral aproximadamente cúbica). A formulação geral desta cerâmica se dá por $A^2+B^1+O_3^{2-}$. A variável A indica um íon divalente de metal, como bário ou chumbo, B denota um íon tetravalente de metal, tal como titânio ou zircônio. Esta estrutura, em sua forma elementar, é apresentada na figura 38.

Figura 38 - Estrutura cristalina de uma cerâmica piezoelétrica elementar: (a) Simetria cúbica simples (acima de temperatura de Curie); (b) Simetria tetragonal (abaixo de temperatura de Curie)



Outra característica importante em cerâmicas piezoelétricas é conhecida como o ponto (ou temperatura) de Curie. O cristal elementar da figura 38(a) exibe simetria cúbica simples quando acima da temperatura de Curie. Essa estrutura é centrossimétrica com a localização de cargas positivas e negativas coincidindo, portanto, não há dipolos presentes no material. Assim, este material apresenta um comportamento paraelétrico.

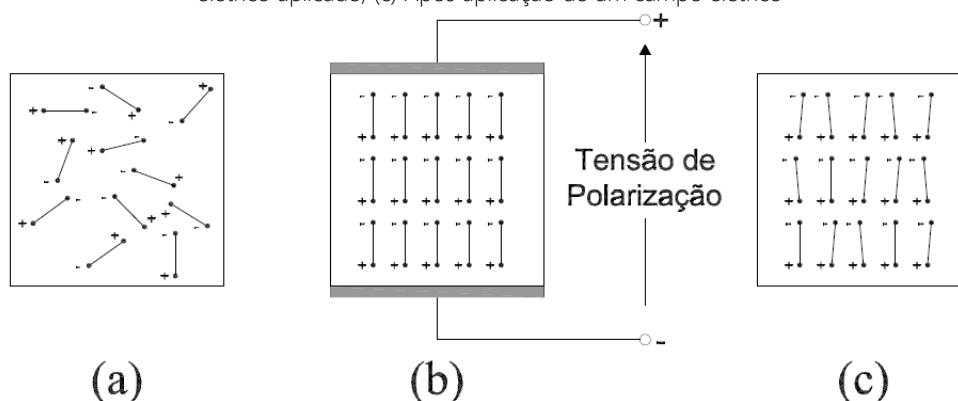
Abaixo da temperatura de Curie, o cristal elementar assume simetria tetragonal em que a localização de cargas positivas e negativas são assimétricas (figura 38(b)), de modo que cada célula primária apresenta um dipolo elétrico interno. A localização deste dipolo pode ser revertida e alterada em certas direções pela aplicação de um campo elétrico. Estes materiais são denominados ferroelétricos e seu comportamento elétrico pode ser compreendido, de forma análoga, como o comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos. A analogia pode

ser continuada, uma vez que, a polarização de materiais ferroelétricos apresenta histerese, e suas constantes dielétricas são muito elevadas e em função da temperatura, como a permeabilidade dos materiais ferromagnéticos.

O efeito piezoelétrico pode ser causado pela mudança da polarização do material com a variação da temperatura, como descrito anteriormente. Contudo, os dipolos não são orientados aleatoriamente ao longo do material quando este encontra-se na temperatura abaixo do ponto de Curie.

Dipolos vizinhos alinham-se uns com os outros de modo a formar regiões de alinhamento local conhecido como domínio Weiss. Dentro de um domínio, portanto, todos os dipolos estão alinhados, atribuindo um momento de dipolo para o domínio e gerando uma polarização líquida (momento de dipolo por unidade de volume). A polarização entre os domínios Weiss vizinhos difere de 90° ou 180° , devido à distribuição aleatória interna do material (figura 39(a)). Neste caso a polarização, e consequentemente o efeito piezoelétrico, não é obtido.

Figura 39 - Domínio Weiss para cerâmicas piezoelétricas: (a) Sem aplicação de campo elétrico; (b) Com campo elétrico aplicado; (c) Após aplicação de um campo elétrico



Com a aplicação de um forte campo elétrico a uma temperatura ligeiramente abaixo do ponto de Curie, denominada polarização, a cerâmica pode apresentar o efeito piezoelétrico em qualquer direção (figura 39(b)). Sob a ação deste campo, os domínios Weiss tendem ao alinhamento, alongando-se na direção do campo aplicado. Quando o campo é removido (figura 39(c)) os dipolos permanecem fixos quase que em alinhamento, atribuindo ao material cerâmico uma polarização remanescente e uma deformação permanente. O tratamento de polarização é geralmente realizado ao final da fabricação dos componentes

Após uma cerâmica piezoelétrica ser polarizada, quando submetido a uma tração mecânica, gera-se uma polarização elétrica, produzindo uma carga elétrica sobre a superfície do material. Caso os eletrodos da superfície do material conectados a um circuito, a carga elétrica produzida pode ser armazenada e utilizada.

As equações características construtivas de um cristal piezoelétrico são apresentadas de quatro formas distintas, sendo que todas descrevem a deformação ou esforço transformados em deslocamento elétrico ou campo elétrico. A apresentação é baseada no padrão ANSI/IEEE 176 para piezoelectricidade. A norma ANSI/IEEE assume que os materiais piezoelétricos são lineares, o que ocorre com campos elétricos e níveis de deformação mecânicos baixos.

As equações que descrevem as propriedades constitutivas piezoelétricas são baseadas no pressuposto de que a equação linear da elasticidade é acoplada com a equação de carga eletrostática por meio das constantes piezoelétricas.

Considerando a forma tensorial de deformação para deslocamento elétrico, as equações que descrevem o efeito piezoelétrico linear são descritas por:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= S_{ij}^E \sigma_j + d_{mi} E_m \\ D_m &= d_{mi} \sigma_i + \xi_{ik}^\sigma E_k\end{aligned}\quad (1)$$

onde: σ descreve o vetor da tensão mecânica [N/m²]; ε o vetor do componente de deformação [m/m]; E o vetor do campo elétrico aplicado [V/m]; ξ a permissividade do material [F/m]; d a matriz de constantes piezoelétricas [m/V]; S as constantes de conformidade elástica [m²/N]; D o vetor de deslocamento elétrico [C/m²]; e os índices $i, j=1,2,...,6$ e $m, k=1,2,3$ referem-se às diferentes direções que o material é submetido de acordo com o sistema de coordenadas.

3.4 APLICAÇÃO NA BR-290 – PILOTO PARA PROVA DE CONCEITO

Neste projeto de pesquisa, foi realizada a implantação de um sistema piloto de microgeração de energia através de transdutores piezoelétricos capaz de abastecer um sistema de sinalização viária, composto por tachas com lâmpadas LEDs formando um efeito estroboscópico, no quilômetro 76 da Pista Sul da BR-290, na pista 1 de cobrança automática da praça de pedágio de Gravataí.

Em conjunto com a concessionária, a praça de pedágio de Gravataí foi escolhida através de critérios operacionais e técnicos para a instalação, como a presença de outras duas faixas de cobrança automática, um volume de tráfego maior que as outras praças, além da maior segurança e controle para instalação do sistema na praça. O sistema piezoelétrico necessita de uma passagem alta de veículos para se tornar eficiente, portanto o maior volume de tráfego foi considerado um fator importante para a decisão de escolha da praça para a instalação do sistema.

A estrutura da praça de pedágio também foi determinante para a escolha. A instalação na rodovia fora da praça resultaria em uma maior dificuldade para a instalação, acesso aos sensores e controle do circuito. A segurança dos equipamentos também foi considerada, com a praça de pedágio fornecendo ponto e rede elétrica para instalação do *datalogger* para registro, local adequado para os circuitos de controle e monitoração evitando possíveis atos de vandalismo ou furtos.

A presença de duas faixas de cobrança automática permitiu que a instalação fosse realizada sem interromper a utilização do sistema de cobrança, apenas desviando o tráfego para a pista automática auxiliar. A instalação foi realizada durante a semana do dia 22/05/2018, mantendo a faixa fechada, com desvios, até o dia 25/05.

3.4.1 Circuito elétrico equivalente e sensores utilizados

A energia gerada pelo transdutor piezoelétrico, pode ser definida pelo deslocamento de cargas elétricas em função do tempo, ou seja, uma corrente elétrica. Com a finalidade de analisar a resposta do sistema, é comum utilizar a representação do modelo por meio de um circuito elétrico equivalente.

Uma analogia entre parâmetros mecânicos e elétricos pode ser utilizada para determinar o circuito equivalente a partir de um determinado sistema mecânico conforme apresentado na tabela 10.

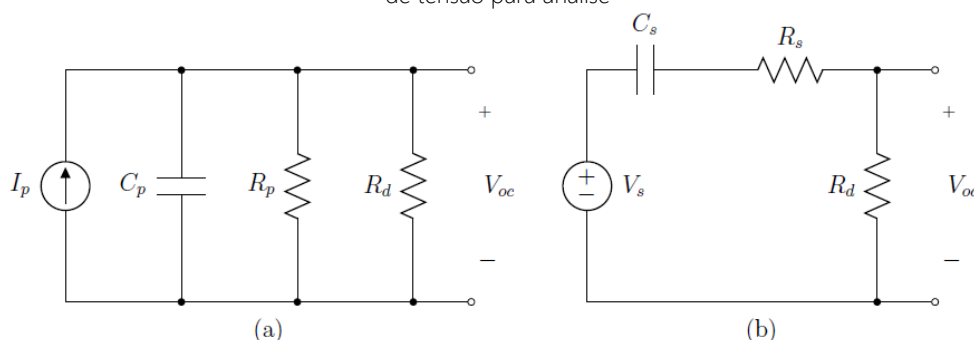
Tabela 10 – Analogia entre os parâmetros mecânicos e elétricos

Parâmetros Mecânicos		Parâmetros Elétricos	
F	Força	V	Tensão
v	Velocidade	i	Corrente Elétrica
m	Massa	L	Indutância
k	Constante de Mola	1/C	Elastância Elétrica
c	Amortecimento	R	Resistencia
d	Deslocamento	q	Carga

Para a modelagem de um circuito elétrico realizada a partir de um elemento piezoelétrico, a principal consideração deve ser a condição de ressonância do mesmo. Quando próximo à ressonância, o circuito se aproxima de uma rede RLC paralela com uma fonte de corrente alimentando o sistema.

Fora da condição de ressonância, a modelagem do elemento piezoelétrico se dá com a exclusão do indutor paralelo. O circuito equivalente do gerador piezoelétrico é apresentado na figura 40(a) onde I_p é a corrente gerada pelo deslocamento de cargas, V_{oc} é a tensão gerada com circuito aberto, C_p é a capacitância interna do elemento, R_p é a resistência série interna e R_d a resistência de perdas devido ao material piezoelétrico. Usualmente, por se tratar de um material isolante, R_d tem valores superiores a $1\text{ M}\Omega$.

Figura 40 - Representação do circuito de geração piezoelétrico: (a) Fonte de corrente; (b) Transformação em fonte de tensão para análise



Tratando o capacitor C_p e o resistor R_p como uma impedância, pode-se realizar a transformação da fonte de corrente com uma carga paralela em uma fonte de tensão com uma carga série. O resultado da transformação é apresentado na figura 40(b). Sendo R_d uma característica do elemento, este não é incluído na transformação e por se tratar de um valor muito maior que R_s pode-se considerar que a tensão V_{oc} é aproximadamente a tensão da fonte V_s .

O elemento piezoelétrico comercial escolhido e disponível provém do fabricante Mide, modelo PPA-1014, mostrado na figura 41.

Figura 41 - Elemento piezoelétrico PPA-1014



Esta escolha se deu por duas principais variáveis: potência máxima quando excitado a uma aceleração de 1 *g* e relação preço potência. Os dados comparativos são visualizados na tabela 11.

Tabela 11 – Avaliação dos elementos geradores

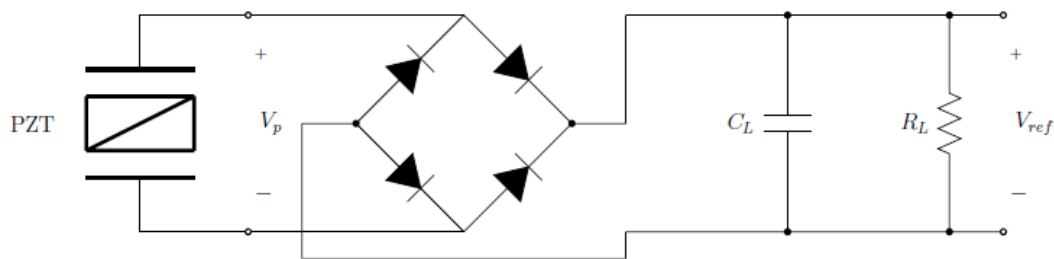
Modelo	Freq (1 <i>g</i>)	Pot. RMS (mW)	Área (mm ²)	Preço (US\$)	Preço/Pot
PPA-1001	60	1,8	956,8	36,73	20,41
PPA-1011	21	16	956,8	119,98	7,50
PPA-1012	23	7,1	1766,4	78,47	11,05
PPA-1013	NI	NI	1766,4	291,38	-
PPA-1014	60	9,8	500,4	69	7,04
PPA-1021	22	4,5	294,4	51,87	11,53
PPA-1022	60	2,9	79,92	45,22	15,59
PPA-2011	23,8	31	956,8	217,92	7,03
PPA-2014	60	14,9	500,4	193,44	12,98
PPA-4011	60	19,5	956,8	199,5	10,23

NI = Não Informado

O elemento piezoelétrico PPA-1014 utiliza a cerâmica PZT 5H que tem performance melhor que a cerâmica PZT 5A, comumente utilizada.

A corrente gerada pelo elemento piezoelétrico pode ser aproximada por uma onda senoidal e para utilização em sistemas eletrônicos esta deve ser retificada. A forma básica de realizar esta operação é a utilização de uma ponte retificadora de onda completa à diodos. Este circuito pode ser visto na figura 42. Após a retificação a tensão é considerada contínua pulsante, a inclusão de um elemento armazenador de carga deve ser prevista, para isto tem-se o capacitor C_L contemplado no circuito. Este elemento é essência para a aplicabilidade de qualquer sistema coletor de energia, já que o armazenamento de toda geração deve ser aproveitado. Um elemento dissipador genérico também é contemplado, no caso o resistor R_L , que emula o gasto energético do sistema.

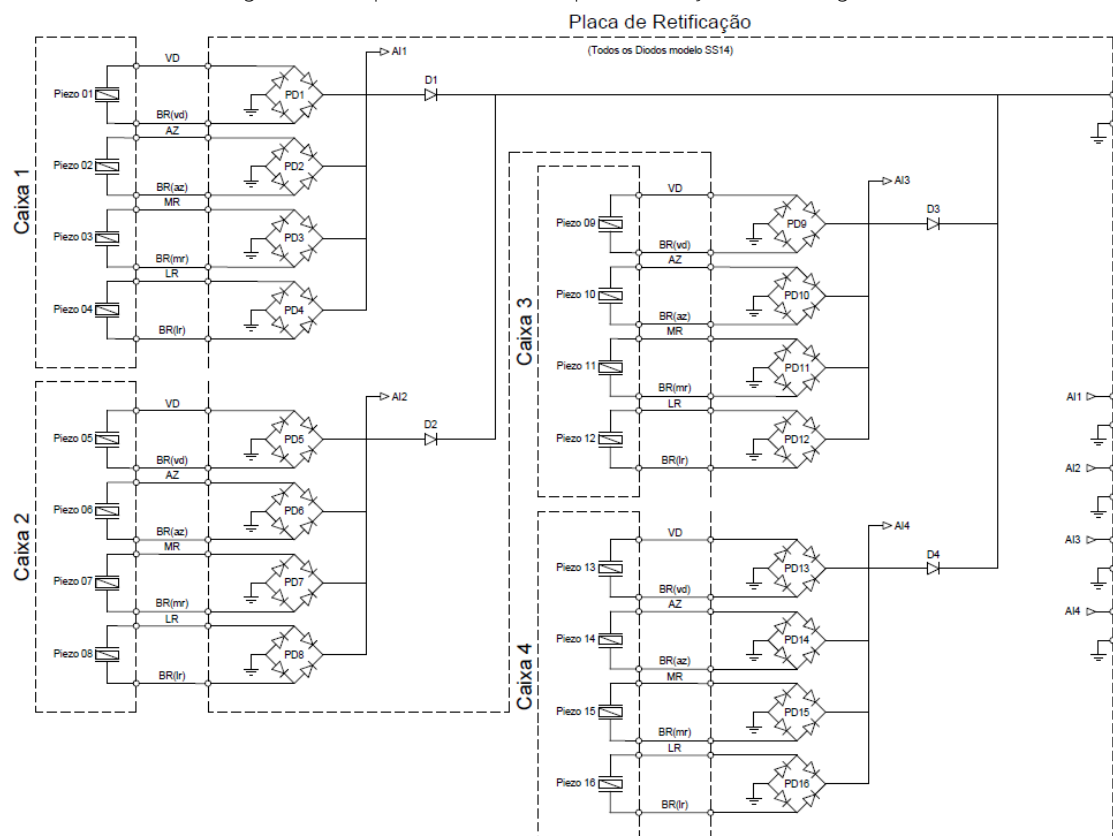
Figura 42 – Circuito de retificação de tensão



Em campo, a instalação dos dezesseis elementos piezoelétricos captadores de energia necessitam da etapa de retificação individual. A adoção deste esquema se dá pelo comportamento dual dos elementos piezoelétricos. Caso todos os elementos estivessem interconectados, a geração de energia em uma das células iria servir como fonte de energia para as outras células, causando uma deformação mecânica e dissipando a energia gerada.

A etapa de retificação tem dois propósitos: retificação do sinal alternado gerado, que facilita a utilização em sistemas eletrônicos, e a isolamento elétrico nas células, evitando o gasto energético. Com a instalação dos dezesseis elementos geradores divididos em grupos de quatro (quatro geradores em cada caixa) a o esquemático proposto e instalado é apresentado na figura 43. Os elementos geradores *Piezo 01* à *Piezo 16* são conectados às pontes retificadoras *PD1* à *PD16*.

Figura 43 - Esquemático instalado para retificação dos sinais gerados



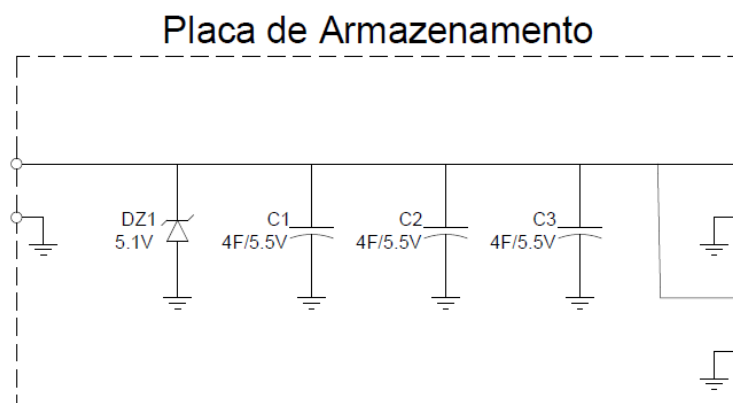
A fim de estimar e medir a geração individual de cada caixa é necessária a inclusão de quatro diodos (*D1* à *D4*). Esta medida é sugerida pela limitação do número de entradas do equipamento de medição. Indiscutivelmente, se existisse a possibilidade da captação do sinal individual de cada gerador, a avaliação final de geração teria um complemento de dados e a avaliação

individual de características de cada elemento. Com o sistema proposto a avaliação é feita em cada caixa, estimando a geração dos quatro elementos internos.

A interconexão das caixas pelos diodos *D1* à *D4* impede a influência entre as medições e possibilita a conexão de todos os sinais gerados para a etapa de armazenamento. Todos os diodos utilizados são do modelo SS14. São diodos de barreira Schottky, que para a corrente gerada pelos elementos piezoelétricos tem uma perda máxima de 0,2 V em sua barreira de depleção.

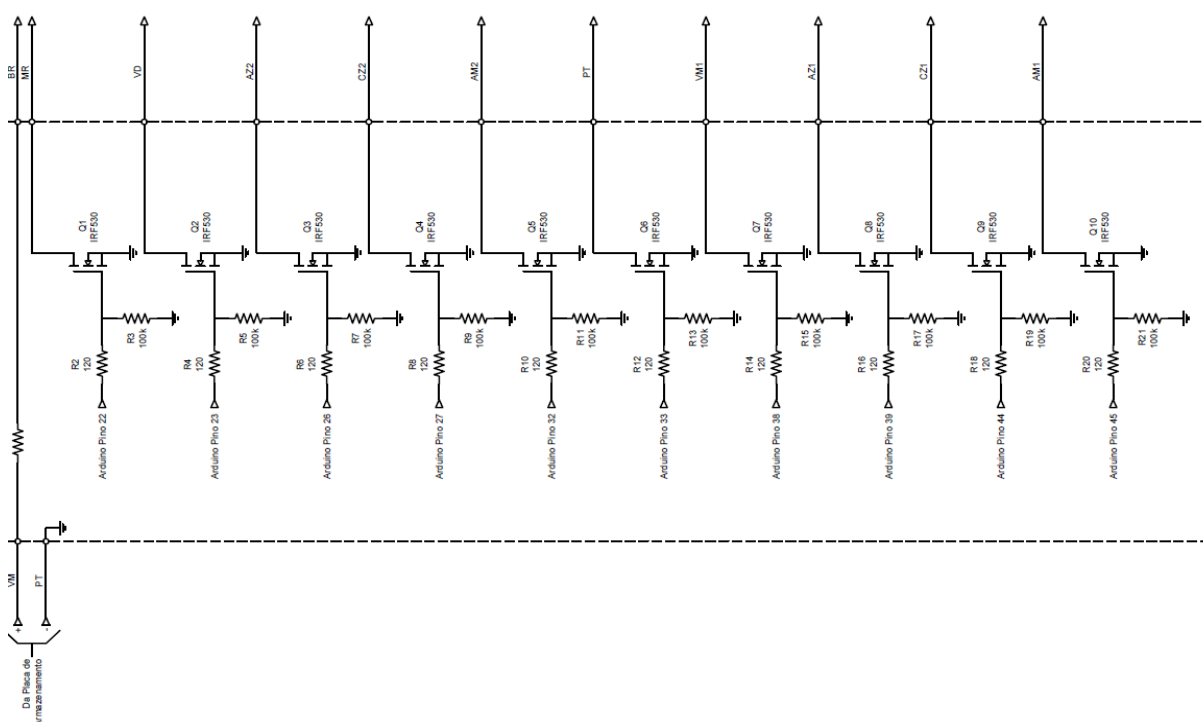
Para armazenar a energia gerada são utilizados capacitores de alto valor de armazenamento (*C1* à *C3*). Denominado supercapacitores ou capacitores de dupla camada, estes apresentam uma densidade de potência (W/kg) maior quando comparados com baterias recarregáveis, mas a densidade de energia (Wh/kg) pode ser de uma a duas ordens menor. Ainda comparado com baterias convencionais, estes capacitores apresentam uma resistência interna (ESR) baixa e constante com a carga armazenada, não alterando o comportamento com o tempo. O valor do ESR impacta diretamente nas perdas no sistema, logo, selecionando um componente com baixo ESR auxilia no funcionamento. O valor total é de 12 F limitado em 5,1 V, assim a energia total possível para armazenamento é de 156 J. Para proteção do armazenamento um diodo Zener de 5,1 V (*DZ1*) conectado inversamente polarizado. Este componente mantém a característica de circuito aberto enquanto a tensão em seus terminais varia de zero até o limite de 5,1 V. Após alcançar este nível, o componente drena a tensão excedente, limitando a máxima carga dos capacitores (que tem limite em 5,5 V). O circuito de armazenamento com a proteção inserida pode ser visto na figura 44.

Figura 44 - Esquemático instalado para armazenamento e proteção



O acionamento da sinalização horizontal é feito utilizando a energia armazenada nos capacitores. A sinalização horizontal é composta por vinte tachinhas distribuídas em dez pares para acionamento individual. Cada par de tachinha contém 6 diodos emissores de luz (LED) e são alimentados pela energia armazenada nos capacitores. A figura 45 apresenta o esquema para acionamento dos LEDs. Para limitar a corrente e ajustar o brilho de cada par um resistor *R1* deve ser inserido. Cada circuito de acionamento é composto por um sinal externo proveniente de um micro controlador. O ciclo de acionamento dura 2 s, neste tempo cada par de tachinha se mantém acesa por 100 ms. A sequência de acionamento é realizada do par mais afastado para o par mais próximo, gerando um efeito de guia nos automóveis para a pista. O elemento operando como chave é um MOSFET modelo IFR530 em conjunto com um par de resistores necessária para seu funcionamento. Por apresentar alta impedância na porta de disparo, o circuito de acionamento não troca energia com o circuito de geração e com as tachinhas.

Figura 45 - Esquemático acionamento das tachinhas

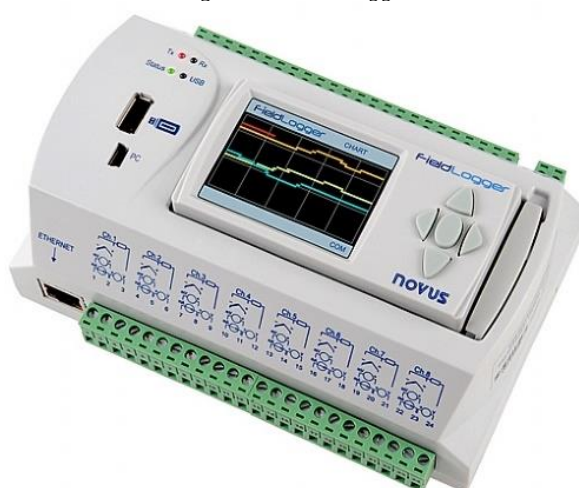


Para monitoramento e aquisição dos sinais gerados e armazenados no capacitor um equipamento para aquisição e registro é utilizado. O componente escolhido foi o *FieldLogger* do fabricante Novus, mostrado na figura 46. O módulo de aquisição e registro de dados possui oito canais de entrada analógica dos quais cinco são utilizados da seguinte forma:

- Canal 1 (AI1): Coleta da tensão gerada na Caixa 1, configurada para leitura de tensão de 0 à 10 V;
- Canal 2 (AI2): Coleta da tensão gerada na Caixa 2, configurada para leitura de tensão de 0 à 10 V;
- Canal 3 (AI3): Coleta da tensão gerada na Caixa 3, configurada para leitura de tensão de 0 à 10 V;
- Canal 4 (AI4): Coleta da tensão gerada na Caixa 4, configurada para leitura de tensão de 0 à 10 V;
- Canal 5 (AI5): Coleta da tensão armazenada nos Capacitores, configurada para leitura de tensão de 0 à 10 V.

O equipamento tem uma taxa de aquisição de 200 Hz e resolução do conversor analógico digital de 24 bits quando configurado com cinco entradas habilitadas. Com esta taxa de aquisição são gerados mais de 86 milhões de dados diários para posterior análise. Estes dados são armazenados em um cartão SD de 8 Gb de armazenamento e pós processados para avaliação.

Figura 46 – FieldLogger

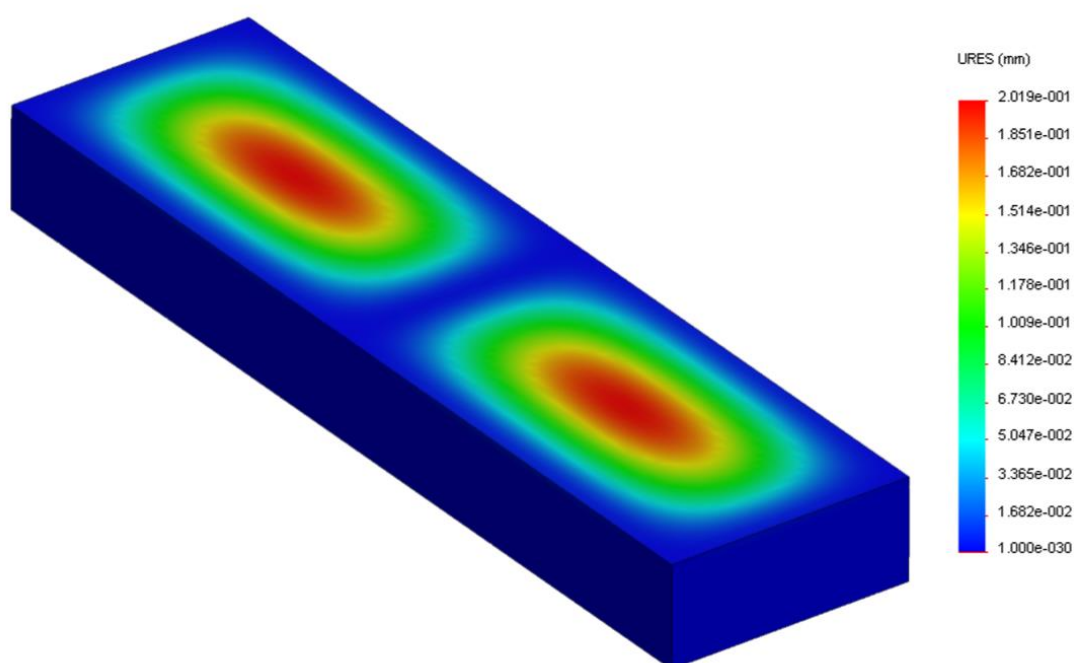


3.4.2 Concepção do protótipo

A implantação dos sensores piezoelétricos na pista deve ser realizada de forma que os sensores escolhidos possam vibrar livremente, além de fornecer proteção mecânica aos componentes e evitar acúmulos de sujeira e água. Caixas metálicas foram projetados para suprir essa necessidade.

As caixas metálicas foram projetadas utilizando programas de análises computacionais, para avaliar a deformação ocorridas na pista e a vibração transmitida, conforme figura 47. As caixas foram preparadas para resistirem tensões de aproximadamente 700 kPa.

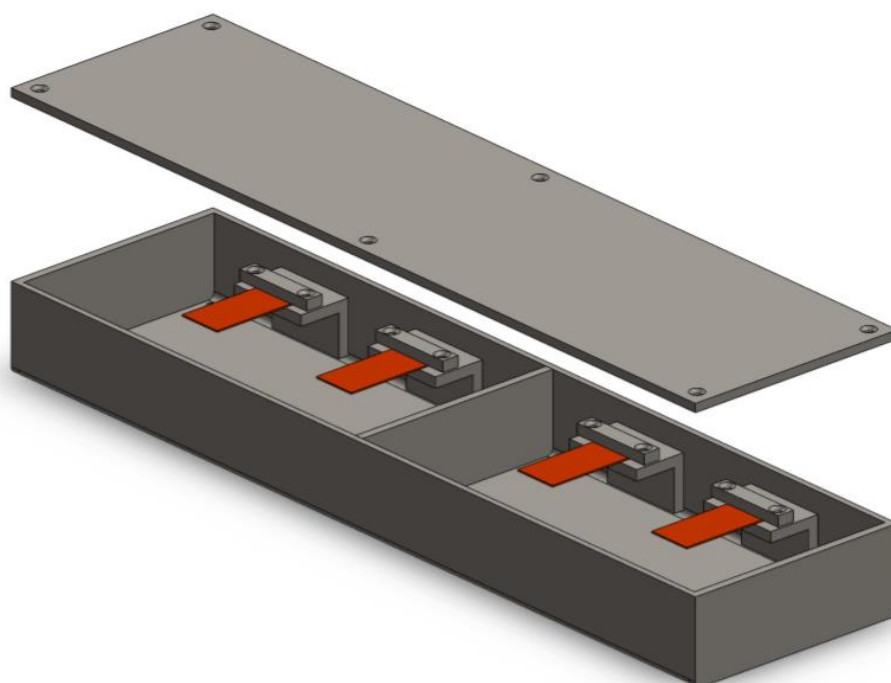
Figura 47 – Avaliação computacional da deformação no conjunto



A partir das avaliações realizadas, o protótipo foi projetado utilizando perfil de aço estrutural ASTM A36 U 4", com chapas metálicas usinadas nas laterais. A parte superior do corpo metálico projetado não foi usinada, utilizando-se uma tampa móvel que permitisse acesso aos componentes após a instalação.

Foram construídas 4 caixas, utilizando-se 4 sensores piezoelétricos em cada uma delas. No interior do perfil, foram usinadas peças metálicas para a fixação dos perfis em apenas uma das extremidades, de modo que as mesmas vibrassem livremente quanto o conjunto fosse solicitado. O comprimento de cada um dos perfis para a colocação dos componentes foi de 40 cm de comprimento, com 10 cm de largura e 5 cm de altura. Uma chapa metálica foi usinada no centro para fornecer melhor fixação para a tampa e aumentar a resistência, conforme demonstrado na figura 48.

Figura 48 – Representação gráfica da caixa com os transdutores piezoelétricos posicionados e tampa aberta

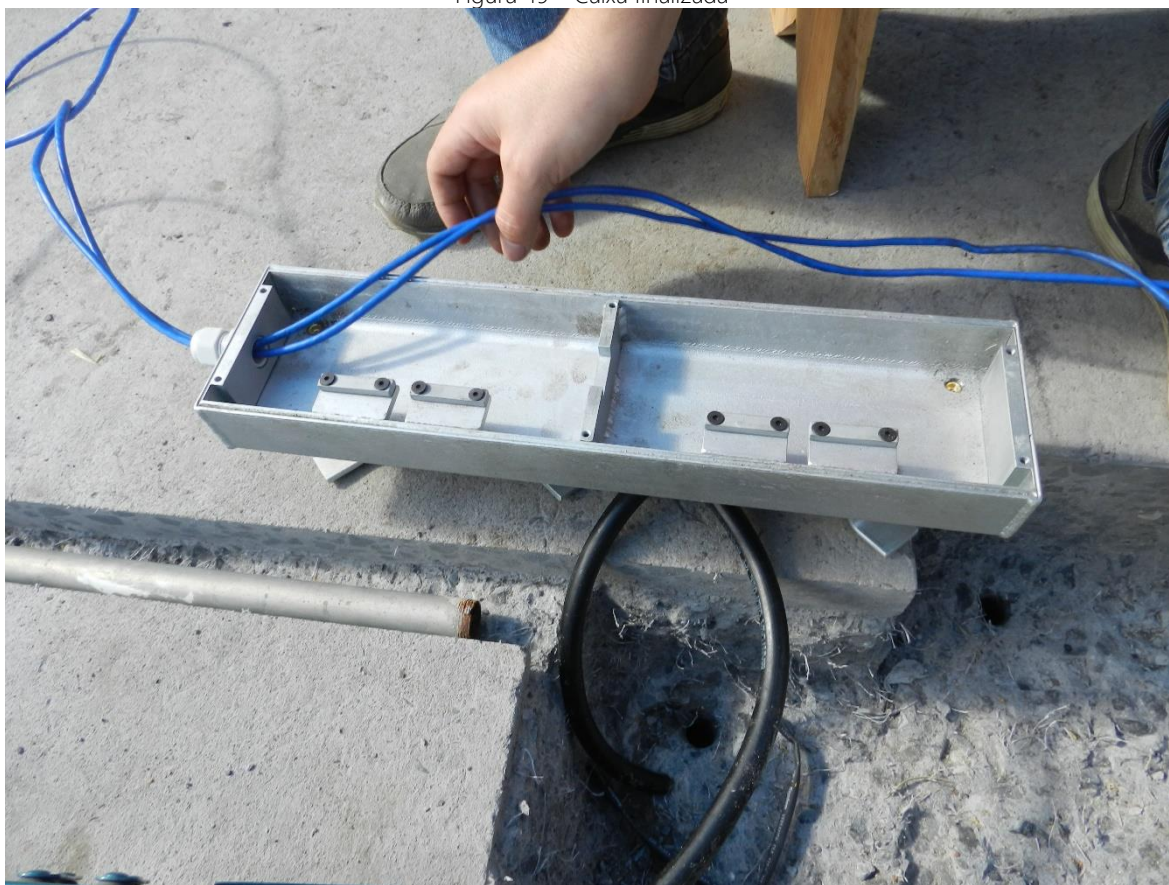


A tampa da caixa foi fixada com parafusos escareados e cola de junta de motor. Sulcos foram feitos nas bordas da caixa para criar uma camada maior de adesivo e evitar que o mesmo escoasse por completo ao fechar a caixa. A possibilidade de abertura da tampa reduziu a estanqueidade do conjunto, o que poderia acarretar em acúmulo de água no interior. Desse modo, drenos foram projetados para impedir acúmulos de água.

Um furo foi adicionado na lateral de cada uma das caixas para permitir a passagem dos fios conectados aos transdutores elétricos até o circuito projetado. Um prensa-cabos foi utilizado para evitar a entrada de água pelo orifício.

Uma ancoragem foi realizada na parte inferior de cada uma das caixas, com aproximadamente 5 cm de altura. O formato final dos perfis é demonstrado na figura 49.

Figura 49 – Caixa finalizada



3.4.3 Implantação do sistema de geração elétrica piezoelétrica na pista 1

A implantação do sistema foi realizada na Pista Sul da praça de pedágio de Gravataí na BR-290 na faixa de cobrança automática, com os trabalhos iniciando no dia 21/05/2018. As quatro caixas metálicas contendo os sensores piezoelétricos foram instalados no pavimento de concreto Portland próximo a cabine. O dreno previsto foi direcionado para baixo da placa, diminuindo a quantidade de cortes.

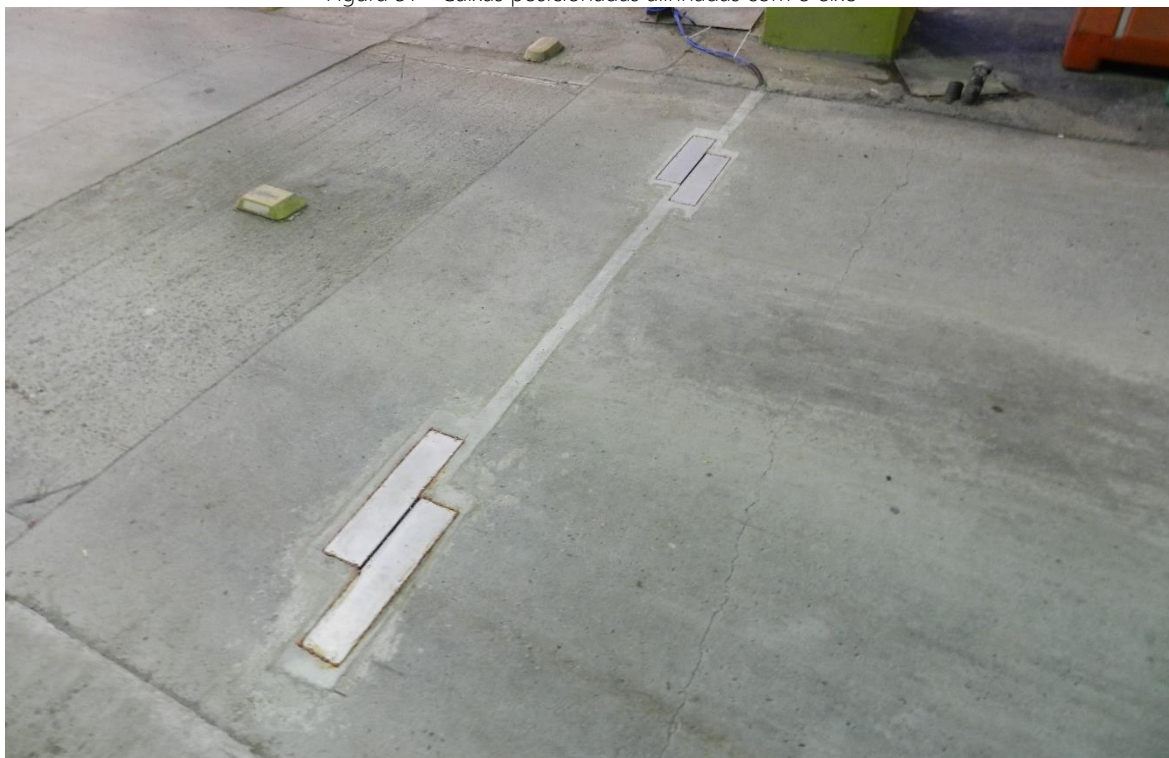
Os cortes para o posicionamento das caixas e colocação dos eletrodutos e tachas foram iniciados durante a noite do dia 21/05/2018, com o trabalho de instalação iniciando na manhã do dia 22/05. Após a colocação dos protótipos, os cortes na área de concreto foram preenchidos com graute, conforme a figura 50, fixando as peças no pavimento. Entre as peças o preenchimento foi realizado com sela de junta elastomérica.

Figura 50 – Preenchimento com graute ao redor dos perfis



O posicionamento dos perfis metálicos foi realizado de modo que os eixos dos veículos de cargas passantes atinxissem diretamente os perfis, maximizando a vibração dos transdutores internamente. As caixas foram divididas e posicionadas nos dois trilhos de roda. Adotou-se um afastamento de aproximadamente 80 cm a partir do centro da faixa, conforme a figura 51, baseado no afastamento médio dos eixos de veículos pesados. As caixas em cada um dos lados foram transpostas em 20 cm, permitindo uma maior área de contato entre os pneus e protótipo. A altura da caixa com a tampa foi nivelada com o nível do pavimento, facilitando o acesso aos transdutores quando necessário.

Figura 51 – Caixas posicionadas alinhadas com o eixo



O cabeamento utilizado no interior das caixas até os circuitos foram cabos de rede cat5e, permitindo a conexão dos quatro sensores piezoelétricos do interior da caixa, através dos 8 fios internos presentes nesse tipo de cabo. No interior do pavimento foram utilizados eletrodutos metálicos de $\frac{3}{4}$ " para proteger o cabeamento das caixas até os circuitos e o *datalogger* para registro de informações, mostrado na figura 52.

Figura 52 – Eletrodutos no interior do pavimento



O circuito foi posicionado em uma caixa de apoio localizada ao lado da pista. A partir dessa caixa, um eletroduto de 1 $\frac{1}{2}$ " foi utilizado para levar os fios elétricos de 0,5 mm² até as tachas com LEDs posicionadas nos dois lados da facha, através de um corte no pavimento asfáltico que iniciou na grelha da praça de pedágio estendendo-se aproximadamente 150 metros. O corte no pavimento foi ramificado com aproximadamente 100 metros, ilustrado na figura 53, para atingir o outro lado da faixa, abastecendo as demais tachas com uma menor quantidade de cortes transversais.

Figura 53 – Ramificação do corte no pavimento asfáltico.



As tachas LEDs foram posicionadas no mesmo intervalo que as existentes na pista, totalizando 20 tachas, 10 em cada lado da faixa. Um fio comum de energia e um para controle de ativação para cada par de tacha foram utilizados, conforme a figura 54, totalizando 11 fios, também ramificados no mesmo ponto que o corte. O corte no pavimento foi fechado com microrevestimento asfáltico após a realização das conexões.

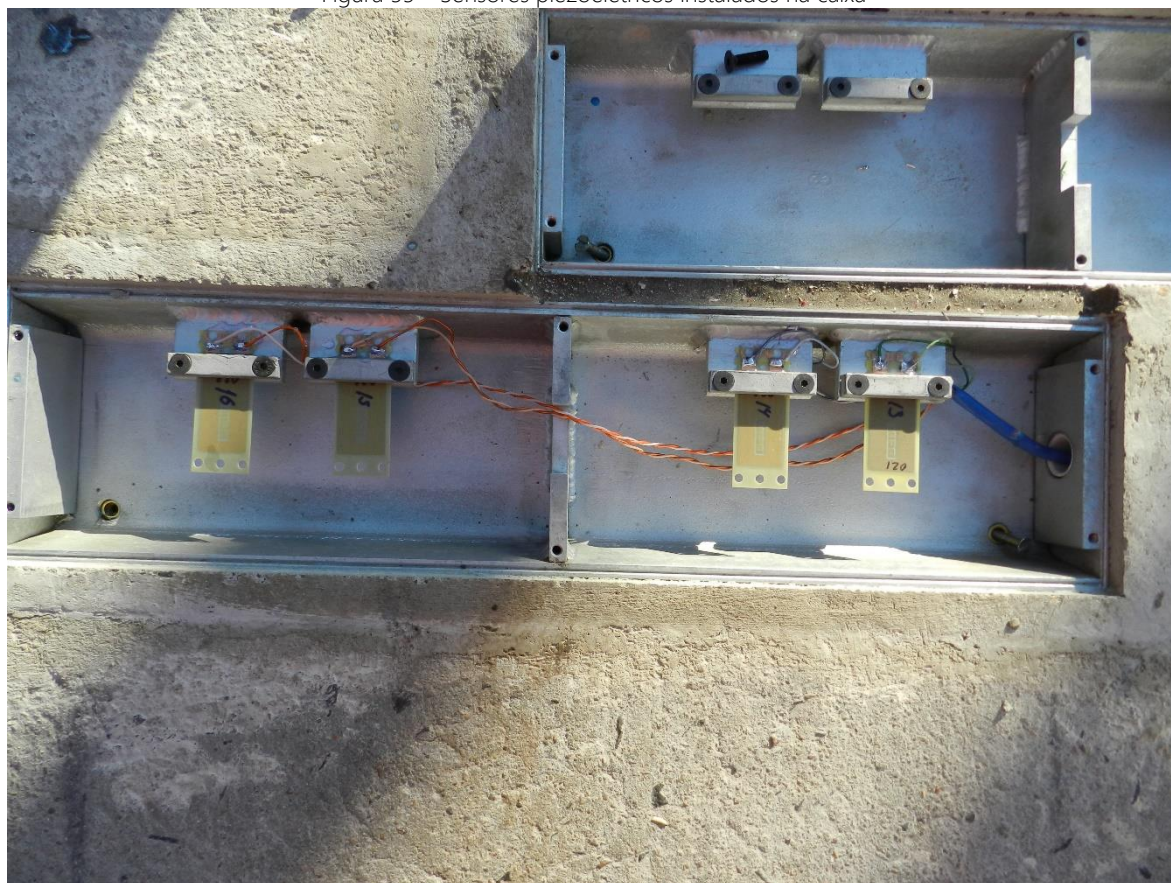
Figura 54 – Fios elétricos ligando a tacha, sendo o branco de energia comum e vermelho específico de comando



O acionamento dos LEDs foi feito com intervalos de tempo fixados, acendendo no sentido do tráfego, formando um efeito estroboscópico, com uma cadência de 100 ms entre cada tacha e um intervalo de 1 segundo para reinício. O sistema foi sincronizado com o sinal de abertura da faixa, permitindo o direcionamento dos veículos apenas enquanto a mesma permanecer aberta.

Após a finalização da implantação do sistema, os sensores piezoelétricos foram colocados no interior dos perfis, demonstrado na figura 55, conectados ao *datalogger* e as tampas foram fixadas. Finalizado o sistema, a coleta de dados pode ter início.

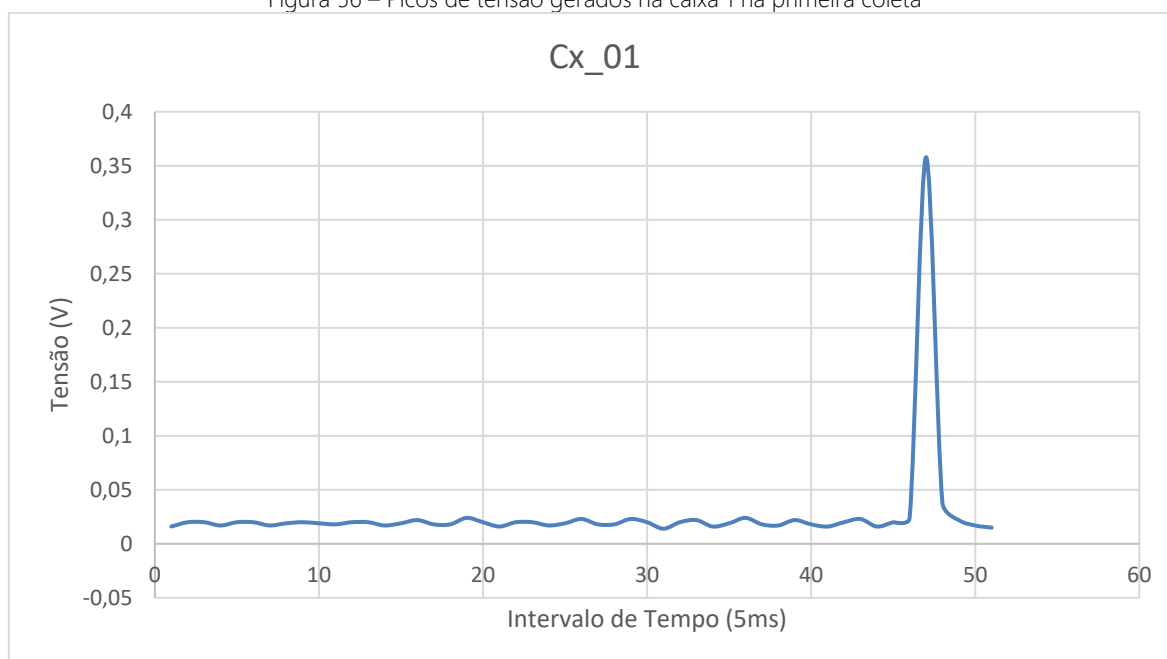
Figura 55 – Sensores piezoelétricos instalados na caixa



3.4.4 Coleta de dados da geração e modificações do sistema

Os dados gerados com a passagem de veículos sobre os protótipos foram registrados com o *datalogger* e coletados através da substituição do cartão de memória do aparelho. A fim de gerar um controle, as caixas foram nomeadas de 1 a 4, partindo do lado esquerdo para o direito da pista no sentido do tráfego. Os primeiros dados de geração dos transdutores foram pequenos, com poucos picos de tensão gerados, conforme demonstrado figura 56, com um pico máximo de 0,358 V.

Figura 56 – Picos de tensão gerados na caixa 1 na primeira coleta



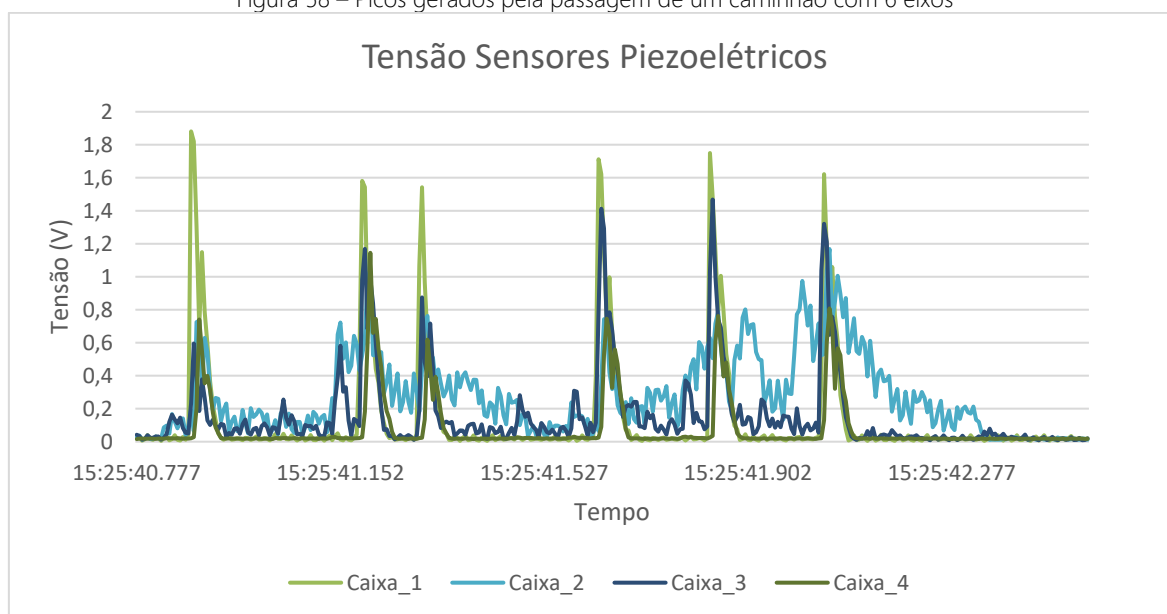
Em busca de uma melhora dos picos de tensões gerados pelo sistema, uma modificação no sistema foi realizada, com acréscimo de massas nas pontas dos sensores. As caixas foram abertas e em cada ponta dos sensores piezoelétricos foram adicionados 3 parafusos com 4 porcas, conforme figura 57, gerando uma adição de aproximadamente 7 gramas em cada um dos sensores. Além dessa modificação, foi realizado um levantamento de veículos para comparação entre os picos gerados pela passagem de veículos com o tipo de veículo que passou.

Figura 57 – Parafusos adicionados como massa na ponta dos sensores



Os dados foram coletados e analisados. A presença de pesos aumentou significativamente os dados, com um grande aumento dos picos de tensão, atingindo picos próximos a 2 V. Além disso, os picos coincidiram com os veículos passantes, como demonstra a figura 58, ilustrando o momento de passagem de um caminhão de 6 eixos, gerando 6 picos de tensão durante esse tempo.

Figura 58 – Picos gerados pela passagem de um caminhão com 6 eixos



Nota-se uma diferença de geração das caixas nessa última figura, mantendo-se em outros picos, conforme figura 59, porém sem apresentar um padrão claro. Essas variações de picos podem ser originadas do adesivo de juntas elastomérico em contato com a parede do protótipo em que os sensores se encontram na caixa 2 e 4, pelas diferenças de pressão no fechamento dos parafusos segurando os sensores ou na variação da passagem dos veículos, atingindo uma caixa de modo diferente das outras, conforme figura 60.

Figura 59 – Picos demonstrando comportamentos diferentes nas caixas.

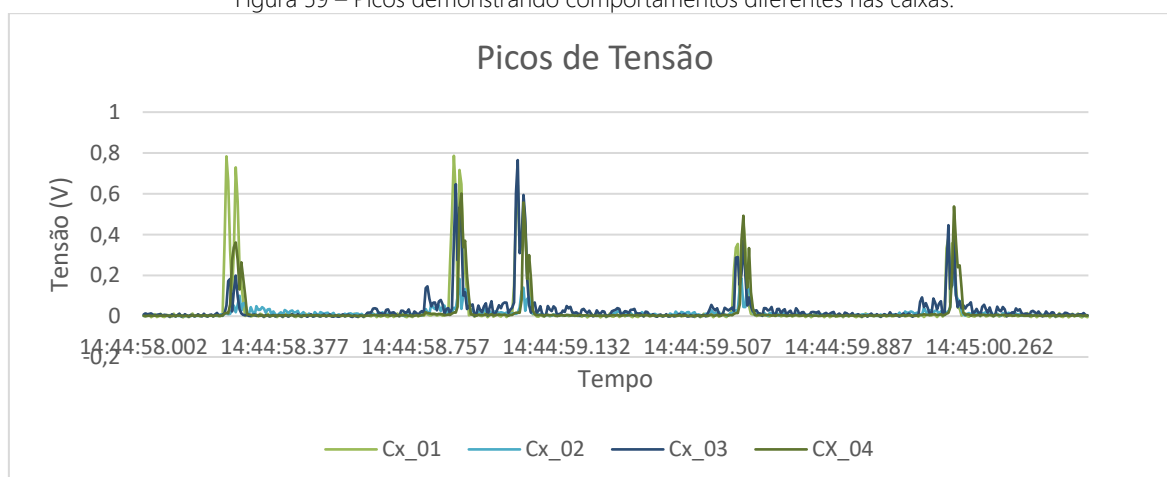
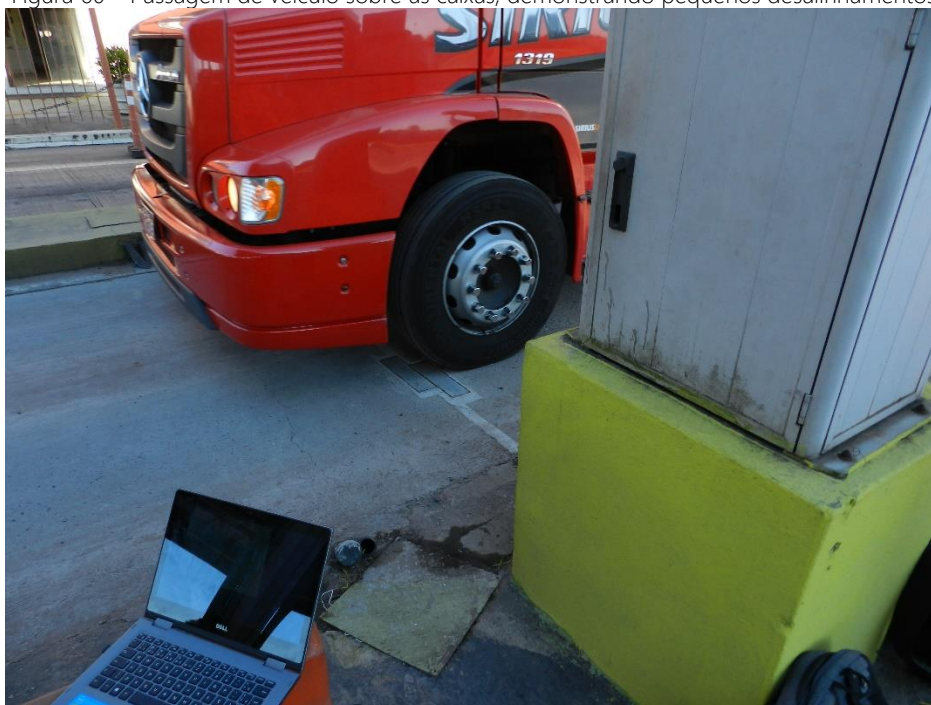


Figura 60 – Passagem de veículo sobre as caixas, demonstrando pequenos desalinhamentos



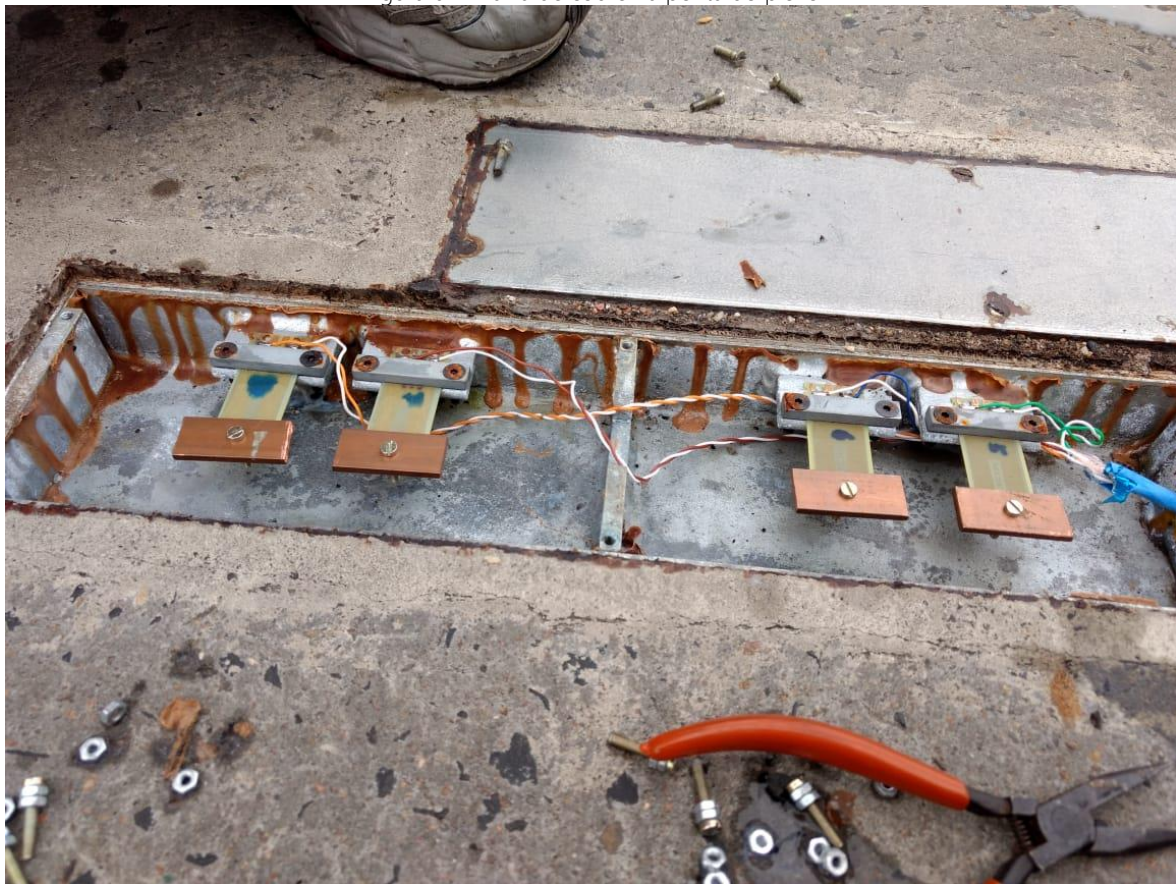
A passagem registrada do veículo de 6 eixos permitiu um cálculo de potência, utilizando-se a lei de Ohm. Um cálculo entre os 3 segundos de duração da passagem do veículo e o fim da vibração dos sensores foi realizado, demonstrando os comportamentos diferenciados entre as caixas. Enquanto a caixa 1 possuiu maior pico e maior potência máxima e média, a caixa 2 foi a segunda com maior quantidade de potência média, mesmo com menor potência máxima, devido a vibração que se manteve após a passagem dos eixos, mantendo a geração. Esses dados calculados são demonstrados na tabela 12.

Tabela 12 – Potência calculada para as diferentes caixas durante passagem de veículo

Caixa	Potência Média (μW)	Potência Máxima (μW)
1	0.981	36.1
2	0.926	14.4
3	0.598	22.5
4	0.237	12.1

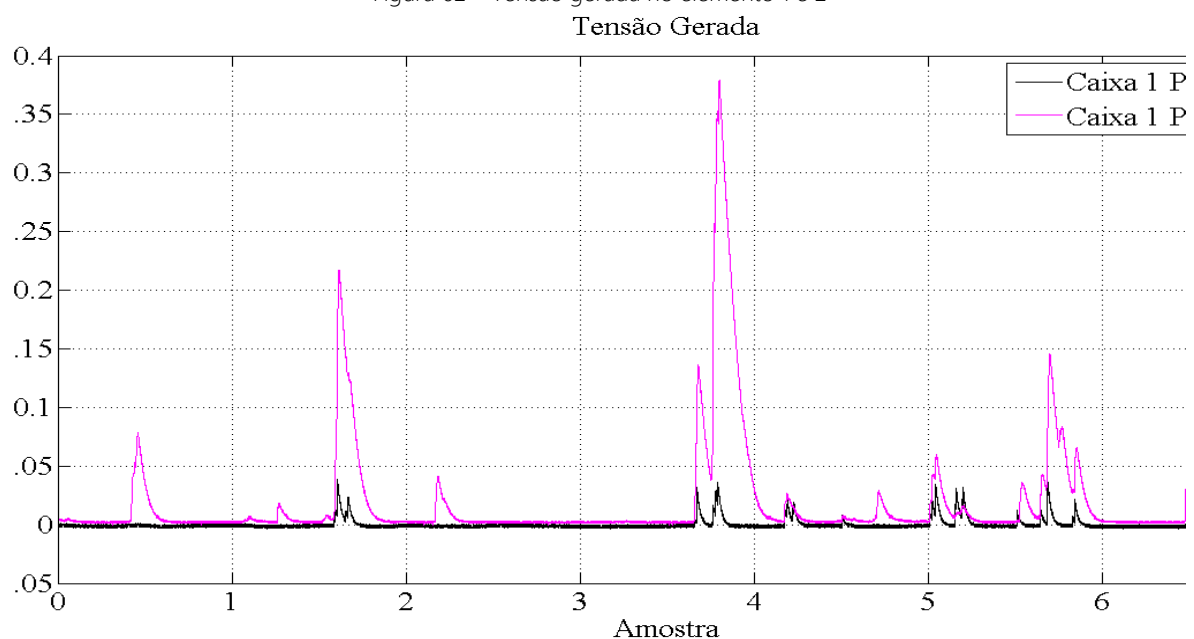
A última modificação no sistema foi a substituição dos parafusos, por uma barra de cobre fixada as pontas dos sensores de uma caixa. A caixa 1 foi isolada do sistema para aferição dos sinais gerados por cada elemento piezoelétrico em diferentes condições. No elemento 1 foi inserido uma massa de 6,75 g e conectado a ponte de diodos com um capacitor de 22 μF e medido na entrada 5 do *datalogger*. No elemento 2 a massa foi alterada para 16 g, mostrado na Figura 61, mantendo o circuito eletrônico, a medida de tensão gerada foi realizada na entrada 6 do *datalogger*. No elemento 3 foi inserida a massa de 16 g e conectada a uma ponte de diodos com uma resistência de 120 $\text{k}\Omega$, a medida realizada na entrada 7 do *datalogger*. No elemento 4 utilizou-se as mesmas características do elemento 3 sem o resistor de carga, a medida de tensão na entrada 8 do *datalogger*.

Figura 61 – Barra de cobre na ponta do piezo



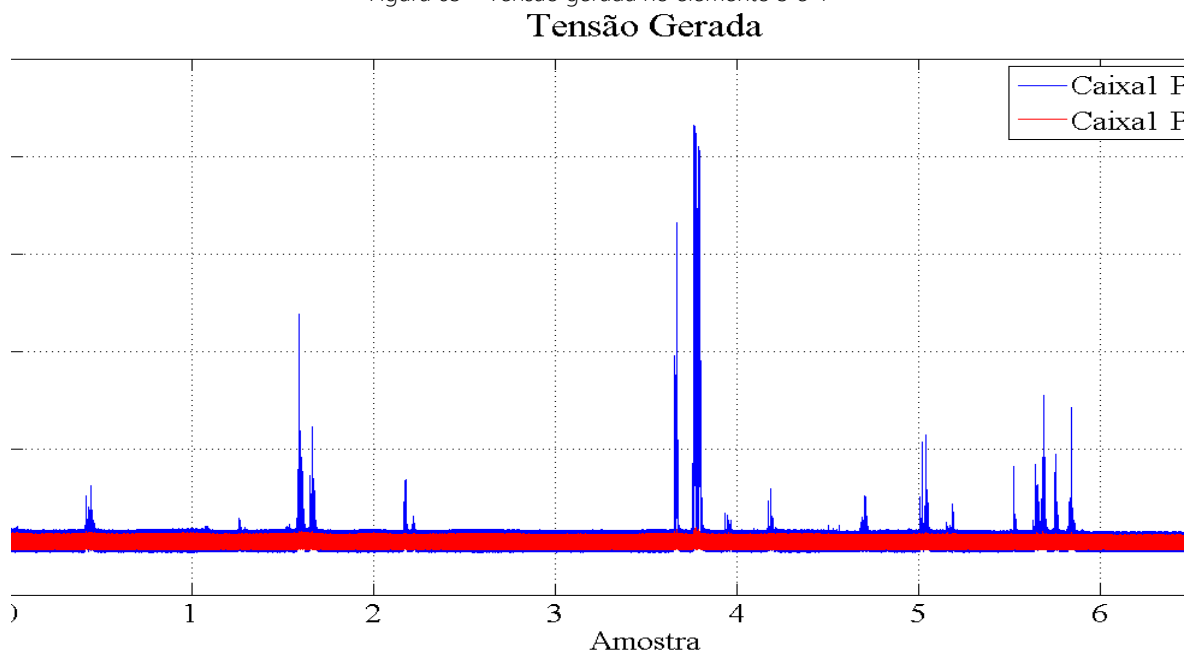
Por serem conectados no mesmo circuito eletrônico, a medida de geração dos elementos 1 e 2 são comparadas com a alteração do fator massa inserida na ponta do elemento. A figura 62 mostra o incremento de 3 a 10 vezes na geração no elemento 2, que tem a maior massa na ponta. A inserção de uma massa maior reduz a frequência natural de vibração e eleva o deslocamento na ponta livre do elemento quando este é excitado elevando a tensão gerada.

Figura 62 – Tensão gerada no elemento 1 e 2



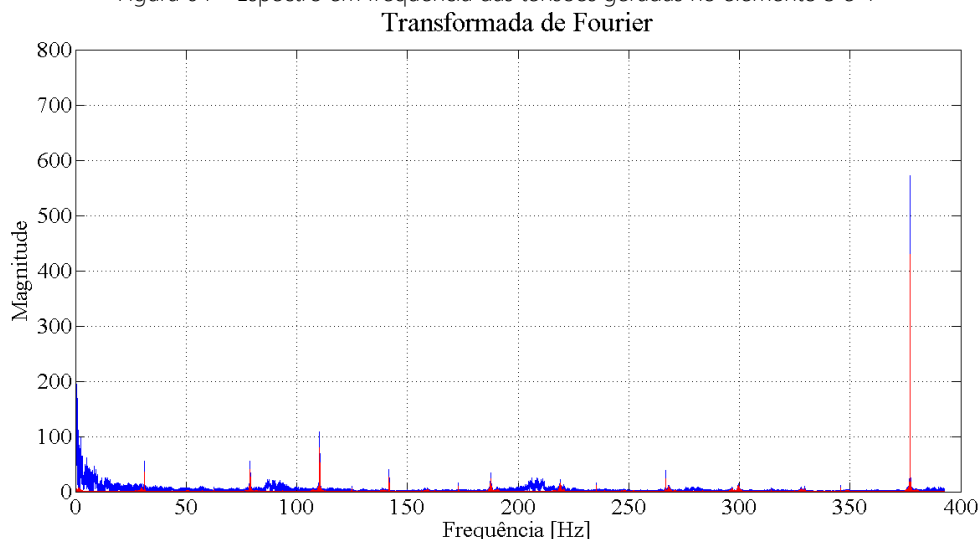
Nos elementos 3 e 4 não ocorre nenhum tipo de armazenamento de energia em elementos capacitivos. A figura 63 apresenta a tensão gerada nestes dois elementos. Nota-se que a tensão no elemento 3 apresenta pico maiores quando comparados ao elemento 4. Em comparação, o pico de potência gerada no elemento 3 obteve-se 6,2208 μW para uma resistência de 120 k Ω . No elemento 4 obteve-se 1,3127 nW para uma resistência de 1,1 M Ω , impedância da entrada do *datalogger*.

Figura 63 – Tensão gerada no elemento 3 e 4



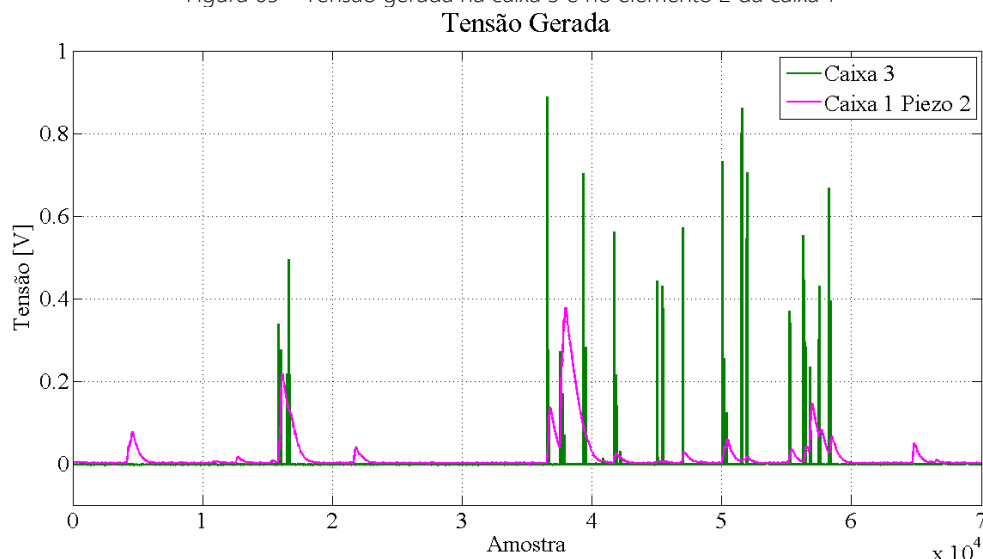
Mesmo apresentando amplitudes diferentes de geração a característica em frequência é mantida. figura 64 mostra a transformada de Fourier dos sinais de tensão obtidos nos elementos 3 (Azul) e 4 (Vermelho). Desconsiderando o pico em 377 Hz que corresponde ao ruído de quantização do conversor analógico digital intrínseco do *datalogger*, os picos em frequência apresentam características idênticas, variando em amplitude somente. Os picos em frequência representam as frequências naturais de vibração dos elementos, tendo em vista que ambos possuem a mesma massa acoplada, é esperada a mesma característica em frequência.

Figura 64 – Espectro em frequência das tensões geradas no elemento 3 e 4



Quando comparada com a caixa 3, o elemento 2 da caixa 1 tem os picos de carregamento de tensão coincidentes com os picos de geração da caixa 3 (figura 65), tendo em vista que as mesmas são excitadas no mesmo instante por estarem alinhadas na pista de rolagem.

Figura 65 – Tensão gerada na caixa 3 e no elemento 2 da caixa 1



3.5 CONSIDERAÇÕES DO SISTEMA INSTALADO E PROPOSTA PARA USO EM PRAÇAS DE PEDÁGIO RODOVIÁRIAS

O sistema aplicado foi de pequena escala, utilizando apenas 16 transdutores no total. Um aumento desses sensores permitiria um aumento da energia gerada. A energia gerada pelo sistema ainda esbarra no preço do material, não sendo uma alternativa economicamente viável em um primeiro momento, porém os avanços da tecnologia podem melhorar seu custo-benefício, a exemplo de outras tecnologias renováveis. Os transdutores piezoelétricos se tornam uma opção para o abastecimento de sistemas de coletas remotas na rodovia, diminuindo a quantidade de cabos, que podem ser quebrados ou furtados, impedindo uma coleta.

Outra utilização do sistema instalado que foi identificado durante o desenvolvimento da pesquisa refere-se ao potencial deste ser destinado especificamente como sensores para coleta. Os picos coincidem com as passagens dos eixos de veículos de carga. Estudos aprofundados entre a relação da carga e velocidade com os picos de tensão poderão permitir a utilização desses sensores na coleta de informações, indicando a quantidade de veículos passantes na rodovia, quantidade de eixos, velocidade e carga. Ainda, o sistema poderia ser utilizado para a pesagem de veículos em movimento.

4 RECOMENDAÇÕES PARA MELHORIAS DE EFICIÊNCIA NAS PRAÇAS DE PEDÁGIO

Com base nos aspectos abordados nos capítulos 2 e 3, são apresentados aqui recomendações pertinentes para a melhoria da eficiência energética de praças de pedágio, tendo como base as três praças de pedágio da Concepa que foram estudadas. Eventualmente, os resultados obtidos nesse estudo podem ser extrapolados para outras praças de pedágio rodoviário no Brasil e no mundo, desde que sejam reavaliadas as premissas aqui adotadas de acordo com o ambiente em que estejam incluídas.

4.1 DISCUSSÃO SOBRE O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA COM RECOMENDAÇÕES PARA OTIMIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA

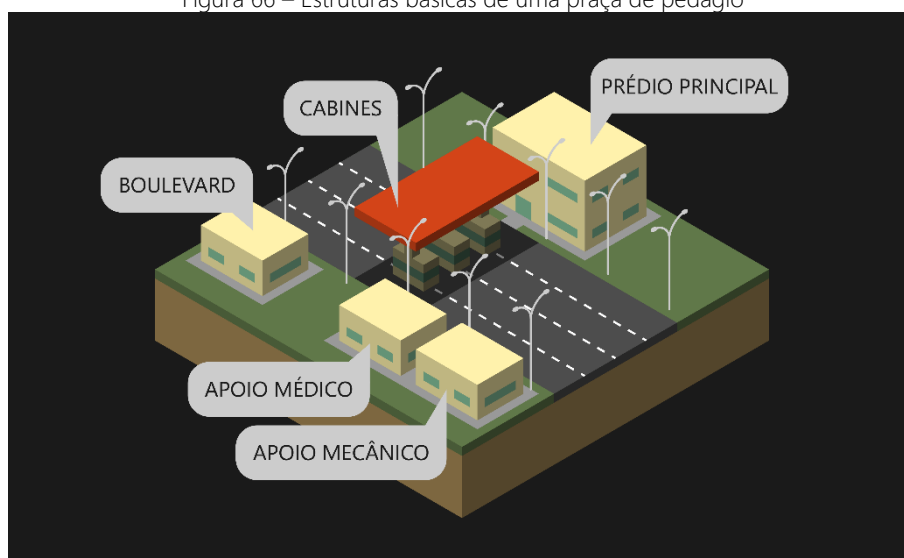
Atualmente, as praças de pedágio administradas pela Concepa têm como abastecimento principal a rede local, seja ela disponibilizada pela CEEE ou RGE (concessionárias de energia que atuam nas regiões das praças). Alternativamente, todas as praças contam com um gerador próprio, movido a diesel, e um banco de baterias para *backup*. Os geradores eram usados, historicamente, em períodos do dia em que o valor do kWh fornecido pelas concessionárias era mais caro, com o intuito de diminuir o consumo da rede e conseqüentemente economizar. Entretanto, hoje em dia os geradores são acionados apenas em casos de queda no fornecimento de energia da concessionária, de modo a não afetar as operações de suas praças. Além disso, os geradores costumam ser ligados periodicamente para testes, evitando assim, problemas de funcionamento em ocasiões que eles sejam realmente necessários.

De maneira geral, todas as praças da Concepa contam com as seguintes estruturas: cabines de cobrança, prédio principal, apoio médico, apoio mecânico e *boulevard*, como pode ser observado na figura 66 a seguir. Um mapeamento detalhado das praças de pedágio da Concepa foi apresentado no item 2.3, cujo resumo é apresentado na tabela 13. Os consumos e custos anuais são referentes ao ano de 2017. Novamente, o termo “área fechada” foi utilizado para indicar as áreas fechadas atendidas com climatização e iluminação, excluindo áreas cobertas sem paredes, que foram consideradas apenas na área de cobertura. O consumo médio foi calculado com base na área fechada de cada praça.

Tabela 13 – Resumo do mapeamento das praças de pedágio

Praça	Consumo Anual (kWh)	Custo Anual	Custo Médio do kWh	Área Fechada (m ²)	Consumo Médio (kWh/m ²)
P1	281.537,00	R\$ 192.343,90	R\$ 0,68	1.498,00	187,94
P2	287.976,00	R\$ 193.607,29	R\$ 0,67	1.140,00	252,61
P3	253.738,00	R\$ 163.027,67	R\$ 0,64	937,00	270,80
Média	274.417,00	R\$ 182.992,95	R\$ 0,67	1.191,67	237,12

Figura 66 – Estruturas básicas de uma praça de pedágio



Baseado nos itens 2.1 e 2.2, onde apresentou-se um apanhado de diferentes formas de otimização e microgeração de energia, são propostas alternativas otimizadas do ponto de vista energético que sejam compatíveis com as praças de pedágio existentes da Concepa ou com eventuais praças que possam ser instaladas no futuro.

Das diferentes formas de eficiência energética apresentadas nos itens 2.1 e 2.2, nem todas são diretamente aplicáveis ao cenário de praças de pedágio brasileiras, seja por não estarem em um nível de maturidade suficientemente desenvolvido, como discutido no item 2.2.8, ou por não serem relevantes dentro do contexto geográfico, como as tecnologias para degelo do pavimento, por exemplo. Isso não significa, entretanto, que essas tecnologias devam ser desconsideradas. A energia fotovoltaica, por exemplo, era completamente inviável do ponto de vista financeiro há alguns anos atrás. Ainda assim, a pesquisa e o desenvolvimento dessa tecnologia ao longo dos últimos anos foram capazes de torná-la uma das fontes de energia mais econômicas atualmente, o que justifica o investimento em novas tecnologias de microgeração de energia. Porém, para as estimativas e comparações a seguir, selecionamos somente aquelas com maior potencial de serem financeiramente viáveis atualmente. Sendo assim, a figura 67 resume os pontos de intervenção estudados com o intuito de otimizar a eficiência energética em praças de pedágio no Brasil.

Do ponto de vista da otimização da eficiência energética, baseado no mapeamento das praças existentes, são indicadas as seguintes intervenções:

- a) climatização otimizada através de padronização definida conforme projeto específico arquitetônico;
- b) substituição da iluminação das praças de pedágio e áreas adjacentes por lâmpadas LED;
- c) tratamento de superfícies externas (telhados verdes, tintas refletivas);

Para a microgeração de energia elétrica foram estudadas as seguintes tecnologias, tendo em vista a aplicabilidade a praças de pedágio brasileiras:

- a) geradores a diesel e biodiesel;
- b) painéis solares fotovoltaicos;
- c) turbinas eólicas do tipo "árvore" (*Wind Tree*);
- d) geradores hidrocínéticos.

Figura 67 – Pontos de intervenção estudados para a otimização da eficiência energética



Nos itens a seguir, discutiremos essas intervenções individualmente, de modo a tentar estimar a viabilidade da implementação de cada uma delas.

4.1.1 Conforto térmico

O item conforto térmico inclui medidas que devem ser consideradas nos projetos de iluminação, climatização e tratamento de superfícies expostas ao aquecimento solar. Como foi apresentado para determinações destes itens é muito importante a avaliação do ambiente onde o empreendimento será instalado. Na parte de climatização e iluminação, deve-se partir de um projeto que permita a ventilação e iluminação natural. O projeto deve considerar a orientação solar, comportamento dos ventos e incidência de luminosidade natural.

4.1.1.1 Climatização

Como já foi citado, a utilização de climatização artificial é praticamente inevitável, principalmente para uma praça de pedágio que precisa operar 24 horas por dia, sete dias por semana. Desse modo, devem ser considerados a utilização de equipamentos para resfriar/aquecer os ambientes com alta eficiência energética. Mesmo que o mercado brasileiro ainda permita comercialização de equipamentos de menor eficiência, é importante buscar equipamentos mais eficientes.

Quanto ao tipo de climatização, no caso das cabines de pedágio é interessante que seja individual, visto a alternância de funcionamento destas. A renovação e qualidade do ar são itens importantes que devem ser avaliados, sendo que sistemas geotérmicos podem ser adotados para melhorar a qualidade do ar e diminuir gastos com ar condicionado. As praças de pedágio geralmente estão inseridas em locais isolados com pouca concentração de edificações, deste modo mesmo que haja poluição em decorrência dos veículos, é possível que o projeto considere a instalação de dutos de ventilação para renovação do ar através da circulação do ar da área do entrono, com tomada do ar longe da dispersão dos veículos. Além da troca de ar, essa ação promove a movimentação do ar que diminui a necessidade de temperaturas extremas na

utilização do ar condicionado, contribuindo para a economia de energia. As opções de refrigeração/aquecimento estão sempre evoluindo, de modo que atualmente a forma mais eficiente individual é representada por adoção do modelo Split *inverter*.

Outro fator importante é que o controle de temperatura das cabines seja padronizado e desejável que tenha automação. Não menos importante, o projeto arquitetônico das cabines deve permitir a comunicação com o usuário da via e ao mesmo tempo minimizar a troca de ar com o exterior nesse ponto. As trocas de ar são necessárias, mas devem ser minimizadas em caso de climatização por ar condicionado.

Na parte dos prédios administrativos, as opções de climatização também devem prever a possibilidade de ventilação natural (que pode ser suficiente em algumas épocas do ano), principalmente para áreas de vestiário, banheiros e áreas de alimentação e preparo. A escolha da melhor opção depende do tamanho do área e período de uso de todos ambientes. Áreas específicas que possuem tamanho menor e horário diferenciado podem ser atendidas por equipamentos do tipo Split individuais e áreas maiores com maior utilização podem ser atendidas pelo sistema VRF (Fluxo de Gás Refrigerante Variável).

4.1.1.2 Iluminação

Na questão de iluminação, é importante que o projeto da praça considere a luminosidade natural ao longo do ano e, caso seja alta, considere iluminação natural. Nesse caso, é importante que os ambientes sejam pensados de acordo com o uso e que as aberturas sejam projetadas de modo a permitir a entrada de iluminação necessária de acordo com as posições ocupadas. O dimensionamento exato dessas aberturas e a possibilidade de controle é importante para evitar entrada excessiva de iluminação (consequente aquecimento) em algumas épocas do ano.

Da mesma forma que a climatização, a iluminação artificial é necessária. Deste modo, atualmente pode-se citar a preferência, seja do ponto de vista econômico quanto ambiental, a adoção de lâmpadas do tipo LED. Além de terem duração maior, consomem menor energia e atendem às normas quanto a luminosidade necessária para desenvolvimento das atividades.

As cabines também podem considerar grande parte da iluminação de forma natural e instalação de lâmpadas de LED para iluminação artificial. Visto a grande exposição das cabines, permitir o controle da entrada de luz por parte do usuário é importante para o conforto térmico e visual.

4.1.1.3 Superfícies externas

Conforme dados apresentados, deve-se prever primeiramente a utilização de materiais de acordo com clima local. Considerando que geralmente os maiores desconfortos ocorrem em decorrência do calor indica-se um cuidado especial com a incidência de raios solares nas superfícies expostas.

Na questão dos telhados, primeiramente deve-se adotar materiais mais eficiente como telhas ao invés de telhados de fibrocimento. Elas ajudam em retardar o aquecimento provocado pelos raios solares. Telhados verdes são uma boa alternativa, pois ajudam no amortecimento da vazão dos telhados, isolamento térmico e são agradáveis do ponto de vista paisagístico. Quando

aplicados em terraços, provocam sensações térmicas muito mais agradáveis aos usuários da área. É importante salientar a necessidade de manutenção, dependendo do tipo de telhado (extensivo, semi-intensivo ou intensivo).

Uma alternativa interessante e de fácil aplicação são as tintas térmicas, que podem ser aplicadas em telhados e paredes externas. Seus índices de refletância são altos e permitem que as edificações não absorvam todo calor irradiando pelo sol, reduzindo de maneira efetiva a temperatura interna. A pintura interna com a utilização dessa tinta também pode ser uma alternativa, visto que estudos apontam que ela ajuda em manter a temperatura interna dos ambientes.

Essas alternativas impactam diretamente na temperatura interna da edificação, reduzindo a necessidade de utilização do ar condicionado em condições extremas. Dessa forma há aumento da eficiência energética e redução do consumo energético.

4.1.1.4 Considerações gerais

Estas medidas indicadas para aumentar o conforto térmico são medidas possíveis e que podem ser adotadas atualmente em projetos novos ou na revitalização de edificações existentes. Sabe-se que estas medidas acarretam certamente em reduções do consumo de energia elétrica, sendo que estudos otimistas indicam em reduções superiores a 50% no consumo. Entretanto, esta redução é bastante relativa e dependente do clima de cada região, mas certamente haverá reduções no consumo energético e na qualidade de vida das pessoas que trabalham no ambiente.

É importante salientar a importância da seriedade no desenvolvimento do projeto, de modo que a consideração dos itens para promover conforto térmico acarreta em soluções sustentáveis para o ambiente e para o empreendedor. Além do projeto, é de extrema importância o acompanhamento da obra e instalação dos equipamentos, bem como manutenção e fiscalização após a entrega da obra. Exemplo que estas medidas são rentáveis é a existência de profissionais qualificados que atuam em projetos comissionados com soluções de eficiência energética em diversos empreendimentos.

4.1.2 Geradores a diesel e biodiesel

Esse método de microgeração foi escolhido para um estudo mais detalhado por se tratar de uma das tecnologias de geração mais comuns em praças de pedágio, além de já estar presente em todas as 3 praças de pedágio administradas pela Concepa atualmente. Conforme já mencionado anteriormente, os geradores são utilizados normalmente como forma de *backup* em casos de falta de energia por parte das concessionárias elétricas. A tabela 14 apresenta o consumo de diesel nos geradores da empresa no ano de 2017.

Tabela 14 – Consumo de diesel nos geradores das praças P1, P2 e P3 e sede

Período	Litros
jan/17	272,70
fev/17	421,95

Período	Litros
mar/17	558,36
abr/17	226,51
mai/17	180,00
jun/17	130,00
jul/17	180,00
ago/17	441,00
set/17	240,02
out/17	444,26
nov/17	119,46
dez/17	275,10
Total litros	3.489,36
Total custo¹	R\$ 11.511,38

¹Considerando custo médio do ano de R\$ 3,299/L
(fonte: CONCEPA, 2018)

Adotando um fator de potência de 0,92, mínimo exigido por norma (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010), e um consumo médio de 0,25 L de diesel por kWh gerado (tabela 15), podemos estimar que a produção dos geradores das 3 praças de pedágio e da sede em 2017 foi de aproximadamente 14.170 kWh.

Tabela 15 – Consumo médio de geradores a diesel

Potência Nominal (kVA)	Potência (kW)	Consumo (L/h)	Consumo (L/kWh)
55,00	50,60	12,00	0,24
80,00	73,60	18,00	0,24
100,00	92,00	24,00	0,26
115,00	105,80	27,00	0,26
140,00	128,80	31,00	0,24
150,00	138,00	33,00	0,24
Média			0,25

(fonte: adaptado de A GERADORA, 2018)

Para termos uma noção da viabilidade financeira da microgeração de energia a partir do óleo diesel, utilizaremos a média do preço do combustível em maio de 2018 no estado do Rio Grande do Sul, cotado a R\$ 3,56/L segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2018a). Com isso, o preço do kWh produzido com geradores a diesel é de R\$ 0,88/kWh. Vale lembrar que não estão considerados nesse cálculo a aquisição, instalação e manutenção dos geradores, o que não é um fator determinante, uma vez que as praças de pedágio já contam com tais equipamentos instalados. Entretanto, esses custos devem, sem dúvida, ser considerados para uma comparação mais apurada dos custos de geração de energia, principalmente nos casos de novas praças que não contem com geradores instalados.

Outra possibilidade seria a de utilizar os mesmos gerador com o abastecimento de biodiesel. Estudos realizados em geradores de praças de pedágio do Rio Grande do Sul indicaram que o rendimento dos equipamentos quando alimentados por biodiesel puro (B100) é, em média, 7,4% inferior ao obtido com o diesel convencional (CASTELLANELLI et al., 2007). Por outro lado, o preço do biodiesel também é bastante inferior ao do óleo diesel. No caso da produção de biodiesel a partir de óleo de fritura usado o custo varia entre R\$ 1,86/L, caso o óleo seja recolhido gratuitamente de restaurantes, e R\$ 2,02/L, considerando que o óleo seja comprado (por até

R\$ 0,80/L) (CASTELLANELLI, 2015). No caso de aquisição do biodiesel, o preço do leilão de maio/2018 da ANP foi de R\$ 2,31/L na Região Sul do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2018b). Sendo assim, o preço para geração a partir do biodiesel fica em R\$ 0,49/kWh para a produção de biodiesel a partir de óleo de fritura doado, R\$ 0,53/kWh no caso de produzir o biodiesel pagando pela matéria prima e R\$ 0,61/kWh comprando o biodiesel pronto pelo preço de leilão da ANP. Nos três casos, o uso do biodiesel se mostra mais econômico do que o uso do óleo diesel convencional, além de ter um menor impacto ambiental, conforme discutido no item 2.2.1. Novamente, esses valores não incluem a aquisição, instalação e manutenção dos geradores, que devem ser apurados para uma avaliação mais detalhada.

4.1.3 Painéis solares fotovoltaicos

Conforme discutido anteriormente, temos um grande potencial de geração fotovoltaica no Brasil, graças a fatores climáticos e geográficos que proporcionam altas taxas de irradiação no país. Somado a isso, no que se refere a praças de pedágio temos a vantagem de ter grandes áreas disponíveis para a instalação de painéis fotovoltaicos, principalmente nas áreas de cobertura sobre as cabines de cobrança. Essa tecnologia vem sendo amplamente estudada e desenvolvida no mundo todo, de forma que os custos de implementação vêm reduzindo consideravelmente nos últimos anos. Infelizmente, a instalação desses painéis ainda exige um investimento inicial considerável, que só trará retorno financeiro entre 6 e 10 anos, em média (MACHADO; MIRANDA, 2015). Além disso, por maior que seja a incidência solar em determinada região, a eficiência na conversão da irradiação solar em eletricidade através de painéis fotovoltaicos é limitada, comumente variando entre 12% e 15% (MACHADO; MIRANDA, 2015).

Para uma análise do potencial de geração dos painéis fotovoltaicos, nos basearemos em uma eficiência de conversão de 12% e na irradiação no plano inclinado de 1.743 kWh/m²-ano, referente a média anual de irradiação solar na Região Sul do Brasil, conforme o Atlas Brasileiro de Energia Solar (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2017), resultando em uma geração estimada de 209,16 kWh/m²-ano. Com base nesses dados, e assumindo que as áreas de cobertura disponíveis fossem totalmente cobertas com painéis solares, podemos chegar nos potenciais de geração apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Potencial de geração fotovoltaica

Praça	Consumo Anual (kWh)	Área de Cobertura (m ²)	Potencial de Geração Fotovoltaica (kWh/ano)	Potencial / Consumo
P1	281.537,00	2.860,00	598.197,60	212%
P2	287.976,00	3.581,00	749.001,96	260%
P3	253.738,00	1.745,00	364.984,20	144%
Média	274.417,00	2.728,67	570.727,92	205%

Como podemos observar, a área disponível para a instalação de painéis fotovoltaicos nas praças de pedágio é suficiente para gerar, em média, mais do que o dobro da energia consumida anualmente por elas. Conforme discutido anteriormente, desde 2012 a ANEEL permite a microgeração de energia elétrica ligada à rede, concedendo créditos pelos kWh gerados pelas unidades consumidoras. Com isso, é possível zerar a conta de luz das praças de pedágio

utilizando apenas metade das áreas de coberturas disponíveis para a instalação de dispositivos fotovoltaicos.

A análise financeira foi feita com o auxílio de um simulador *online* disponibilizado pela empresa NeoSolar (2018). Adotando como local o município de Gravataí/RS, para uma instalação empresarial com conta elétrica mensal de R\$ 15.000,00 (R\$ 180.000,00/ano), o simulador indicou um investimento inicial entre R\$ 1.375.007,33 e R\$ 2.102.952,38 para uma produção estimada de 285.114 kWh/ano em uma área de 1.415,45 m². Ou seja, uma estimativa de 201,43 kWh/m²-ano, muito próxima àquela obtida acima, com base na eficiência e na irradiação média sobre a Região Sul. Como pode ser observado na figura 68, o prazo de retorno estimado pela empresa é de cerca de 7 anos, muito inferior a vida útil das placas fotovoltaicas, entre 25 e 40 anos (NEOSOLAR, 2018).

Figura 68 – Economia acumulada em 30 anos de energia fotovoltaica



(fonte: NEOSOLAR, 2018)

Para uma análise um pouco mais detalhada, adotamos como investimento inicial a média dos valores indicados pelo orçamento da empresa (R\$ 1.738.979,86), uma manutenção de R\$ 378,00 por ano, inflação de 8% ao ano (mesma utilizada pelo simulador) e uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) conservadora de 12% ao ano. Os valores anuais que, de outra forma, seriam pagos à concessionária de energia foram calculados com base na produção estimada dos painéis solares (285.114 kWh/ano) e no preço médio do kWh calculado na tabela 13 (R\$ 0,67/kWh), o que resultou em uma conta anual estimada de R\$ 189.885,90. Esses valores, acrescidos da inflação, foram então usados como entradas positivas no fluxo de caixa para o cálculo do prazo de retorno (*payback time*) do investimento em painéis solares. A tabela 17 resume os valores calculados ano a ano dentro da vida útil mínima dos painéis de 25 anos.

Tabela 17 – Fluxo de caixa comparativo entre energia fotovoltaica e convencional

Ano	Conta Anual	Manutenção	Fluxo de Caixa	Fluxo Caixa (VP)	Acumulado	Acumulado (VP)
0	-	-	-R\$ 1.738.979,86	-R\$ 1.738.979,86	-R\$ 1.738.979,86	-R\$ 1.738.979,86
1	R\$ 205.076,78	-R\$ 408,24	R\$ 204.668,54	R\$ 182.739,76	-R\$ 1.534.311,32	-R\$ 1.556.240,09
2	R\$ 221.482,92	-R\$ 440,90	R\$ 221.042,02	R\$ 176.213,34	-R\$ 1.313.269,30	-R\$ 1.380.026,75
3	R\$ 239.201,55	-R\$ 476,17	R\$ 238.725,38	R\$ 169.920,01	-R\$ 1.074.543,92	-R\$ 1.210.106,74
4	R\$ 258.337,68	-R\$ 514,26	R\$ 257.823,41	R\$ 163.851,44	-R\$ 816.720,51	-R\$ 1.046.255,30
5	R\$ 279.004,69	-R\$ 555,41	R\$ 278.449,28	R\$ 157.999,60	-R\$ 538.271,23	-R\$ 888.255,70

Ano	Conta Anual	Manutenção	Fluxo de Caixa	Fluxo Caixa (VP)	Acumulado	Acumulado (VP)
6	R\$ 301.325,06	-R\$ 599,84	R\$ 300.725,23	R\$ 152.356,76	-R\$ 237.546,00	-R\$ 735.898,94
7	R\$ 325.431,07	-R\$ 647,83	R\$ 324.783,24	R\$ 146.915,45	R\$ 87.237,24	-R\$ 588.983,49
8	R\$ 351.465,56	-R\$ 699,65	R\$ 350.765,90	R\$ 141.668,47	R\$ 438.003,15	-R\$ 447.315,03
9	R\$ 379.582,80	-R\$ 755,62	R\$ 378.827,18	R\$ 136.608,88	R\$ 816.830,32	-R\$ 310.706,15
10	R\$ 409.949,42	-R\$ 816,07	R\$ 409.133,35	R\$ 131.729,99	R\$ 1.225.963,67	-R\$ 178.976,16
11	R\$ 442.745,38	-R\$ 881,36	R\$ 441.864,02	R\$ 127.025,35	R\$ 1.667.827,69	-R\$ 51.950,82
12	R\$ 478.165,01	-R\$ 951,87	R\$ 477.213,14	R\$ 122.488,73	R\$ 2.145.040,83	R\$ 70.537,91
13	R\$ 516.418,21	-R\$ 1.028,02	R\$ 515.390,19	R\$ 118.114,13	R\$ 2.660.431,02	R\$ 188.652,04
14	R\$ 557.731,66	-R\$ 1.110,26	R\$ 556.621,41	R\$ 113.895,77	R\$ 3.217.052,42	R\$ 302.547,81
15	R\$ 602.350,20	-R\$ 1.199,08	R\$ 601.151,12	R\$ 109.828,06	R\$ 3.818.203,54	R\$ 412.375,87
16	R\$ 650.538,21	-R\$ 1.295,01	R\$ 649.243,21	R\$ 105.905,63	R\$ 4.467.446,75	R\$ 518.281,50
17	R\$ 702.581,27	-R\$ 1.398,61	R\$ 701.182,66	R\$ 102.123,29	R\$ 5.168.629,41	R\$ 620.404,79
18	R\$ 758.787,77	-R\$ 1.510,50	R\$ 757.277,28	R\$ 98.476,03	R\$ 5.925.906,69	R\$ 718.880,81
19	R\$ 819.490,79	-R\$ 1.631,34	R\$ 817.859,46	R\$ 94.959,03	R\$ 6.743.766,15	R\$ 813.839,84
20	R\$ 885.050,06	-R\$ 1.761,84	R\$ 883.288,22	R\$ 91.567,63	R\$ 7.627.054,37	R\$ 905.407,47
21	R\$ 955.854,06	-R\$ 1.902,79	R\$ 953.951,27	R\$ 88.297,36	R\$ 8.581.005,64	R\$ 993.704,83
22	R\$ 1.032.322,39	-R\$ 2.055,01	R\$ 1.030.267,38	R\$ 85.143,88	R\$ 9.611.273,02	R\$ 1.078.848,71
23	R\$ 1.114.908,18	-R\$ 2.219,41	R\$ 1.112.688,77	R\$ 82.103,03	R\$ 10.723.961,78	R\$ 1.160.951,74
24	R\$ 1.204.100,83	-R\$ 2.396,97	R\$ 1.201.703,87	R\$ 79.170,78	R\$ 11.925.665,65	R\$ 1.240.122,52
25	R\$ 1.300.428,90	-R\$ 2.588,72	R\$ 1.297.840,18	R\$ 76.343,25	R\$ 13.223.505,82	R\$ 1.316.465,77

O prazo de retorno do investimento pode ser calculado simplesmente dividindo-se o investimento inicial pela economia anual ("conta" - "manutenção" = R\$ 189.507,90/ano), resultando em um retorno dentro de 9,2 anos. Entretanto, esse valor não leva em conta a oscilação do valor do dinheiro ao longo do tempo. Caso consideremos a inflação nas contas esse tempo será menor, pois as economias comparadas a energia convencional aumentariam com o passar dos anos, resultando em um prazo de retorno de cerca de 7 anos (tabela 17) similar ao estimado pelo simulador. Embora esse tempo seja mais próximo do real, ele não contempla custos de oportunidade, riscos, etc. Para tal, podemos utilizar a TMA para converter os valores para valor presente (VP), resultando em um prazo de retorno descontado de 11,4 anos (tabela 17).

Outra abordagem possível para avaliarmos a viabilidade financeira seria uma comparação em termos do custo total e do custo do kWh para cada alternativa. O cálculo mais simples seria simplesmente somar os custos envolvidos para produção da mesma quantidade de energia durante os 25 anos de vida útil dos painéis fotovoltaicos, o que resultaria em um valor de R\$ 4.747.147,59 (R\$ 0,67/kWh) para a energia advinda da rede convencional e R\$ 1.748.429,86 (R\$ 0,25/kWh) para a alternativa fotovoltaica (incluindo manutenção). Mais uma vez, esse tipo de cálculo simplificado não considera o valor do dinheiro ao longo dos anos. Incluindo a inflação e trazendo todos os valores para valor presente, resultaríamos em R\$ 3.061.540,14 (R\$ 0,43/kWh) para a energia convencional e R\$ 1.745.074,37 (R\$ 0,24/kWh) para a fotovoltaica. A tabela 18 resume os custos estimados entre as duas alternativas energéticas.

Tabela 18 – Custos da energia convencional *versus* fotovoltaica

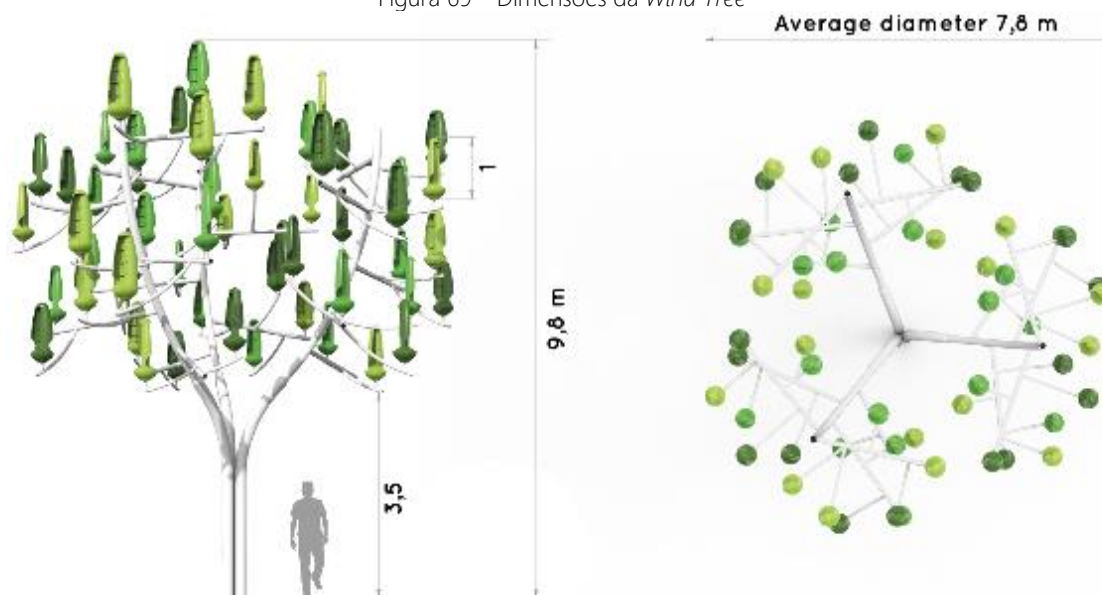
Alternativa	Custo Total	Custo Total (VP)	Custo do kWh	Custo do kWh (VP)
Concessionária	R\$ 4.747.147,59	R\$ 3.061.540,14	R\$ 0,67	R\$ 0,43
Fotovoltaica	R\$ 1.748.429,86	R\$ 1.745.074,37	R\$ 0,25	R\$ 0,24
Economia	63,17%	43,00%	63,17%	43,00%

4.1.4 Geradores eólicos do tipo Wind Tree

Assim como acontece com fontes fotovoltaicas, a energia gerada a partir dos ventos vem ganhando bastante espaço no mundo de hoje, principalmente pelo baixíssimo impacto sobre o meio ambiente. Infelizmente, grandes turbinas eólicas são tecnicamente inviáveis para a microgeração de energia, conforme proposto por esse estudo. Sendo assim, analisaremos a aplicação de um gerador eólico de menores proporções, mais aplicável para os entornos de praças de pedágio. O produto em questão será a *Wind Tree*, apresentada no item 2.2.4, da empresa francesa *New World Wind*.

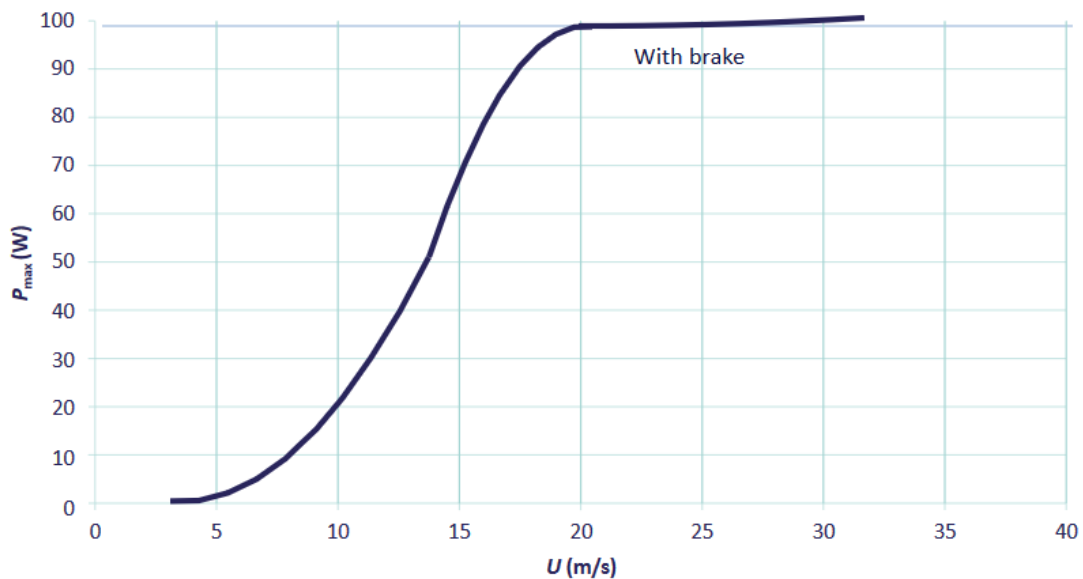
Segundo informações dos produtores, cada árvore tem 9,80 m de altura, um diâmetro de cerca de 7,80 m (figura 69) um peso total de 2,70 toneladas. A estrutura é composta por 54 geradores individuais (*Aeroleaves*), com capacidade de gerar até 100 W cada, totalizando uma potência máxima de 5.400 W.

Figura 69 – Dimensões da *Wind Tree*



(fonte: NEW WORLD WIND, 2018)

Análogo ao que acontece com a energia solar, o potencial de produção elétrica a partir desses geradores é altamente dependente da intensidade dos ventos incidentes na região onde o dispositivo for instalado. Cada uma das 54 turbinas começa a gerar energia com ventos próximos de 2,0 m/s, sendo que o máximo da geração de 100 W ocorre aos 20,0 m/s (figura 70). Portanto, para estimar o potencial de geração de uma *Wind Tree* precisamos analisar a natureza dos ventos na região de interesse.

Figura 70 – Curva de geração de uma *Aeroleaf*

(fonte: NEW WORLD WIND, 2018)

Assim como feito para a energia fotovoltaica, adotaremos como base de estudos o estado do Rio Grande do Sul. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), a velocidade média anual dos ventos no estado varia entre 5,0 m/s e 7,5 m/s, dependendo da região. Para os cálculos a seguir, adotamos o valor de 6,0 m/s como o mais representativo para as velocidades médias dos ventos no estado. Entretanto, como a produção de energia varia de forma não-linear com a velocidade dos ventos, é interessante levar em conta a distribuição estatística da frequência de ocorrência de cada uma das velocidades. Para isso, segundo Amarante et al. (2001), a distribuição estatística mais utilizada e a que melhor se adere aos regimes de vento é a distribuição de Weibull, dada por:

$$p(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k}$$

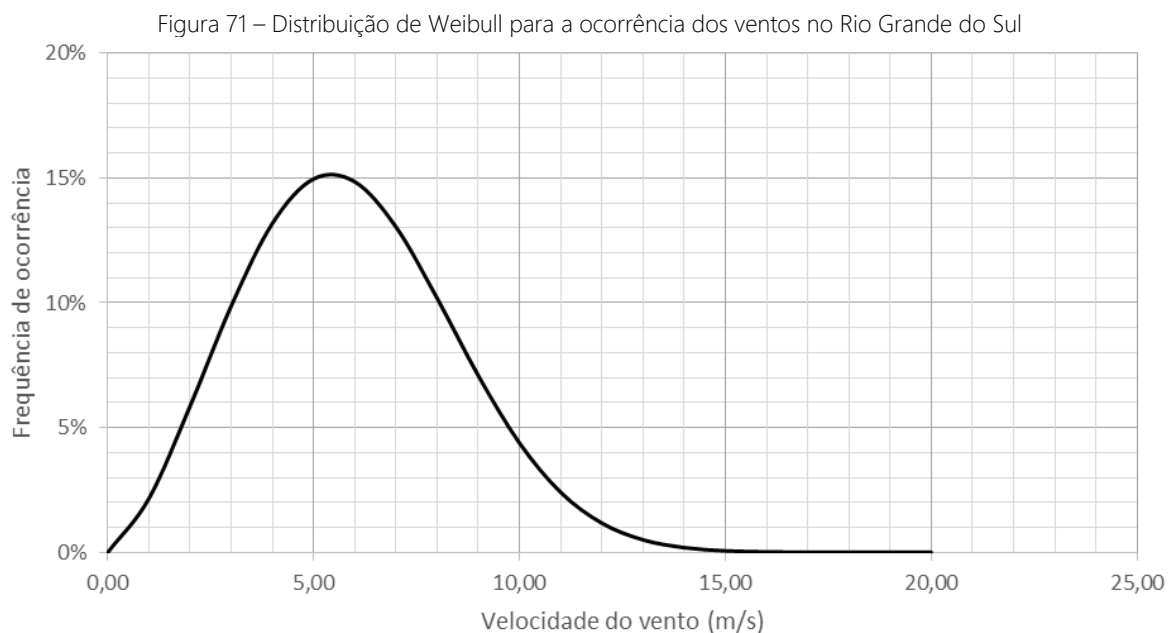
onde: $p(v)$ é a probabilidade de ocorrência de um vento v

v é a velocidade do vento

k é o fator de forma de Weibull

C é um fator de escala, aproximado por $\bar{v} \approx 0,9 \cdot C$

Para o estado do Rio Grande do Sul, o fator de forma de Weibull varia entre 2,0 e 2,5, sendo o último o mais representativo do estado e, portanto, o valor adotado para os cálculos. Com isso, para uma velocidade média de 6,0 m/s, obtemos uma distribuição semelhante à da figura 71.



Por fim, podemos estimar o potencial de geração anual das turbinas multiplicando a curva de geração (figura 70) pela ocorrência dos ventos (figura 71) e integrando a curva resultante entre 2,0 m/s e 20,0 m/s ao longo de um ano. O resultado é resumido na tabela 19. Com isso, uma *Wind Tree* com 54 geradores seria capaz de gerar um total de 3.194,46 kWh/ano.

Tabela 19 – Potencial de geração de um *Aeroleaf*

Velocidade (m/s)	Potência (W)	Ocorrência	Geração (Wh/ano)
0,00	0,00	0,00000%	0,00
1,00	0,00	2,15965%	0,00
2,00	0,86	5,86549%	442,00
3,00	1,30	9,88223%	1.125,68
4,00	1,96	13,18721%	2.265,94
5,00	2,95	14,96447%	3.866,56
6,00	4,41	14,84802%	5.742,03
7,00	6,56	13,03711%	7.493,97
8,00	9,66	10,17957%	8.610,65
9,00	14,01	7,07767%	8.684,97
10,00	19,92	4,37919%	7.643,00
11,00	27,60	2,40702%	5.820,31
12,00	37,00	1,17246%	3.800,13
13,00	47,70	0,50469%	2.108,66
14,00	58,92	0,19139%	987,78
15,00	69,72	0,06374%	389,29
16,00	79,31	0,01858%	129,06
17,00	87,21	0,00472%	36,08
18,00	93,33	0,00104%	8,54
19,00	97,85	0,00020%	1,71
20,00	100,00	0,00003%	0,29
Total			59.156,67

A partir daí, podemos iniciar o estudo da viabilidade financeira da utilização dessa tecnologia para a geração de energia. O produto é atualmente comercializado por € 49.500,00, mais € 9.500,00 para transporte e instalação, totalizando um investimento de € 59.000,00. Utilizando uma cotação de R\$ 4,25/€, o investimento no Brasil seria de R\$ 250.750,00. Também foi considerada uma manutenção anual mínima de R\$ 500,00. Adotando a mesma abordagem e as mesmas taxas utilizadas para os painéis solares (inflação de 8%a.a., TMA de 12%a.a., R\$ 0,67/kWh), a economia anual inicial estimada seria de R\$ 1.627,51. Dividindo o investimento inicial pela economia anual, podemos perceber que levariam mais de 150 anos para obter um retorno do investimento (sem contabilizar pelo efeito do tempo sobre o dinheiro), 10 vezes a vida útil anunciada pelo fabricante, de apenas 15 anos. Podemos, assim, perceber facilmente que essa tecnologia ainda não é financeiramente viável no Brasil para as características do vento estudadas. A tabela 20 compara os custos do kWh gerados pela *Wind Tree* com os pagos à concessionária de energia para a mesma quantidade de energia (3.194,46 kWh/ano) durante os 15 anos de vida útil do dispositivo.

Tabela 20 – Custos da energia convencional versus *Wind Tree*

Alternativa	Custo Total	Custo Total (VP)	Custo do kWh	Custo do kWh (VP)
Concessionária	R\$ 31.912,65	R\$ 24.152,19	R\$ 0,67	R\$ 0,50
Eólica (<i>Wind Tree</i>)	R\$ 258.250,00	R\$ 256.426,16	R\$ 5,39	R\$ 5,35

4.1.5 Geradores hidrocínéticos

A última alternativa de microgeração estudada será a de geradores hidrocínéticos, capazes de produzir eletricidade a partir do movimento natural das águas sem a necessidade da construção de barragens e obras afins. Ainda assim, esse não é aplicável em qualquer situação, pois necessita de um corpo hídrico próximo ao dispositivo que será alimentado pela energia produzida para ser viável. Serão analisados dois modelos de geradores, EVG-010H e EVG-025H, ambos da canadense *New Energy Corporation*, semelhantes ao apresentado no item 2.2.5.

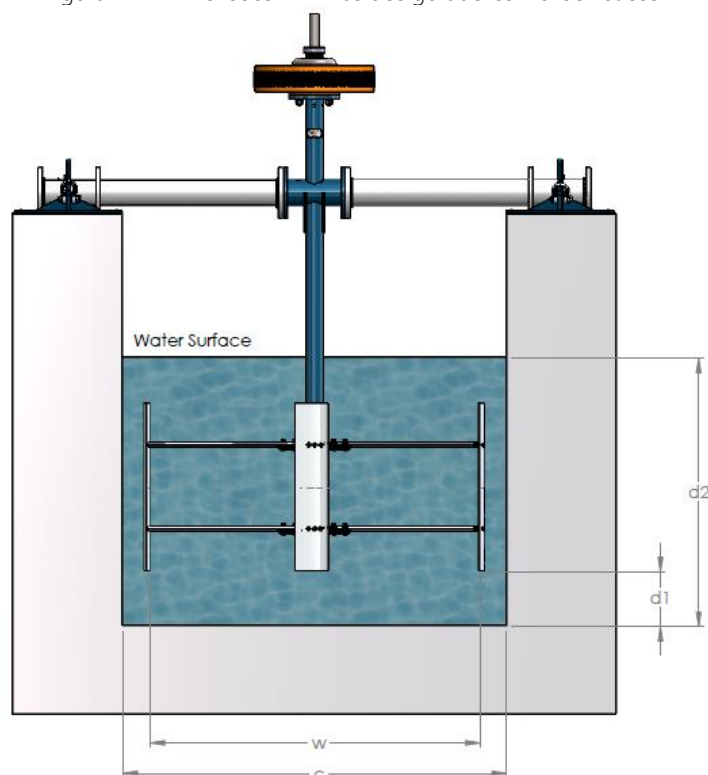
Uma seção transversal genérica é apresentada na figura 72, e as medidas dos dois modelos estão resumidas na tabela 21. A montagem pode ser feita com o auxílio de uma estrutura mais estreita que o canal natural, o que geraria um estrangulamento e a consequente elevação da velocidade e do nível d'água. Os produtores afirmam que os dispositivos EVG-010H e EVG-025H são capazes de gerar, respectivamente, até 10 kW e 25 kW de energia com uma velocidade da água de 3,0 m/s.

Tabela 21 – Dimensões mínimas dos geradores hidrocínéticos

Modelo	w (m)	c (m)	d1 (m)	d2 (m)
EVG-010H	1,50	1,73	0,25	1,97
EVG-025H	3,40	3,90	0,73	3,00

(fonte: adaptado de NEW ENERGY CORP., 2018)

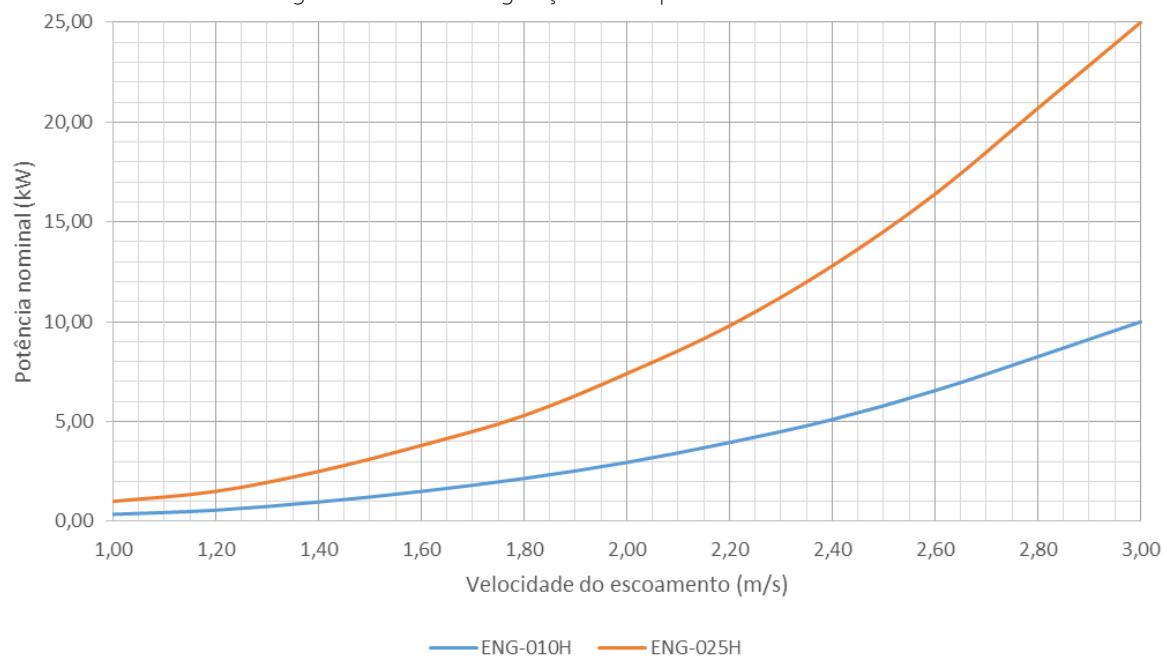
Figura 72 – Dimensões mínimas dos geradores hidrocínéticos



(fonte: NEW ENERGY CORP., 2018)

Mais uma vez, o potencial de geração é dependente da natureza das águas que passam pelo gerador, principalmente no que se refere a sua velocidade. A figura 73 apresenta as curvas de geração de energia esperada dos dois modelos para diferentes velocidades de escoamento.

Figura 73 – Curvas de geração dos dispositivos hidrocínéticos



(fonte: adaptado de NEW ENERGY CORP., 2018)

Infelizmente, ao contrário das outras situações estudadas, não há um modelo de canal específico para avaliar. Portanto, para a estimativa do potencial de geração e demais análises será adotada

uma velocidade do canal constante de 2,50 m/s para os dois geradores estudados. Vale ressaltar que no caso real da implantação desse método de geração, estudos hidrológicos completos deverão ser realizados sobre o rio ou canal em questão, de modo que seja possível prever a variação de velocidade, nível de cheia, vazões, etc. Tomando como base a velocidade de 2,50 m/s, os geradores EVG-010H e EVG-025H trabalhariam com potências de 5,83 kW e 14,60 kW, respectivamente, o que resultaria em uma produção anual de 51.027,00 kWh e 127.896,00 kWh.

Para a análise financeira, a empresa nos forneceu valores base para possibilitar algumas simulações. Entretanto, tais valores podem variar significativamente dependendo do local e do tipo de canal onde os equipamentos forem instalados e, portanto, uma nova cotação é indicada para estudos mais detalhados. Sendo assim, os valores considerados foram de US\$ 40.250,00 para aquisição, transporte e instalação do modelo EVG-010H e de US\$ 82.125,00 para o modelo EVG-025H. Além disso, uma manutenção de US\$ 1.000,00/ano foi considerada nos dois casos. Adotando a mesma abordagem, as mesmas taxas utilizadas para as outras tecnologias estudadas (inflação de 8%a.a., TMA de 12%a.a., R\$ 0,67/kWh) e uma taxa de câmbio de R\$ 3,92/US\$, a economia anual inicial estimada seria de R\$ 30.063,98 (EVG-010H) e R\$ 81.258,73 (EVG-025H). A tabela 22 e a tabela 23 a seguir apresentam os valores calculados ano a ano para os dois modelos de geradores dentro da vida útil mínima de 10 anos.

Tabela 22 – Fluxo de caixa comparativo entre a energia do EVG-010H e a convencional

Ano	Conta Anual	Manutenção	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa (VP)	Acumulado	Acumulado (VP)
0	-	-	-R\$ 157.780,00	-R\$ 157.780,00	-R\$ 157.780,00	-R\$ 157.780,00
1	R\$ 36.702,70	R\$ 4.233,60	R\$ 32.469,10	R\$ 28.990,26	-R\$ 125.310,90	-R\$ 128.789,74
2	R\$ 39.638,91	R\$ 4.572,29	R\$ 35.066,62	R\$ 27.954,90	-R\$ 90.244,28	-R\$ 100.834,84
3	R\$ 42.810,03	R\$ 4.938,07	R\$ 37.871,95	R\$ 26.956,51	-R\$ 52.372,32	-R\$ 73.878,33
4	R\$ 46.234,83	R\$ 5.333,12	R\$ 40.901,71	R\$ 25.993,78	-R\$ 11.470,61	-R\$ 47.884,55
5	R\$ 49.933,61	R\$ 5.759,77	R\$ 44.173,85	R\$ 25.065,43	R\$ 32.703,23	-R\$ 22.819,12
6	R\$ 53.928,30	R\$ 6.220,55	R\$ 47.707,76	R\$ 24.170,23	R\$ 80.410,99	R\$ 1.351,11
7	R\$ 58.242,57	R\$ 6.718,19	R\$ 51.524,38	R\$ 23.307,01	R\$ 131.935,36	R\$ 24.658,12
8	R\$ 62.901,97	R\$ 7.255,65	R\$ 55.646,33	R\$ 22.474,62	R\$ 187.581,69	R\$ 47.132,74
9	R\$ 67.934,13	R\$ 7.836,10	R\$ 60.098,03	R\$ 21.671,95	R\$ 247.679,72	R\$ 68.804,69
10	R\$ 73.368,86	R\$ 8.462,99	R\$ 64.905,87	R\$ 20.897,95	R\$ 312.585,60	R\$ 89.702,65

Tabela 23 – Fluxo de caixa comparativo entre a energia do EVG-025H e a convencional

Ano	Conta Anual	Manutenção	Fluxo de Caixa	Fluxo de Caixa (VP)	Acumulado	Acumulado (VP)
0	-	-	-R\$ 321.930,00	-R\$ 321.930,00	-R\$ 321.930,00	-R\$ 321.930,00
1	R\$ 91.993,02	R\$ 4.233,60	R\$ 87.759,42	R\$ 78.356,63	-R\$ 234.170,58	-R\$ 243.573,37
2	R\$ 99.352,47	R\$ 4.572,29	R\$ 94.780,18	R\$ 75.558,18	-R\$ 139.390,40	-R\$ 168.015,19
3	R\$ 107.300,66	R\$ 4.938,07	R\$ 102.362,59	R\$ 72.859,67	-R\$ 37.027,80	-R\$ 95.155,52
4	R\$ 115.884,72	R\$ 5.333,12	R\$ 110.551,60	R\$ 70.257,54	R\$ 73.523,80	-R\$ 24.897,98
5	R\$ 125.155,49	R\$ 5.759,77	R\$ 119.395,73	R\$ 67.748,34	R\$ 192.919,53	R\$ 42.850,36
6	R\$ 135.167,93	R\$ 6.220,55	R\$ 128.947,39	R\$ 65.328,76	R\$ 321.866,91	R\$ 108.179,12
7	R\$ 145.981,37	R\$ 6.718,19	R\$ 139.263,18	R\$ 62.995,59	R\$ 461.130,09	R\$ 171.174,71
8	R\$ 157.659,88	R\$ 7.255,65	R\$ 150.404,23	R\$ 60.745,75	R\$ 611.534,32	R\$ 231.920,46
9	R\$ 170.272,67	R\$ 7.836,10	R\$ 162.436,57	R\$ 58.576,26	R\$ 773.970,89	R\$ 290.496,71
10	R\$ 183.894,48	R\$ 8.462,99	R\$ 175.431,50	R\$ 56.484,25	R\$ 949.402,39	R\$ 346.980,96

Para ambos os casos, podemos observar que o prazo de retorno do investimento é consideravelmente curto variando entre 4 e 6 anos. Para efeitos comparativos, o prazo de retorno descontado (*discounted payback time*) seria de 5,94 anos para o modelo EVG-010H e de 4,36 anos para o EVG-025H.

De forma a comparar os custos do kWh, foram contabilizados todos os custos envolvidos para a produção de energia durante a vida útil dos equipamentos (10 anos). Os valores foram resumidos na tabela 24.

Tabela 24 – Custos da energia convencional *versus* hidrocínética

Alternativa	Custo Total	Custo Total (VP)	Custo do kWh	Custo do kWh (VP)
Concessionária	R\$ 851.787,27	R\$ 701.179,88	R\$ 0,67	R\$ 0,55
EVG-010H	R\$ 196.980,00	R\$ 190.048,92	R\$ 0,39	R\$ 0,37
EVG-025H	R\$ 361.130,00	R\$ 354.198,92	R\$ 0,28	R\$ 0,28

4.1.6 Resumo das alternativas

Com relação as alternativas de microgeração, existem várias formas de comparação financeira. Uma delas seria simplesmente comparar os diferentes prazos de retorno de cada investimento, de modo que aquelas que retornam o investimento em um período mais curto seriam mais vantajosas. Embora esse método valorize a necessidade de se obter um retorno rápido do investimento, ele ignora a vida útil de cada tecnologia e discrimina aquelas com maior ciclo de vida. Ao compararmos um projeto com prazo de retorno do investimento (PRI) igual a 8 anos e um outro com prazo de 9 anos, por exemplo, assumiríamos que o primeiro seria mais vantajoso do ponto de vista financeiro. Mas se verificarmos que a vida útil desse projeto é de 10 anos, contra 20 anos do projeto de PRI igual a 9 anos, essa lógica pode não ser verdadeira.

Outra metodologia possível é a de comparar cada tecnologia em termos do total de custos e economias envolvidas, convertendo tudo em valor presente para levar em conta o valor temporal do dinheiro. Infelizmente, com essa abordagem se torna difícil levar em conta o tamanho de cada projeto, visto que um projeto que exija grandes investimentos e gere grandes economias pode ter o mesmo valor presente líquido que um projeto menor, com menos investimento e menos economia.

Sendo assim, diferentes abordagens devem ser adotadas para avaliar a viabilidade financeira de um investimento. Para tentar levar em consideração o tamanho do investimento e a variabilidade do potencial de geração dentre os diferentes métodos através da abordagem de valor presente, os custos totais foram normalizados pelo total de energia gerada durante a vida útil de cada um, resultando em custos de kWh (R\$/kWh). Além disso, como as tecnologias possuem diferentes expectativas de vida, os custos devem ser extrapolados assumindo que os investimentos serão repetidos indefinidamente ao fim de cada ciclo de vida até atingirem um mínimo período comum, que neste caso seria de 150 anos para as tecnologias estudadas. É importante ressaltar que esses valores (os custos do kWh no período comum) são apenas comparativos, pois não podemos esperar que os valores dos custos e das taxas de inflação se mantenham constantes por tanto tempo. Com isso, essa segunda abordagem fica muito mais completa e, sendo assim,

foi selecionada para classificar a viabilidade econômica dos métodos de microgeração estudados.

A tabela 25 resume os resultados das duas abordagens descritas acima, conforme obtido nos itens 2.5.2 a 2.5.5. Com exceção dos custos do biodiesel produzido a partir de óleo de fritura, que tem como base valores de 2015, todos os demais custos foram tomados com cotações do ano de 2018. As taxas usadas foram as mesmas para todos os métodos, conforme descrito anteriormente, a saber: inflação de 8% a.a. e taxa mínima de atratividade (TMA) de 12% a.a., resultando em uma TMA corrigida de 3,70% a.a.

Tabela 25 – Comparação da viabilidade financeira dos diferentes métodos de geração

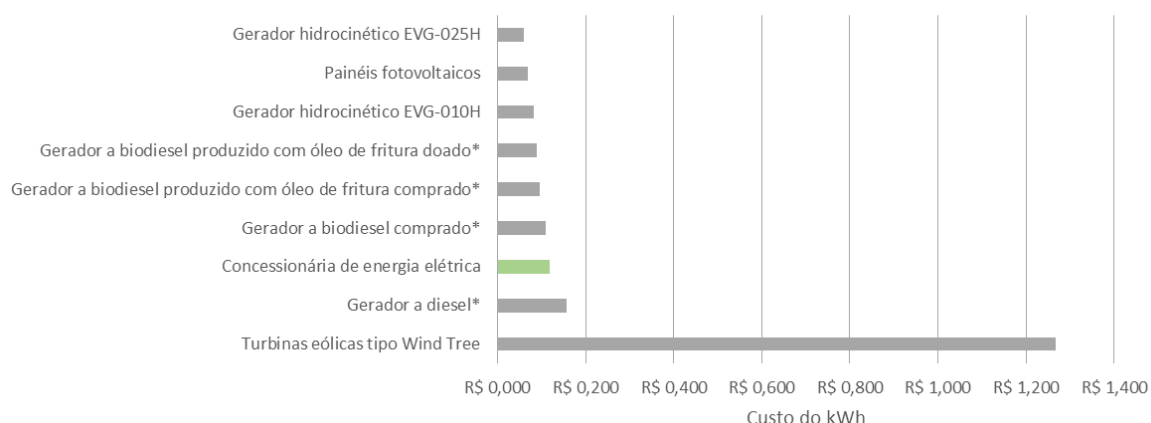
Método de Microgeração	Vida Útil (anos)	PRI Descontado (anos)	Custo do kWh em um Ciclo de Vida	Custo do kWh no Período Comum
Gerador hidrocínético EVG-025H	10	4,36	R\$ 0,277	R\$ 0,060
Painéis fotovoltaicos	25	11,42	R\$ 0,245	R\$ 0,068
Gerador hidrocínético EVG-010H	10	5,94	R\$ 0,372	R\$ 0,081
Gerador a biodiesel produzido com óleo de fritura doado*	1	-	R\$ 0,473	R\$ 0,088
Gerador a biodiesel produzido com óleo de fritura comprado*	1	-	R\$ 0,514	R\$ 0,096
Gerador a biodiesel comprado*	1	-	R\$ 0,588	R\$ 0,109
Concessionária de energia elétrica	1	-	R\$ 0,642	R\$ 0,119
Gerador a diesel*	1	-	R\$ 0,845	R\$ 0,157
Turbinas eólicas tipo Wind Tree	15	não se paga	R\$ 5,351	R\$ 1,267

*Sem considerar aquisição, instalação e manutenção dos geradores

Com base no PRI descontado (*discounted payback time*), podemos observar que os geradores hidrocínéticos apresentaram o retorno mais rápido do investimento inicial, seguidos pelos painéis fotovoltaicos, todos com valores dentro da vida útil de cada método. A geração eólica com turbinas do tipo *Wind Tree* se mostrou inviável financeiramente, pois não é possível retornar o investimento apenas com as economias da conta de luz. Não consideramos o prazo de retorno para os demais métodos pois nesses casos não foram considerados os investimentos para aquisição, instalação e manutenção dos geradores e, portanto, não faz sentido obter um retorno do investimento.

Embora o PRI permita ao investidor ter uma boa noção de quando ele irá recuperar o seu investimento, ele costuma discriminar projetos com uma vida mais longa. Sendo assim, os métodos de geração estudados foram avaliados com base no valor presente de cada um. À primeira vista, podemos observar que os geradores hidrocínéticos, os painéis fotovoltaicos e os geradores abastecidos com biodiesel se mostraram mais econômicos que a energia obtida convencionalmente da concessionária. Por outro lado, as turbinas eólicas do tipo *Wind Tree* e os geradores alimentados com diesel convencional apresentaram custos mais elevados que os praticados pela concessionária de energia elétrica. A figura 74 apresenta a classificação de forma mais visual, com base nos custos do kWh no período comum de 150 anos. É necessário lembrar que não foram computados os custos de aquisição, instalação e manutenção dos geradores a diesel e biodiesel, uma vez que as praças de pedágio já possuem tais equipamentos. Entretanto, uma avaliação mais completa deve ser realizada para o caso da instalação de novos geradores. Além disso, esses resultados são válidos para as premissas adotadas nos itens anteriores e variações na irradiação, velocidade dos ventos ou das águas, necessidade de intervenções especiais, por exemplo, podem afetar significativamente os resultados obtidos.

Figura 74 – Custo do kWh para os diferentes métodos de microgeração



*Sem considerar aquisição, instalação e manutenção dos geradores

Podemos concluir que os geradores hidrocínéticos e os painéis fotovoltaicos apresentam resultados financeiros semelhantes e muito satisfatórios, com ligeira vantagem para o gerador EVG-025H. Entretanto, os geradores hidrocínéticos necessitam de um corpo hídrico próximo à praça de pedágio para serem viáveis tecnicamente, enquanto os painéis solares podem ser instalados em qualquer praça de pedágio, desde que haja incidência solar. Além de serem viáveis do ponto de vista financeiro, esses métodos de microgeração estão inseridos no conceito de energias renováveis, em acordo com o conceito de sustentabilidade. Como ponto negativo, essas tecnologias são dependentes da natureza e não são garantias de geração constante de energia, fato que justifica a sua classificação como alternativa. Portanto, a não ser que sejam combinadas com bancos de bateria para armazenamento de energia, tais tecnologias não servem como *backup* totalmente confiável para casos de falta de energia por parte da concessionária elétrica, principalmente no que se refere aos painéis solares. Nos casos de geradores hidrocínéticos instalados em rios perenes, essa variabilidade é mitigada, mas ainda sim existe e, portanto, não há como garantir a geração de energia de forma constante.

Referente aos geradores movidos à combustível, pode-se observar que os custos do kWh são levemente inferiores ao que é cobrado pela concessionária de energia quando os geradores são abastecidos com biodiesel. Quando abastecidos com diesel convencional, o preço do kWh aumenta significativamente, além de aumentarem também as emissões de poluentes. Embora não seja o método mais econômico nem o mais amigável ao meio ambiente, a microgeração elétrica a partir de geradores alimentados com combustíveis são uma solução técnica interessante para suprir eventuais falhas no abastecimento de energia elétrica, seja por conta da rede ou por outra fonte de microgeração. Mais uma vez é importante ressaltar que não foram incluídos os gastos com aquisição, instalação e manutenção dos geradores dessa categoria, o que aumentaria o custo do kWh caso fosse considerado.

As turbinas eólicas do tipo *Wind Tree* apresentaram o pior desempenho financeiro dentre as tecnologias avaliadas, com custos substancialmente superiores a qualquer outro método de microgeração. Uma das explicações para isso pode estar nas taxas de câmbio entre as moedas, já que o produto é atualmente comercializado em euros. Além disso, o potencial de geração de energia nesse caso foi baseado na velocidade média dos ventos no estado do Rio Grande do Sul, de 6,0 m/s. Entretanto, se as turbinas forem instaladas em um local com ventos mais intensos a energia gerada pode aumentar consideravelmente, o que consequentemente diminuiria os custos do kWh. Uma solução possível seria tentar aproveitar os deslocamentos de ar causados

pelos veículos em movimento, principalmente de ônibus e caminhões, ao longo das rodovias. Para isso, são necessários estudos mais detalhados para quantificar as velocidades dos ventos sob tais condições. Assim como para os geradores hidrocínéticos e fotovoltaicos, essa é uma tecnologia extremamente prematura e, embora não seja viável financeiramente (para as condições do estudo), pode ser uma solução interessante para o meio ambiente.

Em resumo, os métodos hidrocínético e fotovoltaico são os mais econômicos para microgeração, além de terem baixo impacto ambiental, mas não os mais indicados para *backup* em casos de falta de energia. Por outro lado, os geradores a diesel ou biodiesel são mais confiáveis para manter o abastecimento elétrico em casos de apagão (desde que haja manutenção periódica), porém são mais caros e muito mais poluentes, não sendo recomendados para substituir o abastecimento da rede elétrica. Caso haja interesse em garantir o abastecimento elétrico durante falhas na rede de forma mais sustentável, uma alternativa seria a instalação de uma combinação de geradores que utilizem diferentes fontes de energia de acordo com o potencial local. Dessa forma, quando não há sol a geração pode ser feita a partir da água ou do vento, dentre outras combinações possíveis.

Certamente, independente da solução a ser adotada, a otimização e eficiência energética nas edificações da praça são de extrema importância na adoção de qualquer tecnologia. Equipamento mais eficientes, projetos inteligentes que minimizam a necessidade de energia, dispositivos para melhorar as condições térmicas devem ser considerados, independentemente do tipo de geração, pois evitam o desperdício de energia, atendendo ao conceito de sustentabilidade.

4.2 DESAFIOS NOS ABASTECIMENTOS PONTUAIS AO LONGO DA RODOVIA E POTENCIAL DO USO DA MICROGERAÇÃO PARA ABASTECIMENTO DE SISTEMAS ITS

Parte importante para os avanços na implantação de sistemas rodoviários é a capacidade de levar energia aos vários sistemas implantados ao longo da rodovia. Circuito de monitoramento por câmeras, contadores e analisadores de tráfego, painéis de mensagem variável, placas iluminadas, sistemas de sensoriamento remoto de taludes, pavimentos, estações climáticas, são apenas alguns destes sistemas.

Todos estes precisam estar conectados à rede de abastecimento de energia. A maneira tradicional de se realizar isso é através da abertura de pontos de energia ao longo da rodovia, necessitando algumas vezes a instalação de um transformador para baixa tensão ou, então, a extensão por centenas de metros entre pontos já existentes na rodovia. Soma-se a isto a mudança na regulação feita para as novas concessões cujo custo de iluminação pública sairá do custo do governo municipal para as concessionárias rodoviárias; ou seja, o custo deixará os municípios que cruzam para ser atribuídos diretamente aos usuários das rodovias.

Há também de se atentar que, infelizmente, no Brasil, instalação de transformadores, redes cabeadas longas de baixa tensão ou pequenas instalações elétricas motivam furtos, instalações irregulares e vandalismos. Tais práticas elevam os custos de manutenção, interrompem o funcionamento dos sistemas gerando frustrações de problemas operacionais daqueles sistemas conectados.

Isto demonstra a relevância de se dispor de sistemas de microgeração capazes de suprir pequenas demandas sem a necessidade de abrir um ponto na rede de abastecimento, que não apenas é caro mas também desnecessários pela potência demandada pelos sistemas que são muitas vezes equivalente em consumo ao de uma lâmpada convencional residencial.

Conforme foi estudado e citado nessa pesquisa, existem alternativas de microgeração de energia já disponíveis no mercado. Essas alternativas podem ser destinadas para abastecimento pontuais ao longo da rodovia. Conforme definição, são alternativas, de modo que é interessante que duas delas estejam combinadas para a falta de geração de uma possa ser suprida por outra.

A utilização de energia fotovoltaica e eólica em dispositivos isolados já é uma realidade aplicada em algumas vias pedagiadas brasileiras e no mundo. Conforme apresentado na pesquisa, dependendo do ambiente inserido pode-se prever a utilização de energia hidrocínética com pequenos geradores, que é uma alternativa a ser avaliada em campo para abastecimentos pontuais. A geração de energia considerado a utilização do vento, através da *wind tree*, mesmo que em nível de maturidade baixo e alto custo, certamente será uma possibilidade nos próximos anos para microgeração de energia.

Nessa ideia de aplicação no futuro, foco da pesquisa, certamente a utilização de transdutores piezoelétricos é uma possibilidade que deve ser considerada para o abastecimento pontual. Os estudos realizados comprovam a sua possibilidade quanto à geração de energia, de modo que se faz necessário maiores avaliações experimentais e possíveis alterações no sistema para elevar sua maturidade. O nível de maturidade da tecnologia ainda é baixo, mas certamente os estudos comprovam o seu potencial a ser utilizado não somente na geração de energia, mas como sensores de coleta e pesagem em relação à passagem de veículos. O acompanhamento e otimização do sistema instalado junto à praça é importante para melhoria do sistema e encaminhamento para possibilidade de utilização em abastecimentos pontuais ao longo das vias.

A energia proveniente da utilização de transdutores piezoelétricos é renovável e pode ser uma alternativa em sistemas pontuais mais afastados. Fato positivo, é que sempre haverá movimentação de veículos e consequente geração de energia. Sendo assim, essa tecnologia se torna uma alternativa que dificilmente não terá condições de geração de energia, fato importante na instalação de sistemas afastados que necessitam de energia.

A proposta demonstrada neste projeto de pesquisa para geração a partir de pavimentos, se mostra como uma sólida potencialidade para aplicação nestas situações. O fato de ser consolidado ao pavimento e permitir a instalação em qualquer ponto da rodovia é muito atrativo por permitir levar energia a qualquer ponto necessário sem necessidade de redes de transmissão. O conceito de usar a infraestrutura existente - pavimento - como forma de gerar e também transmitir energia surge na direção de auxiliar no desafio de abastecimentos pontuais ao longo da rodovia através de sistemas microgeradores como aqueles discutidos nesta pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste relatório, foram abordadas diferentes estratégias voltadas para a otimização da eficiência energética em praças de pedágio rodoviário. Analisamos tecnologias de variados níveis de maturidade, desde aquelas já disponíveis e atualmente empregadas até aquelas que ainda estão apenas em fase de estudos iniciais. Com isso, acreditamos que concessionárias de rodovias possam aplicar desde já estratégias que visem a otimização do consumo energético, assim como também investir em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que possam ser utilizadas no futuro.

O capítulo 2 analisou diversas formas de eficiência energética em praças de pedágio. No item 2.1 discutimos diferentes aspectos envolvidos da otimização da eficiência energética em edificações, como climatização, conforto térmico, ventilação, iluminação, etc. O item 2.2 trouxe métodos de microgeração aplicáveis a rodovias e praças de pedágio, desde aqueles mais conceituais até métodos que são amplamente utilizados atualmente. Um mapeamento dos sistemas existentes nas praças da Concepa e das suas demandas energéticas foi abordado no item 2.3. Em 2.4 apresentamos os sistemas de abastecimento de energia atualmente empregados na Concepa, assim como foram inseridos outros modelos em uso ao redor do mundo. Das tecnologias apresentadas em 2.2, selecionamos aquelas que possuem, atualmente, maior potencial de geração e direta aplicabilidade para as concessionárias de rodovias para serem avaliadas quanto a sua viabilidade financeira no item 4.1.

O capítulo 3 focou na geração de energia especificamente a partir dos pavimentos, entrando em maior detalhe sobre alguns métodos de geração abordados mais superficialmente no capítulo 2. Foi realizada uma revisão da literatura existente a respeito de sistemas piezoelétricos, fotovoltaicos e coletores térmicos aplicados na geração de energia em pavimentos (*energy harvesting from pavements*). Aqui foi feita a proposta de uma prova de conceito de um Sistema piezoelétrico, aplicado a uma faixa da praça de pedágio de Gravataí, administrada pela Concepa. O sistema proposto foi utilizado para alimentar lâmpadas LED implantadas em tachas de sinalização na aproximação da cancela de cobrança automática. Com a coleta de dados, concluiu-se que existe o potencial de geração de energia a partir de sistemas piezoelétricos, mas que a viabilidade financeira desse método de geração ainda esbarra no alto custos dos dispositivos. Entretanto, novos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias como essa podem reduzir significativamente seus valores de implantação, a exemplo de outras tecnologias viáveis atualmente, como a fotovoltaica.

O capítulo 3 mostrou a potencialidade dos sistemas de geração de energia a partir dos pavimentos urbanos e rodoviários como fonte inovadora de criar oportunidades para reaproveitamento da energia presente nos carregamentos rodoviários. Os sensores piezoelétricos instalados na Pista 1 da Praça P2 da BR-290/RS sob responsabilidade da Triunfo|CONCEPA permitiu demonstrar que as deformações no pavimento devido às cargas rodantes podem ser parcialmente convertidas em energia para iluminação de um sistema de balizamento da pista automática. Um sistema de LEDs intermitente instalado no pavimento alimentado pela energia dos próprios veículos que utilizavam a faixa aumentou as condições de conforto e segurança dos veículos que trafegavam a noite. A prova de conceito proposta se mostrou com grande potencial para exploração da tecnologia e permitiu que as equipes de pesquisadores pudessem fazer inúmeros testes para melhoria da sua eficiência, validação das

características previstas colaborando com um grande banco de informações sobre a relação entre o carregamento da via e a energia gerada pelo tráfego naquele ponto.

Para o estudo do sistema piezoelétrico proposto, a praça de Gravataí foi selecionada, principalmente, por ter o maior volume de tráfego dentre as 3 praças da concessionária, o que a torna mais viável quanto a implantação de sistemas de geração de energia a partir do pavimento. Entretanto, vale mencionar que as demais praças também possuem fluxos de veículos expressivos, assim como a maioria das praças de pedágio brasileiras, o que fomenta o desenvolvimento de estudos relacionados a microgeração de energia e domótica.

No capítulo 4 foram apresentadas recomendações para a melhoria da eficiência energética em praças de pedágio. Uma análise financeira foi realizada para diferentes métodos de microgeração de energia, cujos resultados apontaram que existem, a longo prazo, diversas fontes de energia mais econômicas do que a obtida através da concessionária elétrica. Tais fontes incluem geradores hidrocinéticos, painéis fotovoltaicos e geradores alimentados por biodiesel. Também foram abordados aspectos importantes na otimização do uso da eletricidade, como conforto térmico, iluminação, climatização, etc., recomendando aplicações específicas a praças de pedágio. Projetos que levem em consideração tais recomendações podem aumentar significativamente a eficiência energética das edificações, resultando em grandes economias a longo prazo.

6 EQUIPE EXECUTORA

Darlan Tomazini, Eng., MSc
Dionísio Doering, Eng, MSc, Dr.
Eduardo Meirelles, Eng Esp.
Fábio Hirsch, Eng. MSc
Henrique Falck Grimm Eng.
Leandro Conterato, Eng. MSc
Lélio Brito, Eng., Msc, PhD
Lucas Heller, Eng.
Marcos Antônio Coelho, Eng. MSc
Rafael Sacardo, Eng. Esp.
Thiago Vitorello, Eng. MSc
Valner Brusamarello, Eng. MSc, DSc

BIBLIOGRAFIA

A GERADORA. **Gerador de energia de 55 a 150 kVA**. Salvador, 2018. Disponível em: <<https://www.ageradora.com.br/equipamentos/geradores-de-energia/geradores-de-55-150-kva/>>. Acesso em: 07 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução n. 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília, DF, 2010.

_____. **Resolução n. 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

_____. **Banco de Informações de Geração**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 23 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Rodovias federais concedidas**: relatório 2013. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/rodovias/Relatorios/Relatorios_Anuais__Rodovias_Federais_Concedidas.html>. Acesso em: 02 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Diretoria Colegiada. **Resolução-RE nº 9, de 16 de janeiro de 2003**. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RE_09_2003.pdf/f4af80d4-8516-4f9c-a745-cc8b4dc15727>. Acesso em: 21 jun. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Sistema de levantamento de preços**. Rio de Janeiro, 2018a. Disponível em: <http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Mensal_Index.asp>. Acesso em: 07 jun. 2018.

_____. **Resultado dos leilões**. Rio de Janeiro, 2018b. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/distribuicao-e-revenda/leiloes-de-biodiesel/leiloes-de-biodiesel-interna?view=default>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, DF: CRESESB, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONCESSIONÁRIAS DE RODOVIAS. **Iluminação de LED leva mais segurança às pistas da CCR MSVia**. São Paulo, 2015a. Disponível em: <<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Noticia/9593/iluminacao+de+led+leva+mais+seguranca+a+s+pistas+da+ccr+msvia.aspx>>. Acesso em: 07 maio 2018.

_____. **Ecosul tem a primeira praça de pedágio do RS com energia gerada por painéis solares**. São Paulo, 2015b. Disponível em:

<<http://www.abcr.org.br/Conteudo/Noticia/8705/ecosul+tem+a+primeira+praca+de+pedagio+do+rs+com+energia+gerada+por+paineis+solares.aspx>>. Acesso em: 07 maio 2018.

AZZOUZ, M. S.; CHATTERJEE, A.; RORABAUGH, R.; VENEGAS, C.; DUKE, K.; WELLER, J. M.; SMITH, C. Active road rumble energy harvesting panels. In: International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IMECE, 2013. p. 1-11.

BARDELIN, C. E. A. **Os efeitos do racionamento de energia elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no consumo de energia elétrica**. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BERNI, M. D. Eficiência energética nos sistemas industriais de iluminação artificial. **O Papel**. p. 46-47, abr. 2015.

BEYER, P. O. **Medição de Desempenho Térmico de Ecotelhas**. Relatório Técnico p.1-4. UFRGS. Porto Alegre, 2006.

BLUE SOL. **EcoRodovias instala Energia Solar em Pedágio**. Ribeirão Preto, 2017. Disponível em: <<https://youtu.be/cRmvFHGI0o>>. Acesso em: 07 maio 2018.

BOBES-JESUS, V. et al. Asphalt solar collectors: A literature review. **Applied energy**, [S.L], v. 102, p. 962-970, 2013.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M.; SALLES, E. M.; CASTRO, G. M. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. Versão online ISSN 1678-8621. **Ambiente construído**. Porto Alegre, v. 17 n. 1, jan./mar. 2017. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/63420>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

CASTELLANELLI, C. A. Análise da viabilidade de produção e utilização do biodiesel obtido através do óleo de fritura em uma instituição federal de ensino superior. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Málaga, jul. 2015.

CASTELLANELLI, C. A.; ROOS, C.; CASTELLANELLI, M.; ROSA, L. C. da. Análise ambiental e econômica do biodiesel obtido por meio do óleo de fritura usado em praças de pedágio. **Revista Gerenciais**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 165-173, 2007.

CASTRO, A. P. A. S.; LABAKI, L. C.; CARAM, R. M.; BASSO, A.; FERNANDES, M. R. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 69-73, 2003.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano**. Tese de Doutorado. IPH/UFRGS. Porto Alegre, 2011.

CATUZZO, H. **Telhado verde**: Impacto positivo na temperatura e umidade do ar. O caso da Cidade de São Paulo. Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

CHEN, Y. et al. Mechanical Energy Harvesting From Road Pavements Under Vehicular Load Using Embedded Piezoelectric Elements. **Journal of Applied Mechanics**, [S.L], v. 83, p. 1-7, 2016.

CHIARELLI*, A. et al. Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures. **International Journal of Thermal Sciences**, [S.L], v. 112, p. 242-251, 2017.

CHIARELLI, A.; DAWSON, A.R.; GARCÍA, A. Parametric analysis of energy harvesting pavements operated by air convection. **Applied energy**, [S.L], v. 154, p. 951-958, 2015.

CHICAGO CLIMATE ACTION PLAN. **Energy Efficient Buildings – Five Strategies – Strategy 1**. Chicago, 2008. Disponível em:
<<http://www.chicagoclimateaction.org/filebin/pdf/finalreport/EnergyEfficientBuildings.pdf>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

CHUA, H. G.; KOK, B. C.; GOH, H. H. Modelling and design analyses of a piezoelectric cymbal transducer (PCT) structure for energy harvesting application. **Energy and Sustainability V**, [S.L], v. 186, p. 103-114, 2014.

CLEAN TECHNICA. **Dutch solar bike path solaroad successful & expanding**. Disponível em:
<<https://cleantechnica.com/2017/03/12/dutch-solar-bike-path-solaroad-successful-expanding/>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

CONCEPA. Publicação eletrônica [mensagem pessoal].

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental**. 2 ed. Rio de Janeiro: Revan, 2009.

DATTA, Utpal; DESSOUKY, Samer; PAPAGIANNAKIS, A. T. Harvesting Thermoelectric Energy from Asphalt Pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 8, p. 12-22, 2017.

DEVECITECH. **Renewable energy**. Istanbul, 2018. Disponível em: <<http://devecitech.com/>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

DEZFOOLI, A. S. et al. Solar pavement: A new emerging technology. **Solar energy**, [S.L], v. 149, p. 272-284, 2017.

DUTOIT, Noel E.; WARDLE, Brian L.; KIM, Sang-Gook. Design Considerations for MEMS-Scale Piezoelectric Mechanical Vibration Energy Harvesters. **Integrated Ferroelectrics**, [S.L], v. 71, p. 121-160, 2005.

ECCOLUST. **Tinta térmica autolimpante**. Porto Alegre, 2018. Disponível em:
<<http://www.eccolust.com.br/eccocolor.php>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

ENERFÍN. **Complexo Eólico de Osório**. Porto Alegre, 2018. Disponível em:
<http://complexoeolicodeosorio.com.br/br/multimidia_imagens.php>. Acesso em: 17 abr. 2018.

GARCÍA, Alvaro; PARTL, Manfred N.. How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine. **Applied Energy**, [S.L], v. 119, p. 431-437, 2014.

GUIMARÃES, A. G. L. **A obra de João Filgueiras Lima no contexto da cultura arquitetônica contemporânea**. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.

GUO, Lukai; LU, Qing. Potentials of piezoelectric and thermoelectric technologies for harvesting energy from pavements. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L], v. 72, p. 761-773, jun. 2017a.

_____. Modeling a new energy harvesting pavement system with experimental verification. **Applied Energy**, [S.L], v. 208, p. 1071-1082, 2017b.

HASEBE, M.; KAMIKAWA, Y.; MEIARASHI, S. Thermoelectric Generators using Solar Thermal Energy in Heated Road Pavement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 25th, 2006, Vienna.

HILL, Davion; AGARWAL, Arun; TONG, Nellie. **Assessment of piezoelectric materials for roadway energy harvesting: Cost of Energy and Demonstration Roadmap**. California, jan. 2014.

IKEMATSU, P. **Estudo da Refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

INMETRO. **Etiqueta nacional de conservação de energia**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores_ar_split_hiwall_indicenovo.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2018.

_____. **Informação ao consumidor**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>>. Acesso em: 22 jun. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

JUNG, I. et al. Flexible piezoelectric polymer-based energy harvesting system for roadway applications. **Applied Energy**, [S.L], v. 197, p. 222-229, 2017.

KANG-WON, W.; ANDREW, J. C. **A pilot study for investigation of novel methods to harvest solar energy from asphalt pavements**. A final report for Korea Institute of Construction Technology (KICT), 2010.

KIM, H. W. et al. Energy Harvesting Using a Piezoelectric "Cymbal" Transducer in Dynamic Environment. **Japanese Journal of Applied Physics**, [S.L], v. 43, n. 9, p. 6178-6183, 2004.

KINERGYPOWER. **Products**. Washington, DC, 2018. Disponível em: <<http://kinergypower.com/products/>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

KRAEMER, D. et al. High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration. **Nature materials**, [S.L], v. 10, p. 532-538, 2011.

LAMBERTS, R. **Disciplina: Tópicos Avançados em Conforto Térmico**. Elaborado por Doutorando Wagner Augusto Andreasi. Núcleo de Pesquisa em Construção. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Florianópolis: UFSC, 2003.

LEE, C. S. et al. Poly (vinylidene fluoride) transducers with highly conduction poly (3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes. **Synthetic Metals**, [S.L], v. 152, p. 49-52, 2005.

LI, Cong. Road Performance of Common Piezoelectric Transducer for Asphalt Pavement Energy Harvesting. **Applied Mechanics and Materials**, [S.L], v. 746, n. 746, p. 1491-1494, 2015.

LI, Z. et al. Electromagnetic Energy-Harvesting Shock Absorbers: Design, Modeling, and Road Tests. **TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY**, [S.L], v. 62, n. 3, p. 1065-1074, 2013.

LUKIANCHUKI, M. A. **A evolução das estratégias de conforto térmico e ventilação natural na obra de João Figueiras Lima, Lelé: hospitais Sarah de Salvador e Rio e Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia no Mundo 2015 – 2016**. Brasília, DF, 2017a.

_____. **MME abre consulta pública sobre eficiência de Refrigeradores, congeladores e condicionadores de ar e transformadores de distribuição**. Brasília, DF, 2017b. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-abre-consulta-publica-sobre-eficiencia-de-refrigeradores-congeladores-e-condicionadores-de-ar-e-transformadores-de-distribuicao>. Acesso em: 21 jun. 2018.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **Norma Regulamentadora 17: Ergonomia**. Brasília, DF, 1990. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR17.pdf>>. Acesso em 21 jun. 2018.

MOURE, A.; RODRÍGUEZ, M. A. I.; RUEDA, S. H.; GONZALO, A.; RUBIO-MARCOS, F.; CUADROS, D. U.; PÉREZ-LEPE, A.; FERNÁNDEZ, J. F. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. **Energy Conversion and Management**. [S. l.], v. 112, p. 246-253, March 2016.

NEOSOLAR. **Simulador Solar**: Calculadora Solar Fotovoltaica. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/simulador-solar-calculadora-fotovoltaica>>. Acesso em 25 maio 2018.

NEW ENERGY CORPORATION. **Products**. Calgary, 2018. Disponível em: <<http://www.newenergycorp.ca/products.html>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

NEW WORLD WIND. **The Wind Tree**. Asnières sur Seine, 2018. Disponível em: <<http://newworldwind.com/wind-tree/>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

NORDMANN, Thomas; CLAVADETSCHER, Luzi. PV on Noise Barriers. **PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS**, [S.L], v. 12, p. 485-495, fev. 2004.

PAMPLONA, N. Apagão que deixou Norte e Nordeste sem luz foi causado por falha humana, diz ONS. **Folha de São Paulo**, São Paulo, não paginado, 6 abr. 2018.

PAPAGIANNAKIS, A. et al. Energy Harvesting from Roadways. **Procedia Computer Science**, [S.L], v. 83, p. 758-765, 2016.

PASCUAL-MUÑOZ, P. et al. Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors. **Applied energy**, [S.L], v. 111, p. 324-332, 2013.

PEREIRA, C. D. **Influência da refletância e da emitância de superfícies externas no desempenho térmico de edificações**. Tese de Doutorado. UFSC. Florianópolis, 2014.

PLEDGE, E; SCHOLZ-BARTH, K. From Grey to Green. Environmental Benefits of Green Roofs. In: EARTH PLEDGE. GREEN ROOFS Ecological Design and Construction, Library of Congress. Atglen, 2005. p. 16-21.

PRADO, L. **Iluminação natural**. São Paulo: FAU-USP, 1961.

ROSHANI, H. et al. Energy harvesting from asphalt pavement roadways vehicle-induced stresses: A feasibility study. **Applied Energy**, [S.L], v. 182, p. 210-218, 2016.

ROSHANI, H. et al. Theoretical and Experimental Evaluation of Two Roadway Piezoelectric-Based Energy Harvesting Prototypes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.L], v. 30, n. 2, p. 1-10, 2018.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública do Brasil**. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.

SHARPE, L. **Solar panels power off-grid toll plaza**. Stevenage, 2013. Disponível em: <<https://eandt.theiet.org/content/articles/2013/05/solar-panels-power-off-grid-toll-plaza/>>. Acesso em: 07 maio 2018.

SODANO, Henry A.; INMAN, Daniel J.; PARK, Gyuhac. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. **Journal of intelligent material systems and structures**, [S.L], v. 16, n. 10, p. 799-807, 2005.

SONG, Y. et al. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.L], v. 41, n. 29, p. 12563-12568, 2016.

SYMEONI A. **A review on energy harvesting from roads**. 2012. 39 f. Dissertação de Mestrado. KTH, Estocolmo, 2012.

TANABE, S. **Thermal comfort requirements in Japan**. Tokyo: Waseda University, 1988.

THE GUARDIAN. **world's first solar panel road opens in normandy village**. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2016/dec/22/solar-panel-road-tourouvre-au-perche-normandy>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

VERDANT POWER. **The RITE Project**. New York City, 2018. Disponível em: <<https://www.verdantpower.com/rite>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

WANG, H.; JASIM, A.; CHEN, X. Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications: A comprehensive review. **Applied Science**. [S. l.], v. 212, p. 1083-1094, Feb. 2018.

WATTWAY. **Applications**. Disponível em: <<http://www.wattwaybycolas.com/en/#applications>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

WU, G.; YU, B. Thermal energy harvesting system to harvest thermal energy across pavement structure. **International Journal of Pavement Research and Technology**. [S. l.], v. 5, n. 5, p. 311-316, 2012.

XIANG, H J; WANG, J J; ZHANG, Z F Shi And Z W. Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. **SMART MATERIALS AND STRUCTURES**, [S.L], v. 22, p. 1-9, 2013.

XIONG, H. et al. **Piezoelectric Energy Harvesting on Public Roadways**. In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D. C., 2014.

XIONG, Haocheng; WANG, Linbing. Piezoelectric energy harvester for public roadway: On-site installation and evaluation. **Applied Energy**, [S.L], v. 174, p. 101-107, 2016.

YAO, L. et al. Laboratory Testing of Piezoelectric Bridge Transducers for Asphalt Pavement Energy Harvesting. **Key Engineering Materials**, [S.L], v. 492, p. 172-175, 2011.

YESNER G. et al. **Evaluation of a Novel Piezoelectric Bridge Transducer**. In: 2017 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM). Atlanta, EUA, 2017.

YESNER G. et al. **Piezoelectric Energy Harvesting Using a Novel Cymbal Transducer Design**. In: 2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM). Darmstadt, Alemanha, 2016.

ZHANG, Zhiwei; XIANG, Hongjun; SHI, Zhifei. Modeling on piezoelectric energy harvesting from pavements under traffic loads. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [S.L], p. 1-12, 2015.

ZHAO, H. et al. Harvesting Energy from Asphalt Pavement by Piezoelectric Generator. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater**, [S.L], p. 933-937, 2014.

ZHAO, Hongduo; LING, Jianming; YU, Jian. A comparative analysis of piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [S.L], v. 120, n. 8, p. 317-323, 2012.

ZHAO, Hongduo; YU, Jian; LING, Jianming. Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [S.L], v. 118, p. 909-915, 2010.

ZUO, Lei; ZHANG, Pei-sheng. Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions. **Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions**, [S.L], v. 135, p. 1-8, 2013.