



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Leandro da Silva Cravo

Orientador

Professor Doutor Adelino Jorge Lopes Ferreira

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Colaboração Institucional



Waydip

Coimbra, Janeiro, 2014

Agradecimentos

Difícilmente conseguirei exprimir totalmente o meu profundo e sincero agradecimento em apenas uma página e por palavras, pois todas elas parecem ser tão pouco perante a grandiosa ajuda que tive durante a elaboração desta dissertação e ao longo da minha vida académica.

Tentando exprimir esse sincero sentimento, queria agradecer:

Ao Professor Doutor Adelino Ferreira, pela motivação, pelo acompanhamento, pela sua competência científica, por ter tornado fáceis os obstáculos que iam surgindo no caminho, pela total disponibilidade, pelo seu rigor e profissionalismo, pelo material disponibilizado e pelas suas sugestões. Devo também reconhecer que as suas aulas foram essências para me fazer despertar o grande interesse na área das infraestruturas de transporte.

À Waydip, a toda à sua equipa, em particular ao Eng.º Francisco Duarte, pela oportunidade que me deu em colaborar com uma das empresas mais promissoras de Portugal, com uma equipa fantástica e cheia de ideias inovadoras. Agradeço-lhe também, por me ter acompanhado, por me ter ajudado ao início a integrar-me mais facilmente, pelo material disponibilizado, pela sua disponibilidade e ajuda e pelo companheirismo.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, e a todos os meus Professores, em especial aos de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, pelo conhecimento, profissionalismo e trabalho.

Aos meus colegas e amigos de curso, em especial ao Nuno Ribeiro, Rui Gaio, e Diana Dias, e aos meus velhos amigos, Vitor Santos e Marco Martins, pelo apoio, conhecimento, pela amizade e companheirismo, por estarem sempre comigo em todos os momentos que mais necessitei.

À Débora Domingues pela tradução de um artigo em Francês, e pelo apoio, companheirismo e preocupação.

Por fim, queria dedicar todo o meu percurso académico e esta dissertação, à minha mãe, ao meu pai, à minha irmã e aos meus avós, que sempre me apoiaram em tudo sem hesitarem e fizeram todos os impossíveis para que nunca me faltasse nada. Era neles em quem eu pensava quando precisava de forças para enfrentar todos os obstáculos. É para vocês!

Muito Obrigado!

RESUMO

Esta dissertação teve como objetivo principal estudar o sistema da *Waydip* durante a sua implementação na cidade da Covilhã.

Para atingir o objetivo proposto foram efetuadas as seguintes tarefas: revisão de todas as técnicas de geração de energia associadas à engenharia de infraestruturas de transporte; explicação do funcionamento da tecnologia *Waynergy Vehicles* da *Waydip*; análise dos resultados experimentais; estudo dos revestimentos para a superfície dos módulos; análise da localização do sistema na fase piloto (tendo em conta a localização dos equipamentos coletivos, hierarquização viária e a avaliação da rentabilidade da operação); agenda dos trabalhos construtivos durante a implementação do sistema na fase piloto; e por fim, as potencialidades do sistema em estudo que podem vir a ser exploradas no futuro.

Os resultados experimentais foram realizados recorrendo a várias configurações eletrónicas e para várias condicionantes do tráfego. Esses resultados foram trabalhados através do programa computacional MATLAB. Na avaliação da rentabilidade da operação foram realizadas contagens a fim de se obter o volume de tráfego na localização do sistema na fase piloto para realizar uma análise de custos e benefícios. Todas as conclusões apresentadas na presente dissertação basearam-se nos resultados experimentais.

ABSTRACT

The main objective of this dissertation was to study the Waydip system during its implementation in the city of Covilhã.

To achieve the proposed goal, the following tasks were performed: a review of all energy generation techniques associated with transport infrastructure engineering; the explanation of the operation of the Waynergy Vehicles technology of Waydip; an analysis of the experimental results; the study of coatings for the modules surface; an analysis of the location of the system in the pilot phase (taking into account the location of collective equipment, road hierarchy, and evaluation of the profitability of the operation); a schedule of construction works during the system implementation in the pilot phase; and finally, the potential of the system under study that may come to be explored in the future.

The experimental results were conducted using several electronic configurations and for several traffic conditions. These results were worked through the computer program MATLAB. In the evaluation of profitability of the operation, traffic counts were performed in order to obtain the volume of traffic on the system location in the pilot phase to perform an analysis of costs and benefits. All conclusions presented in this dissertation were based on experimental results.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Estrutura da Dissertação	2
2 GERAÇÃO DE ENERGIA NOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Aproveitamento da Energia Solar.....	3
2.2.1 Coletor Solar Asfáltico	3
2.2.2 Geradores Termoelétricos.....	10
2.2.3 Aplicações Fotovoltaicas	11
2.3 Aproveitamento da Energia Cinética e da Pressão dos Veículos	15
2.3.1 Sensores Piezoelétricos.....	15
2.3.2 Geradores Eletrocinéticos	19
2.3.3 Geradores Hidráulicos	22
2.4 Aproveitamento da Energia Eólica.....	23
2.5 Considerações Finais	24
3 CASO DE ESTUDO	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 A <i>Waydip</i> e a Tecnologia <i>Waynergy Vehicles</i>	27
3.3 Análise dos Resultados Experimentais.....	29
3.4 Revestimento da Superfície do Módulo	38
3.5 Localização do Sistema de Geração de Energia nos Pavimentos da <i>Waydip</i>	41
3.5.1 Enquadramento do Município da Covilhã.....	45
3.5.2 Localização dos Equipamentos Coletivos na Cidade da Covilhã.....	47
3.5.3 Hierarquização Viária da Rede da Cidade da Covilhã	48
3.5.4 Agenda dos Trabalhos de Implementação do Sistema Piloto.....	51
3.5.5 Análise de Custos e Benefícios.....	58
3.6 Potencialidades do Sistema da <i>Waydip</i>	65
4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	70
5 REFERÊNCIAS	72
ANEXO A	A-1
ANEXO B	B-1
ANEXO C	C-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Coletor solar aplicado numa ponte em Roterdão (Holanda).....	4
Figura 2.2 – Distribuição das temperaturas segundo diferentes profundidades, tempo, e materiais (Aseada e Ca, 1996).....	5
Figura 2.3 – Esquema do sistema de descongelamento utilizado por Morino e Konishi (1995)6	
Figura 2.4 – Representação esquemática do sistema modelado através do TRNSYS (Chiasson e Spitler, 2000)	7
Figura 2.5 – Configuração em serpente (esquerda) e configuração slinky (direita) e os respetivos pavimentos (Chiasson e Spitler, 2000).....	7
Figura 2.6 – Esquema da tubagem usada na experiência (Wu <i>et al.</i> 2009).....	8
Figura 2.7 – Ganho de energia térmica em função do caudal do fluido (Wu <i>et al.</i> 2009)	9
Figura 2.8 – Influência do caudal, da distância entre os tubos e a temperatura do fluido.....	10
Figura 2.9 – Representação de um TEG.....	10
Figura 2.10 – PVNBs da <i>FAR Systems</i> instalados ao longo de uma via	12
Figura 2.11 – Representação do projeto <i>TNO - SolarRoad</i> na Holanda.....	13
Figura 2.12 – Painéis solares da <i>Onyx Solar</i> implementados numa via pedonal nos Estados Unidos.....	14
Figura 2.13 – Representação do sistema <i>Solar Roadway</i>	15
Figura 2.14 – Esquematização de um sensor piezoelétrico embutido num pavimento.....	16
Figura 2.15 – Esquematização no plano vertical de um transdutor PZT (Zhao <i>et al.</i> 2010)....	16
Figura 2.16 - Zona de aplicação dos sensores piezoelétricos da IPEG numa linha ferroviária	17
Figura 2.17 – Módulo piezoelétrico da <i>PAVEGEN Systems</i>	18
Figura 2.18 – <i>Waynergy People</i> da <i>Waydip</i> instalado na entrada da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior.....	19
Figura 2.19 – Energia gerada por uma pessoa de 63 kg no <i>Waynergy People</i>	20
Figura 2.20 – Energia gerada por uma pessoa de 75 kg no <i>Waynergy People</i>	21
Figura 2.21 – Sistema da <i>Motion Power</i>	21
Figura 2.22 – Lomba com sistema de geração de energia da UP	22
Figura 2.23 – Pormenor dos pistões hidráulicos da <i>Kinergy Power</i>	23
Figura 2.24 – Sistema <i>New Jersey Barrier</i> (Mark Oberholzer, 2006)	23
Figura 2.25 – Comparação da densidade de potência para quatro tipos de técnicas de geração de energia (Voigt <i>et al.</i> , 2003).....	24
Figura 3.1 – Esquema de funcionamento da tecnologia <i>Waynergy Vehicles</i>	29
Figura 3.2 – Energia gerada com um deslocamento de 5 mm.....	30
Figura 3.3 – Energia gerada com um deslocamento de 10 mm.....	31

Figura 3.4 – Energia gerada com um deslocamento de 15 mm.....	32
Figura 3.5 – Energia gerada por um veículo de 900 kg.....	34
Figura 3.6 – Energia gerada por um veículo de 2000 kg.....	35
Figura 3.7 – Energia gerada por um veículo de 5000 kg.....	35
Figura 3.8 – Evolução da maior energia gerada com o aumento da massa.....	36
Figura 3.9 – Comparação da energia gerada entre os 40 e os 50 km/h para os veículos ligeiros	37
Figura 3.10 – Energia gerada com uma superfície côncava por uma massa de 1350 kg	39
Figura 3.11 – Aplicação do revestimento antiderrapante colorido num pavimento betuminoso	41
Figura 3.12 – Localização do sistema piloto na Alameda Pêro da Covilhã	44
Figura 3.13 – Localização geográfica do Distrito de Castelo Branco e dos respetivos Municípios.....	45
Figura 3.14 – Localização geográfica das Freguesias do Município da Covilhã.....	46
Figura 3.15 – Evolução da população residente no Município da Covilhã.....	46
Figura 3.16 – Delimitação das fronteiras consoante a função de cada via.....	49
Figura 3.17 – Condicionamento na localização dos módulos	52
Figura 3.18 – Utilização de uma serra durante o corte do pavimento	53
Figura 3.19 – Utilização da placa vibratória durante a consolidação da fundação	54
Figura 3.20 – Escavação do separador do lado direito	55
Figura 3.21 – Colocação das peças de betão armado	56
Figura 3.22 – Tratamento da tubagem para o sistema de geração de energia	57
Figura 3.23 – Resultado final depois de fechar a caixa de trabalhos.....	58
Figura 3.24 – Diagrama do volume de tráfego diário dos veículos ligeiros na zona piloto	60
Figura 3.25 – Diagrama do volume de tráfego diário dos veículos pesados na zona piloto	60
Figura 3.26 – Estimativa dos veículos ligeiros na via da direita para a madrugada.....	61
Figura 3.27 – Cruzamento tipo com a localização dos módulos da <i>Waydip</i>	67
Figura 3.28 – Plano para o cruzamento considerado com atuação dos módulos da <i>Waydip</i> ...	68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Propriedades térmicas dos materiais (Aseada e Ca, 2000).....	5
Quadro 2.2 – Parâmetros térmicos calibrados para o asfalto, betão e solo (Herb <i>et al.</i> , 2008)..	6
Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens para cada tipo de sistema de geração de energia	25
Quadro 2.4 – Vantagens e desvantagens para cada tipo de sistema de geração de energia (cont.).....	26
Quadro 3.1 – Comparação da energia gerada para diferentes massas e respetivas velocidades	37
Quadro 3.2 – Diferença entre a máxima energia gerada e as restantes energias para cada velocidade.....	38
Quadro 3.3 – Distribuição etária da população residente no Município da Covilhã.....	47
Quadro 3.4 – Dados da energia gerada na fase piloto	62
Quadro 3.5 – Resultados do número de veículos ligeiros e de pesados e respetiva energia gerada e os seus benefícios monetários na fase piloto	62
Quadro 3.6 – Dados da energia gerada da segunda abordagem	64
Quadro 3.7 – Resultados do número de veículos ligeiros e de pesados e respetiva energia gerada e os seus benefícios monetários da segunda abordagem	64
Quadro 3.8 – Custo de cada operação para uma configuração do sistema como na fase piloto	64

SIMBOLOGIA

uvl – unidades de veículos ligeiros;
uvl/h - unidades de veículos ligeiros por hora;
TMDA – Tráfego Médio Diário Anual;
VAL – Valor Atual Líquido;
TMDA_p - Tráfego Médio Diário Anual de Pesados;
 t_{\min} – tempo mínimo;
 t_{fase} – tempo da fase;
 t_{\max} – tempo máximo;
ext – extensão.

ABREVIATURAS

3M – *Minnesota Mining and Manufacturing Company*;

ASC – *Asphalt Solar Collector*;

DGV – Direcção Geral de Viação (agora IMTT);

I&D – Investigação e Desenvolvimento;

IteCons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção;

IPEG – *Innowattech Piezo Electric Generator*;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos;

PV/ PVNBs – *Photovoltaic - Photovoltaic Noise Barriers*;

PVDF – Polivinilidenos;

PZT – *Lead zirconium titanate*;

SGP – Sistema de Gestão de Pavimentos;

SNSV – Sociedade Nacional de Sinalização Vertical, Lda;

TEGs – *Thermoelectrical Generators*;

TNO – *Organization for Applied Scientific Research*;

TRNSYS – *Transient System Simulation Tool*;

UBI – Universidade da Beira Interior;

UP – *Underground Power*.

1 INTRODUÇÃO

Portugal tem como objetivo estar em 2020 entre os cinco líderes europeus em termos de produção de energias renováveis. A visão nacional para este sector passa pela diversificação das energias renováveis apostando, não apenas em tecnologias já comprovadas que possam dar um contributo imediato para o sistema electroprodutor, mas também na investigação e desenvolvimento de novas tecnologias em fase de teste/demonstração que apresentem potencial de criação de valor na economia nacional (Ferreira, A., 2012).

Atualmente, os principais meios de geração de energia elétrica são centrais térmicas (utilizando carvão, gás ou gasóleo) e centrais nucleares, tendo sido progressivamente implementados meios de geração de energia renovável em grande escala, com maior destaque para as centrais hidroelétricas e instalações de energia eólica e solar.

Todos os meios de geração de energia elétrica anteriormente descritos são de aplicação maioritariamente no exterior das cidades e centros urbanos, necessitando de combustíveis fósseis, nucleares, ou recursos naturais (água, vento, sol) para gerar energia elétrica.

No entanto, a energia gerada necessita de ser transportada para os locais onde é consumida, com especial destaque para os grandes centros urbanos e industriais, existindo perdas de energia nas redes de transporte, o que faz com que seja necessário gerar mais energia do que aquela que realmente é necessária, aumentando assim os custos.

De modo a contrariar esta situação, recentemente começou a adotar-se o conceito de “microgeração”, que consiste na geração de energia elétrica nos próprios edifícios, principalmente através de sistemas de energia solar e eólica.

No entanto, estes sistemas estão dependentes dos fatores climáticas e da disponibilidade dos recursos (sol e vento) para gerar energia elétrica.

Nos centros urbanos existem dois fatores que são comuns na generalidade, a afluência de pessoas e de tráfego rodoviário. Perante esta situação, verifica-se que ambos partilham constantemente um espaço comum, o pavimento. Alargando o papel de qualquer tipo de pavimento que seja suscetível a um considerável fluxo de veículos, peões e ciclistas, torna esta superfície num local ótimo para a geração de energia renovável, dependendo apenas do movimento habitual praticado sobre esses pavimentos. E ainda, gera energia elétrica nos locais onde esta irá ser consumida, minimizando as perdas de energia na rede de transporte e reduzindo a necessidade de utilização de combustíveis fósseis e os malefícios que estes trazem para o ambiente.

Surgiu assim a ideia, à *startup* Nacional *Waydip*, em utilizar esses espaços para implementar um sistema capaz de aproveitar a energia cinética e a pressão, através de um pequeno deslocamento vertical. Transformando essa variação vertical num movimento rotacional do veio de um gerador, faz com que o sistema produza energia elétrica.

Analisando o funcionamento e os resultados da tecnologia *Waynergy Vehicles* da *Waydip*, consegue-se perceber quais os locais mais apropriados para a sua instalação, bem como a rentabilidade deste sistema e a sua importância na engenharia de tráfego e ambiente.

1.1 Estrutura da Dissertação

O primeiro capítulo introduz a importância do uso de novas tecnologias de geração de energia renovável nos pavimentos rodoviários. Explica o interesse que estas tecnologias de microgeração têm para Portugal e para o problema energético e ambiental a nível Mundial que poderá ocorrer no futuro. Conclui-se o capítulo com a descrição sumária do conteúdo desta dissertação.

O segundo capítulo apresenta várias técnicas de produção de energia nos pavimentos rodoviários. Começa por introduzir as várias formas de captar a energia não utilizada e a sua utilidade. Separa as diferentes técnicas de recolha de energia por: aproveitamento da energia solar; aproveitamento da energia cinética e respetiva pressão causada pela passagem de pessoas ou veículos sobre os pavimentos; e aproveitamento da energia eólica. Conclui com um quadro-resumo, onde se caracterizam as várias tecnologias abordadas.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso. Começa por apresentar a empresa na qual tive a oportunidade de colaborar, a *Waydip*, explicando também o funcionamento do sistema que serve de estudo de caso, o *Waynergy Vehicles*. Em seguida são analisados os resultados obtidos pela utilização do sistema, identificando os locais ótimos para a sua localização, comparando-os com o local escolhido para a fase piloto. É descrita, ainda, a agenda de trabalhos durante a implementação do sistema piloto e é feita uma análise dos custos e benefícios.

O quarto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho e os possíveis trabalhos futuros.

Este texto termina com a apresentação em Anexos de todos os dados relativos ao estudo: a localização dos equipamentos coletivos da cidade da Covilhã (Anexo A); a hierarquização viária da rede da cidade da Covilhã (Anexo B); e as dimensões das peças de betão usadas durante a fase piloto (Anexo C).

2 GERAÇÃO DE ENERGIA NOS PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

2.1 Introdução

A geração de energia renovável é uma técnica de captura e exploração de energia não utilizada e inesgotável, de forma a torná-la reutilizável. Através de sistemas inovadores instalados nas vias de comunicação, qualquer tipo de energia pode ser explorada. Desde a energia solar e eólica, bem como a energia provocada pela pressão dos pneus dos veículos, e a energia cinética associada aos mesmos. A captura de energia constitui, por si só, uma das mais promissoras técnicas de abordagem para o problema global de energia, sem necessidade de esgotar recursos naturais.

Alargando o papel dos pavimentos rodoviários de forma a tornarem-se coletores solares, térmicos e sistemas de armazenamento de energia, faz com que estas tecnologias sejam potencialmente vantajosas.

Depois de escolher a tecnologia apropriada para o processo de geração, a energia extraída destas superfícies pode ser utilizada nos semáforos, sistemas de iluminação, placares eletrônicos, para recarregar automóveis elétricos, obter água quente para uso doméstico, aquecimento ou arrefecimento urbano e descongelamento, contribuindo assim para uma degradação mais lenta dos pavimentos. Entre estas vantagens, alguns destes sistemas poderão vir a ter um papel ativo na gestão do tráfego.

Este capítulo resume alguns dos maiores estudos realizados sobre a captura de energia no sector da engenharia de infraestruturas de transporte.

2.2 Aproveitamento da Energia Solar

2.2.1 Coletor Solar Asfáltico

A captura de energia através de superfícies que servem de coletores solares já não é vista como uma nova tecnologia. É combinada com a incorporação de tubos e bombas com arranjos específicos, de forma a capturar a energia solar e convertê-la em energia térmica ou elétrica. Como se pode observar na Figura 2.1, os chamados coletores solares asfálticos (ASC) fazem circular água através de uma série de tubos colocados abaixo da superfície do pavimento. A radiação solar e da atmosfera provocam um aumento da temperatura no pavimento. Essa variação do calor é absorvida pelo pavimento e capturada pelo sistema de tubagens de água, sendo posteriormente armazenada no solo ou em outros reservatórios de armazenamento

durante o verão (Wu *et al.*, 2011). A energia armazenada pode ser utilizada por edifícios que se encontrem nas proximidades, aquecimento ou arrefecimento urbano, eletricidade e no descongelamento das estradas.

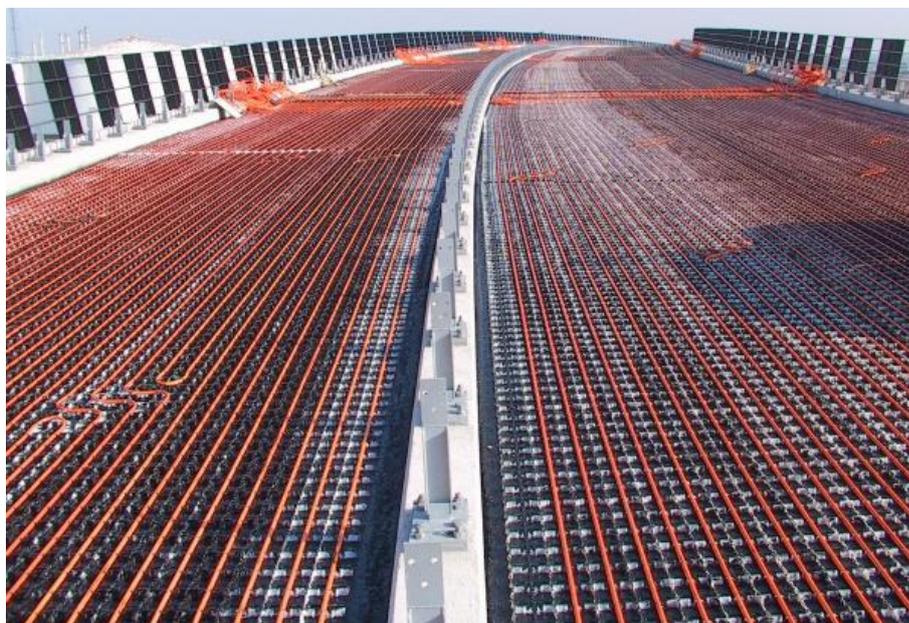


Figura 2.1 – Coletor solar aplicado numa ponte em Roterdão (Holanda)

Aseada e Ca (1996) realizaram ensaios em 1993 de forma a perceberem a quantidade de energia armazenada nos solos e o seu efeito na atmosfera (*Island Effect*). Este estudo compara as propriedades térmicas dos diferentes materiais utilizados, como por exemplo o asfalto, o betão, o macadame e a areia, para a construção dos pavimentos. Concluíram que o asfalto é um material em que a temperatura sobe mais ao longo do dia (Figura 2.2) devido à sua baixa refletividade e à condutividade térmica que apresenta.

Quadro 2.2 – Parâmetros térmicos calibrados para o asfalto, betão e solo (Herb *et al.*, 2008)

Parâmetro	Descrição	Asfalto	Betão	Solo
A	Albedo Solar	0,12	0,20	0,15
C_{fc}	Coefficiente da força	0,0015	0,0015	0,003
C_{nc}	Coefficiente natural	0,0015	0,0015	0,0015
CS_h	Coefficiente do vento	1,0	1,0	1,0
E	Emissividade do pavimento	0,94	0,94	0,95
ρC_p (J/m ³ /°C)	Densidade calor específico do pavimento	$2,0 \times 10^6$	$2,0 \times 10^6$	$2,4 \times 10^6$
D_{pav} (m ² /s)	Difusão térmica do pavimento	$4,0 \times 10^{-7}$	$7,0 \times 10^{-7}$	-
D_{sol} (m ² /s)	Difusão térmica do sol	$6,0 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$	$6,0 \times 10^{-7}$

Em 1995 foi instalado um sistema de descongelamento em Ninohe, no Japão, que cobria 266 m² do pavimento (Morino e Konishi, 1995). Este sistema utiliza um transdutor térmico coaxial sob forma de poços (Figura 2.3) que acumula a energia de maneira inter-sazonal, ou seja, o calor é guardado no Verão e libertado no Inverno para derreter a neve. Estes poços têm uma capacidade térmica de 50 kW e o sistema traz, em média, 175 W/m² de energia para operações de descongelamento. No Verão, o sistema recupera, em média, 100 W/m².

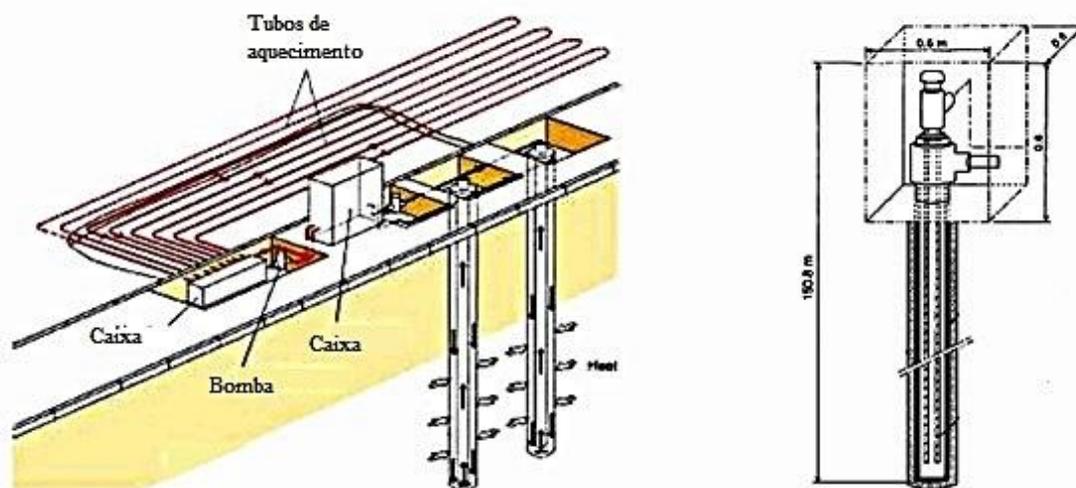


Figura 2.3 – Esquema do sistema de descongelamento utilizado por Morino e Konishi (1995)

De maneira análoga, Chiasson e Spitler (2000) modelaram as atuações nos pavimentos quentes recorrendo também a um sistema de poços geotérmicos para o descongelamento. Os seus modelos são desenvolvidos sobre a plataforma de cálculo TRNSYS (Figura 2.4) e para dois tipos de configurações: em serpente e em *slinky* (Figura 2.5).

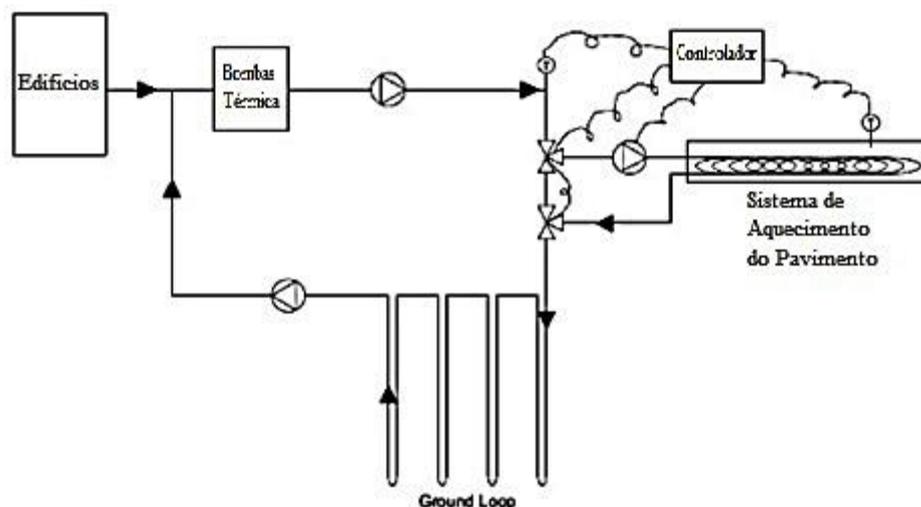


Figura 2.4 – Representação esquemática do sistema modelado através do TRNSYS (Chiasson e Spitler, 2000)

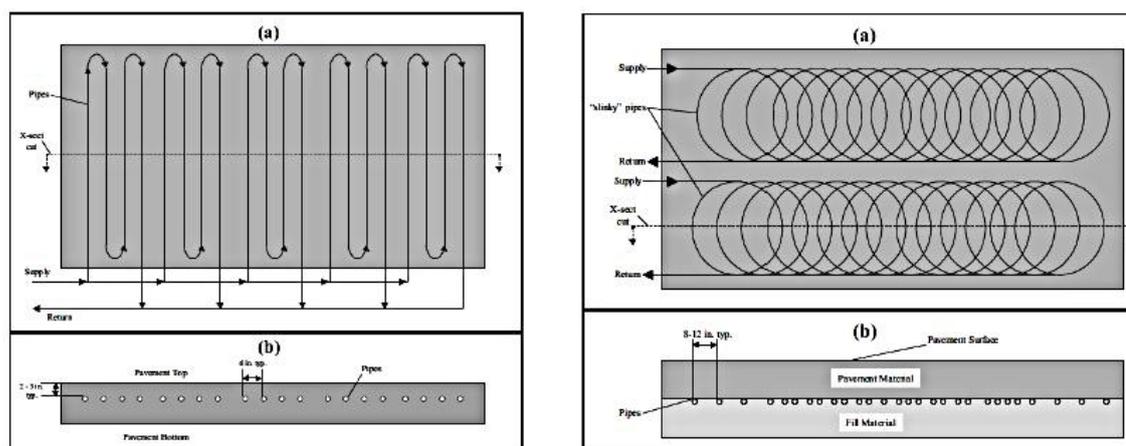


Figura 2.5 – Configuração em serpente (esquerda) e configuração slinky (direita) e os respectivos pavimentos (Chiasson e Spitler, 2000)

Sobre a mesma temática, Liu *et al.* (2007) desenvolveram um modelo matemático para a simulação dos processos térmicos de fusão da neve, estudo esse interessante para complementar os modelos mencionados anteriormente. Neste modelo foi possível prever as temperaturas da superfície, estudando o fluxo de calor ao longo das estações, bem como os dados meteorológicos. Modelando o sistema hidráulico no tabuleiro de uma ponte, demonstraram que o tempo para pré-aquecer o tabuleiro, juntamente com o espaçamento dos tubos de água, determina de forma direta o desempenho do processo de derretimento da neve e a temperatura máxima do fluido. Concluíram que a disposição dos tubos deste tipo de sistema deve ser baseada no cálculo da capacidade necessária do sistema de aquecimento, na

temperatura do fluido e na densidade do sistema de tubagem incorporado. Esta pesquisa demonstrou que para alcançar menores períodos de pré-aquecimento é necessário um arranjo mais denso das tubagens.

Estes modelos para aquecer os pavimentos foram testados por vários autores. O estudo experimental de Gao *et al.* (2010) foi também baseado num sistema com poços geotérmicos, estudando a influência do caudal do fluido e a densidade de tubos. Conclusões similares são extraídas do trabalho de Wu *et al.* (2011), que analisaram a resposta térmica dos pavimentos. Eles propuseram duas maneiras diferentes de captar a energia térmica: a primeira consiste em esperar até que a temperatura do pavimento chegue a uma temperatura limiar para começar a circulação do fluido; a segunda consiste em deixar que a circulação do fluido aconteça desde o início da experiência. Demonstraram que a primeira possibilidade é mais eficaz em relação à extração do calor, mas com esta estratégia o pavimento sofre mais variações de temperatura, que podem afetar a duração de vida do próprio pavimento.

A eficácia máxima atingida durante esta experiência é de 33,3%, a capacidade média da captação de energia é de 150-250 W/m² e a variação de temperatura da superfície atinge 19,35°C. Os autores deste estudo sugerem também a possibilidade de introduzir aditivos condutores nos pavimentos para melhorar o desempenho do coletor.

Os mesmos autores tinham realizado em 2009 um estudo experimental para comparar o desempenho do coletor solar num pavimento “clássico” e noutro onde lhe é adicionado pó de grafite. As condutividades térmicas foram 1,73 W/m.k para o pavimento “clássico” e 2,23 W/m.k para o que contém grafite. A experiência foi feita com uma energia de 1200 W/m² e um caudal de água de 600 ml/min e com a disposição de tubos como mostra a Figura 2.6.

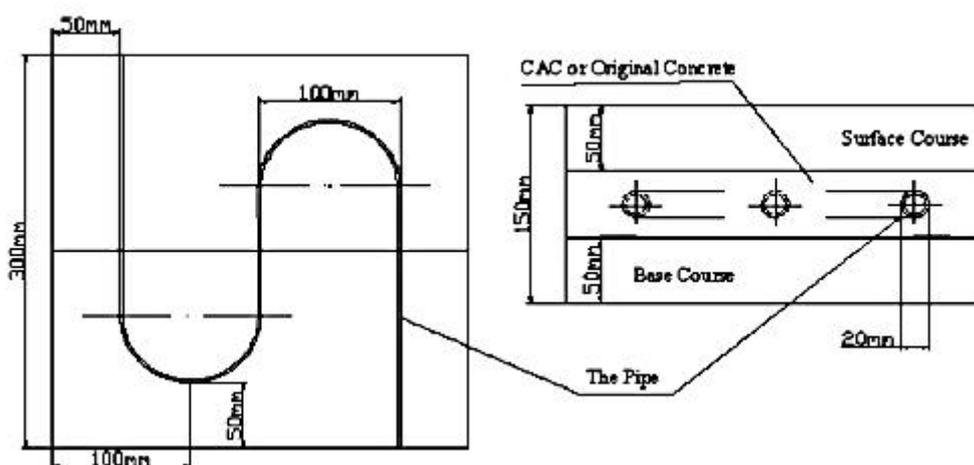


Figura 2.6 – Esquema da tubagem usada na experiência (Wu *et al.* 2009)

Os resultados mostram que existe uma diferença considerável de ganhos térmicos para o pavimento com o aditivo grafite e que esta diferença aumenta com o caudal (Figura 2.7).

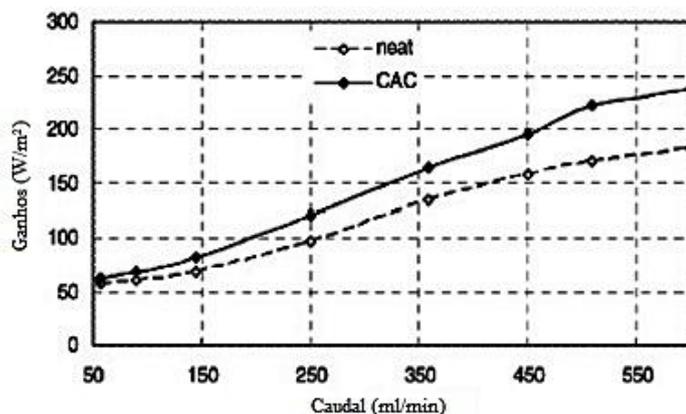


Figura 2.7 – Ganho de energia térmica em função do caudal do fluido (Wu *et al.* 2009)

Wang *et al.* (2010) realizaram um modelo através do método dos elementos finitos para prever a resposta térmica do sistema através do *software* de cálculo ANSYS. As conclusões deste estudo indicam a necessidade de estudar a relação entre o diâmetro dos tubos e o desempenho do sistema.

Conclusões idênticas são obtidas num estudo de Van Bijsterveld *et al.* (2007). O sistema deles é baseado num aquífero profundo no qual é armazenada água, quente ou fria, que é recuperada do pavimento no Verão ou no Inverno.

Este sistema é concebido principalmente para o descongelamento do pavimento e para o aumento da resistência ao fendilhamento, mas também para o aquecimento de edifícios. O sistema de referência utiliza uma distância entre os tubos de 300 mm, a uma profundidade de 70 mm, um diâmetro de tubo de 20 mm, um caudal de 0,07 l/s (252 l/h) e uma temperatura de entrada do fluido de 10°C. Várias simulações foram realizadas para provar a influência do caudal e da distância entre tubos. A Figura 2.8 mostra que, para caudais superiores a 0,15 l/s, a energia captada tem praticamente uma variação nula, logo não seria vantajoso utilizar caudais superiores 0,15 l/s.

A distância entre os tubos é um parâmetro igualmente importante, pois tem um peso elevado nos custos. Evidentemente, com uma distância maior, a capacidade em captar energia por m² diminui, mas a temperatura do fluido aumenta. E também, para uma distância menor, obtém-se uma temperatura menor, mas a distribuição da temperatura no interior do pavimento é mais homogênea. A mesma conclusão para a profundidade dos tubos, pois energeticamente seria mais interessante ter o sistema o mais próximo possível da superfície para extrair a potência máxima mas, do ponto de vista estrutural, a distribuição de temperatura no pavimento torna-se mais homogênea a uma profundidade mais significativa.

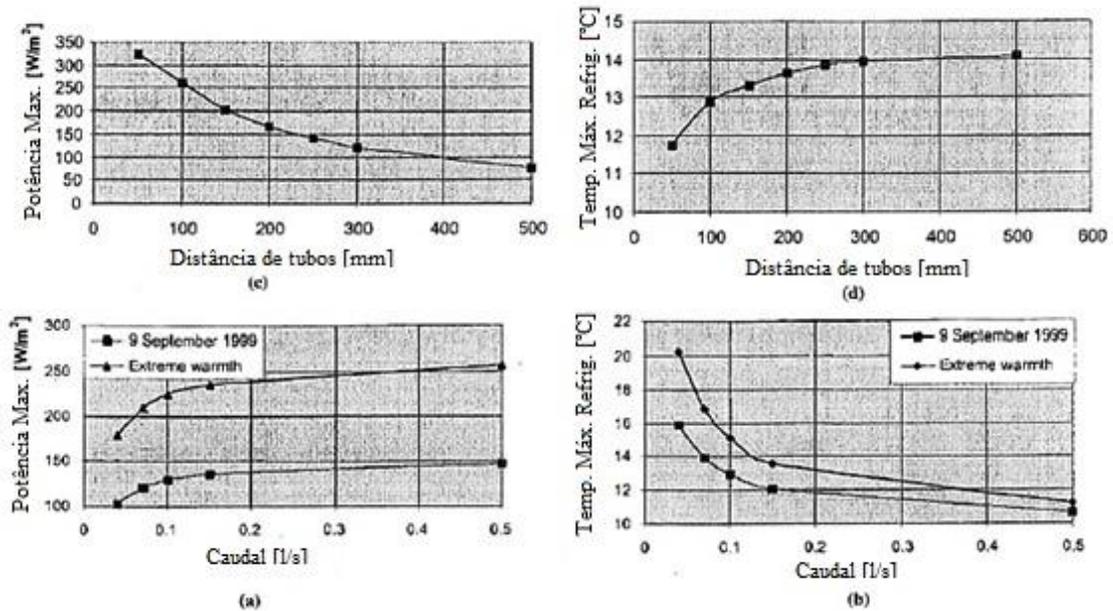


Figura 2.8 – Influência do caudal, da distância entre os tubos e a temperatura do fluido

2.2.2 Geradores Termoelétricos

Os geradores termoelétricos (TEGs) são sistemas que aproveitam o gradiente térmico existente nos pavimentos, convertendo essa energia térmica em energia elétrica.

Basicamente, estes dispositivos exploram a diferença de temperatura entre o leito do pavimento e a superfície do pavimento, proporcionando um potencial para a geração de eletricidade usando princípios termoelétricos. A grande desvantagem deste sistema é a sua baixa eficiência, algo que poderia ser melhorado utilizando novos materiais na sua produção.

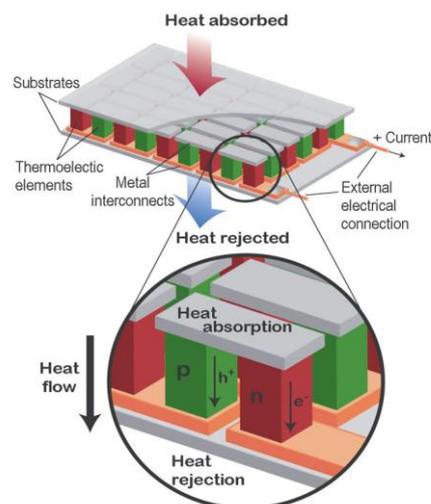


Figura 2.9 – Representação de um TEG

Wu *et al.* (2011) estudaram a aplicação destes módulos termoelétricos na superfície dos pavimentos e através de simulações tentaram otimizar o *design* do sistema. O aspecto mais importante para a eficiência do sistema reside na grande diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior do módulo termoelétrico. Eles propuseram que a ligação da parte inferior do módulo com o solo de fundação fosse feita recorrendo a materiais com uma elevada condutividade térmica, a fim de aumentar a eficiência na condução do calor e, assim, fazer com que se aumentasse a produção de energia elétrica.

Hasebe *et al.* (2006) desenvolveram um sistema de arrefecimento para o pavimento utilizando um gerador termoelétrico. A energia solar é recolhida por um sistema de tubagens de água por baixo do pavimento e arrefecida pela água do rio no gerador termoelétrico instalado. Eles descobriram que a energia gerada pela diferença de temperatura entre esses meios foi suficiente para o funcionamento da bomba que fazia deslocar a água pelas tubagens do sistema. As experiências laboratoriais demonstraram que, aumentando o caudal, a eficiência na produção de energia aumentava. Utilizaram a análise de elementos finitos para a simulação do sistema experimental e mostraram que a potência diminui durante o dia, atingindo o mínimo no momento em que a temperatura do rio atinge o seu máximo. Ambos os estudos revelaram uma baixa eficiência para alimentar alguns componentes elétricos e só instalando vários TEGs é que esta poderia ser aumentada.

2.2.3 Aplicações Fotovoltaicas

Investigadores do *Korea Institute* (Kang-Won *et al.*, 2010) também investigaram várias abordagens para a captura de energia solar a partir de pavimentos rodoviários. Para além do calor gerado no interior do próprio pavimento, também verificaram se é viável utilizar as atuais células solares ou tecnologias fotovoltaicas embutindo-as na infraestrutura do pavimento. No entanto, as atuais células solares de película fina aplicadas em pavimentos rodoviários, devido à fragilidade que apresentam, acabam por sofrer uma corrosão e um desgaste prematuro, pois estão sujeitas a grandes cargas e às condições do meio ambiente. Por esta razão, estes investigadores estão a desenvolver novas células solares de película fina que reúnam os requisitos para serem usadas nos pavimentos rodoviários.

Olhando para a potencial contribuição dos painéis fotovoltaicos (PV) para a geração de energia nas infraestruturas rodoviárias, as atuais barreiras acústicas podem ser substituídas por painéis fotovoltaicos, mantendo igualmente as funções das barreiras sonoras (Figura 2.10). Tem-se vindo a utilizar barreiras acústicas desde o final dos anos 90, especialmente nos atravessamentos de áreas densamente povoadas com um grande volume de tráfego e com velocidades de circulação elevadas.

Existem muitos estudos que quantificam o potencial do uso das barreiras sonoras com painéis

fotovoltaicos (PVNBs) nas infraestruturas rodoviárias e ferroviárias na Europa. Em seguida é efetuado um resumo desses estudos.



Figura 2.10 – PVNBs da *FAR Systems* instalados ao longo de uma via

Nordmann *et al.* (2004, 2005) examinou o potencial dos PVNBs em seis países Europeus. Com uma capacidade de geração de 800 MW e uma potência de 680 GWh de eletricidade por ano, as PVNBs podem tornar-se num aliciante contribuidor para o crescimento do mercado das energias renováveis, tendo em conta que a legislação europeia exige medidas de proteção acústica ao longo das infraestruturas ferroviárias e rodoviárias.

Grasseli *et al.* (2007) examinaram 6 configurações de PVNBs, de acordo com as limitações típicas para a aplicação em estradas, a fim de avaliar o seu desempenho acústico e energético. Os testes realizados permitiram analisar parâmetros tais como: plantas de construção adequadas; segurança em condições normais de operação e em condições de ocorrência de acidentes; rendimento energético e desempenho acústico; e avaliação da durabilidade e facilidade de manutenção. Os testes realizados mostraram que a fiabilidade do sistema PVNBs depende muito da sua manutenção. Observaram que o sobreaquecimento dos módulos fotovoltaicos, juntamente com a contaminação dos veículos, não deve ser menosprezado.

Shkrebtii *et al.* (2008) desenvolveram um modelo numérico para otimizar a eficiência fotovoltaica das células solares a-Si: H (amorfa-Si) com grelha de contato. O objetivo era averiguar as potenciais aplicações das células solares a-Si: H como elementos fotovoltaicos em barreiras sonoras. O que torna as células solares a-Si ideais para as barreiras sonoras é o seu baixo custo de produção e a sua alta eficiência.

Ao longo dos anos, os PVs têm sido utilizados numa pequena, mas considerável extensão, em parques de estacionamento e em infraestruturas rodoviárias de pequena importância. Golden *et al.* (2007) destacaram a implementação de painéis solares fotovoltaicos nas coberturas de parques de estacionamento de modo a atenuar o aquecimento nestas infraestruturas, moderando assim a oxidação e a volatilização e, conseqüentemente, a fissuração que ocorre em determinadas superfícies quando expostas diretamente ao sol e a altas temperaturas.

Na Holanda, o projeto *TNO - SolarRoad* utiliza as ciclovias holandesas para incorporar painéis solar. A TNO (2011), juntamente com a província de Noord-Holland, o *Avenhorn Ooms Group* e o *Imtech*, planejaram instalar em 2012 um projeto piloto que consistiu num sistema de ciclovias modular (TLC, 2011). A ciclovias (Figura 2.11) com um comprimento de 100 m é constituída por elementos de betão, coberto por uma camada superior de vidro. Debaixo da espessa camada de vidro temperado foram colocadas células solares de cristais de sílica juntamente com uma camada ótica. O objetivo deste teste piloto foi determinar qual a quantidade de energia produzida e armazenada e de que maneira as aplicações *smart ICT* permitem que a energia produzida em períodos de pico (horas de maior radiação) seja distribuída da forma mais eficiente possível para os períodos de pouca ou nenhuma luz solar.



Figura 2.11 – Representação do projeto *TNO - SolarRoad* na Holanda

A empresa espanhola *Onyx Solar*, fabricante de soluções solares, desenvolveu um sistema de pavimentos para vias pedonais que integra células fotovoltaicas e permite a geração de energia elétrica. Este sistema (Figura 2.12) é composto por painéis semitransparentes, fumados, com um revestimento antiderrapante de elevada durabilidade e resistência mecânica. Esta tecnologia foi criada em conjunto com a Universidade George Washington, tendo sido aplicada pela primeira vez ao longo de uma via pedonal entre dois edifícios daquela

Universidade, em Ashburn, Estados Unidos. No projeto piloto foram instalados 27 painéis na via pedonal, conseguindo uma produção total de 400 W, sendo energia suficiente para alimentar 450 lâmpadas LED utilizadas na iluminação noturna dessa via pedonal.



Figura 2.12 – Painéis solares da *Onyx Solar* implementados numa via pedonal nos Estados Unidos

Julie e Scott Brusaw (2012) propuseram um sistema de geração de energia elétrica através da luz solar para substituir as primeiras camadas dos pavimentos rodoviários, chamando-lhe *Solar Roadway* (SR, 2012). Em 2009 receberam um contrato da *Federal Highway Administration* (EUA) para construir o primeiro protótipo de painel solar aplicado num pavimento rodoviário.

O sistema *Solar Roadway* é constituído por uma série de painéis solares estruturalmente dimensionados para suportar as cargas dos veículos. A ideia é substituir as camadas do pavimento rodoviário, e de passeios. Cada painel individual consiste em três camadas: a superfície que estará em contato com os veículos, uma camada eletrônica e uma camada de base. A primeira camada, translúcida e de alta resistência, é suficientemente rugosa de forma a fornecer a aderência necessária aos pneus dos veículos (Figura 2.13). A luz solar passa através do coletor incorporado com células solares, diodos emissores de luz e um elemento de aquecimento. Contém um microprocessador com o apoio de um circuito para a deteção de cargas na área e de controlo do aquecimento. O microprocessador pode ainda controlar a iluminação e as comunicações visuais. A camada de base plana distribui a alimentação elétrica e os circuitos dos dados (telefone, TV, Internet) para edifícios residenciais, comerciais ou industriais ligadas ao sistema *Solar Roadway*.

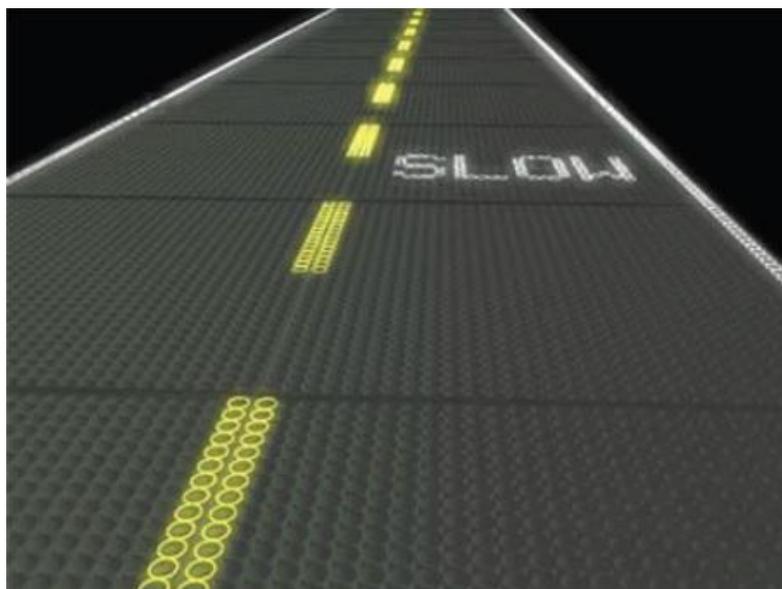


Figura 2.13 – Representação do sistema *Solar Roadway*

2.3 Aproveitamento da Energia Cinética e da Pressão dos Veículos

2.3.1 Sensores Piezoelétricos

Os sensores piezoelétricos geram energia quando expostos a alterações das suas dimensões, causadas por tensões mecânicas. Particularmente, a piezoeletricidade proporciona um conveniente efeito transdutor entre oscilações elétricas e mecânicas. Reversivelmente, um campo elétrico aplicado em materiais piezoelétricos produz tensão mecânica. Segundo Beeby *et al.* (2006), os materiais piezoelétricos estão abundantemente disponíveis em várias formas, nomeadamente em cristal (por exemplo, o quartzo), piezocerâmicos (por exemplo, o titanato zirconato de chumbo ou PZT), em película fina (por exemplo, *sputtered zinc oxide*), *screen printable thick-films* baseados em piezocerâmicos e materiais poliméricos e em polivinilideno (PVDF). Até agora, os materiais piezoelétricos foram alvos de pesquisa para o fabrico de *e-textiles* e *glove-based user interfaces* (Edmison *et al.*, 2002) ou para produção de energia a partir de vibrações de pequena escala. O tipo e a magnitude do estímulo aplicado determina o poder de produção energética. Mas na generalidade os piezomateriais apresentam uma ampla gama de produção de energia.

Edmison *et al.* (2002) afirmam que a deteção do tipo e magnitude do estímulo aplicado é de alguma forma limitada apenas pela sensibilidade da interface e de todas as variáveis exteriores que possam contribuir. Os pavimentos rodoviários ao longo de toda a sua vida útil podem suportar uma ampla gama de cargas provocando fadiga, tensão, deformação e vibração nas suas camadas, ou seja, energia provocada pelo trabalho realizado durante a passagem de

veículos (Zhao *et al.*, 2010). Portanto, aplicando sensores piezoelétricos nos pavimentos, estes têm potencial para captar a energia mecânica desperdiçada, bem como armazená-la através de condensadores (Figura 2.14). Esta técnica de captação de energia foi utilizada pela primeira vez para fornecer energia a redes de sensores sem fios, para gestão do tráfego e na monitorização do calor e das deformações/fissurações em superfícies de betão. A energia captada pode ser usada para aplicações rodoviárias de pequena escala, como sinalização, iluminação, publicidade, ou sinalização ferroviária.

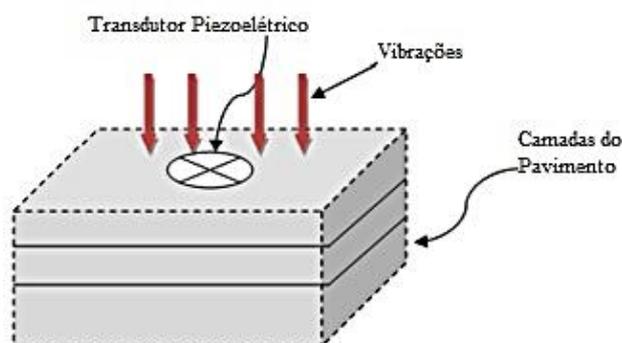


Figura 2.14 – Esquematização de um sensor piezoelétrico embutido num pavimento

Zhao *et al.* (2010) estudaram o desempenho do *Cymbal* (Figura 2.15), que é um transdutor piezoelétrico (um composto fino de PZT ou disco de zirconato titanato de chumbo e tampa de metal em ambos os lados do PZT) que pode ser aplicado em superfícies para monitorizar problemas como fissuras na fase inicial, relacionando o potencial de energia elétrica com os seus parâmetros geométricos, tais como a cavidade da profundidade, a espessura do PZT, a espessura da tampa de aço e o diâmetro da extremidade da tampa.

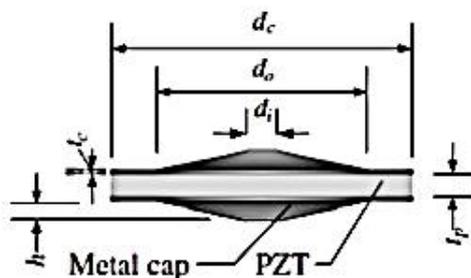


Figura 2.15 – Esquematização no plano vertical de um transdutor PZT (Zhao *et al.* 2010)

Os investigadores avaliaram a eficiência do sensor através do seu potencial elétrico e os seus efeitos de acoplamento com o pavimento. Assim, aumentando quer o diâmetro, quer a espessura do PZT e da tampa de aço, a energia potencial é aumentada, bem como o seu custo.

Utilizando um modelo de elementos finitos, conseguiu-se obter uma série de parâmetros geométricos que foram utilizados para projetar o transdutor embutido adequado na parte inferior da primeira camada do pavimento, de modo a gerar cerca de 98 V de potencial elétrico, com uma capacidade de armazenamento de 0,06 J. A sua potência máxima de saída é de cerca de 1,2 mW a 20 Hz de frequência de carga do veículo.

Wischke *et al.* (2011) estudaram a aplicação de sensores piezocerâmicos em túneis. Mostraram que as vibrações causadas pelo veículo em qualquer local ao longo do túnel (pavimento e estrutura de suporte de terras) eram demasiado pequenas devido às suspensões dos veículos. Observaram também que o potencial de captura de vibrações numa via ferroviária era muito maior. As medições de campo mostraram que pelo menos 135 μJ foram aproveitados na geração de energia elétrica em 85% dos casos de passagem de comboios. No entanto, deve-se salientar que o *design* moderno dos comboios e veículos incorpora amortecedores cada vez mais eficientes, de forma a melhorar o conforto da viagem, eliminando assim grande parte das vibrações.

Engenheiros Israelitas e a *Innowattech* desenvolveram uma tecnologia, designada por IPEG, focada na captura e conversão de tensão mecânica em corrente elétrica através de geradores piezoelétricos. Têm soluções para os peões, veículos e transportes ferroviários. Devido às dimensões e à forma dos sensores piezoelétricos IPEG, estes conseguem ser aplicados nas linhas ferroviárias na zona de fixação entre o carril e a travessa (Figura 2.16). Desta forma consegue-se monitorizar as velocidades e a localização de cada comboio, assegurando a ativação dos sistemas de segurança nas interseções entre as vias rodoviárias e ferroviárias, ao mesmo tempo que se gera energia para os próprios sistemas de segurança e sinalização ferroviária. Os IPEGs foram uma invenção pioneira na área da *Parasitic Energy* (Hanlon, 2008).

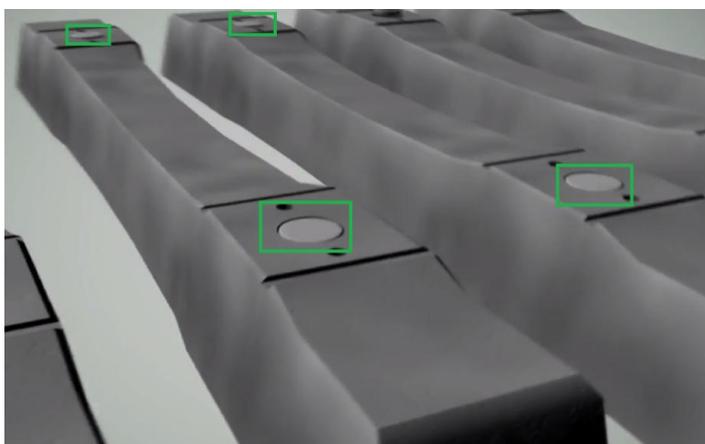


Figura 2.16 - Zona de aplicação dos sensores piezoelétricos da IPEG numa linha ferroviária

Em Inglaterra, surgiu em 2009 uma empresa que desenvolve sistemas piezoelétricos para aproveitar a energia do movimento dos peões, a *PAVEGEN Systems*. É uma das empresas com maior visibilidade mundial no ramo da microgeração de energia nos pavimentos. Já esteve envolvida, por exemplo, numa maratona em Paris, na hora do planeta Terra em Singapura e nos Jogos Olímpicos de Londres. Entidades particulares já investiram neste sistema cerca de 300 mil libras (364 mil euros).

O módulo da *PAVEGEN* (Figura 2.17) tem uma dimensão de $60 \times 45 \times 9.7$ cm³ e é composto por uma face superior feita a partir de 95% de material reciclável e uma base metálica capaz de resistir a 2 milhões de passos durante o seu período de vida. No topo, este sistema incorpora uma luz que é ativada quando alguém circula sobre o módulo, de forma a chamar a atenção do utilizador. Essa luz gasta cerca de 5% da energia produzida. Consegue produzir uma potência entre os 4 e os 8 W por cada passo, ou aproximadamente por cada segundo.



Figura 2.17 – Módulo piezoelétrico da *PAVEGEN Systems*

Em Portugal, através de um consórcio entre cinco entidades liderado pela Amorim Revestimentos, contando com a *Critical Materials*, *Amorim Cork Composites*, *IteCons* e *ECOCHOICE* como elementos principais, estão a desenvolver um projeto, com o nome *Active Floor*, com o objetivo de criar uma solução que permitirá transformar o chão numa plataforma funcional. A tecnologia de base é piezoelétrica e permitirá, além da geração de energia a partir do movimento sobre o pavimento, estabelecer uma plataforma para gerar informação que, devidamente processada, será a base da geração de novas funções, como identificação biométrica, determinação de caminhos mais percorridos, atuação de dispositivos e outras funcionalidades associadas.

2.3.2 Geradores Eletrocinéticos

Este tipo de sistema é o que vai ser apresentado e analisado no estudo de caso da presente dissertação, através dos resultados experimentais realizados pela *startup* Portuguesa *Waydip*, que desenvolve e estuda sistemas deste género.

Resumidamente, são tecnologias que aproveitam o peso e a velocidade do veículo, fazendo com que ocorra uma oscilação vertical da superfície em contacto com os pneus, ativando geradores localizados no interior do sistema, transformando assim a energia cinética em energia elétrica. Estes sistemas tanto podem ser instalados em pavimentos rodoviários como em pavimentos destinados apenas a peões e ciclistas, ou em pavimentos com função mista, ou seja, em passeadeiras.

A *Waydip*, para além de desenvolver o sistema *Waynergy Vehicles* (tecnologia abordada no caso de estudo), também desenvolve o sistema *Waynergy People* (Figura 2.18).



Figura 2.18 – *Waynergy People* da *Waydip* instalado na entrada da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior

O sistema *Waynergy People* é composto apenas por um gerador no seu interior e pode ser implementado através da associação em série de vários módulos (por exemplo, $1.0 \times 0.5 \times 0.16 \text{ m}^3$). Podem ser instalados em locais onde exista uma grande afluência de peões ou ciclistas, por exemplo, em passeios, em ciclovias, em estações de transporte coletivo, em centros comerciais e até em locais de diversão noturna.

A *Waydip* realizou um estudo piloto (Duarte *et al.*, 2013) apenas com um módulo, instalado na calçada da principal entrada da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior (UBI). Na Figura 2.19 apresenta-se a variação de energia consoante a velocidade do passo. Para uma pessoa com uma massa de 63 kg, é possível gerar uma energia de 0,15 J (passo

lento) e 0,88 J (salto). Mas o normal será conseguir produzir entre 0,60 a 0,62 J para passo normal e rápido, respetivamente. Relativamente à potência elétrica, os máximos variam entre os 1,8 W (passo lento) e 10,4 W (salto).

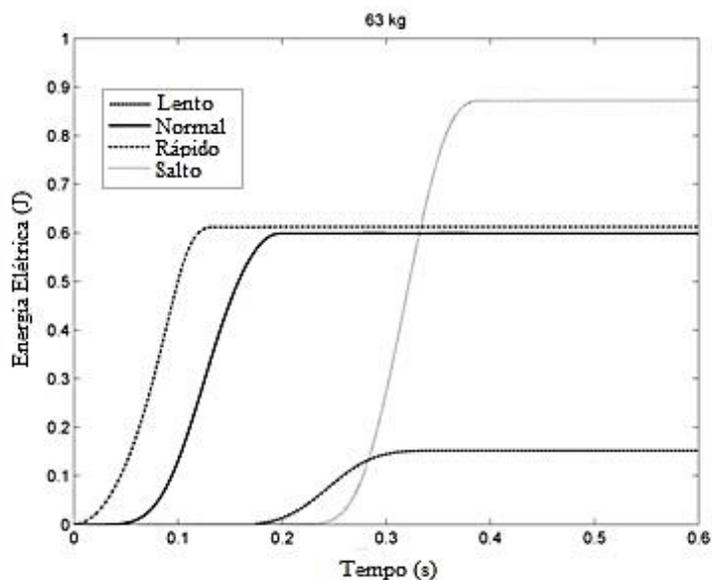


Figura 2.19 – Energia gerada por uma pessoa de 63 kg no *Waynergy People*

Para uma pessoa com uma massa de 75 kg (Figura 2.20), verificou-se que é possível produzir energia entre os 0,25 J (passo lento) e os 0,98 J (salto). Relativamente à potência elétrica, os máximos variam entre os 3,0 W (passo lento) e 11,4 W (salto).

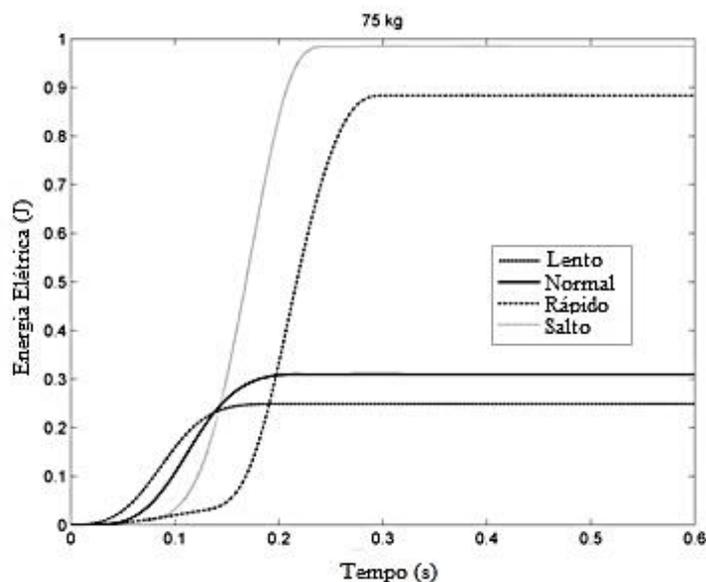


Figura 2.20 – Energia gerada por uma pessoa de 75 kg no *Waynergy People*

Comparando os resultados para as duas massas corporais analisadas, é possível concluir que o aumento de peso proporciona um aumento no máximo e no mínimo da energia produzida. Durante a hora de pico, entre as 9 e as 10 horas da manhã, foram medidos os passos de 675 pessoas, concluindo-se que durante esse período foi possível gerar um total de 525,0 J apenas com um módulo, o que corresponde a 0,15 Wh.

A empresa Americana *New Energy Technologies, Inc.* está a desenvolver um sistema idêntico ao da *Waydip*, mas apenas para veículos, chamado *Motion Power* (Figura 2.21).



Figura 2.21 – Sistema da *Motion Power*

Para um veículo de 1800 kg, a uma velocidade de 25 km/h, durante uma travagem de 6 segundos até parar sobre o *Motion Power*, a empresa prevê a geração de 44,0 J.

Para um veículo pesado de 14969 kg, com a mesma velocidade e com uma travagem de 10 segundos até parar, o sistema pode gerar cerca de 889,0 J.

Em Itália também estão a desenvolver um sistema idêntico aos mencionados anteriormente, mas aplicado numa lomba. É uma *startup* designada *Underground Power* (UP). No final de Junho de 2013 testaram duas lombas num estacionamento de um centro comercial em Milão (Figura 2.22). Durante a fase piloto verificaram que passavam sobre os dois sistemas um total de 8500 veículos por dia. Um investimento que custou cerca de 100 mil euros e onde os investigadores, após analisarem os resultados, esperam vir a ter o retorno financeiro após 7 anos de vida útil do sistema através da geração de 100000 kWh por ano.



Figura 2.22 – Lomba com sistema de geração de energia da UP

2.3.3 Geradores Hidráulicos

A empresa americana *Kinergy Power* também está a desenvolver um sistema de geração de energia elétrica através do aproveitamento do peso dos veículos e da sua velocidade de circulação. Esta tecnologia consiste num módulo que ocupa quase a largura total da via e que pode ser instalado em série, dependendo do comprimento do pavimento onde se pretende captar energia. Tem uma superfície plana composta por várias bandas independentes de maneira a conseguir acompanhar o deslocamento vertical para cada conjunto de pistões hidráulicos (Figura 2.23) localizados no perímetro do módulo.

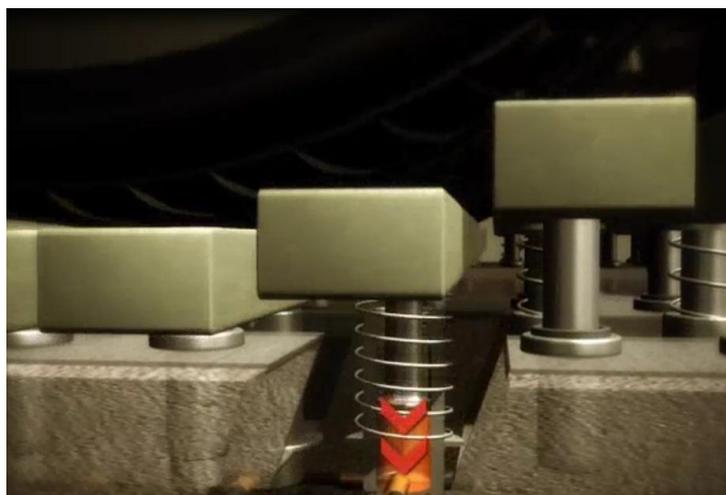


Figura 2.23 – Pormenor dos pistões hidráulicos da *Kinergy Power*

A *Kinergy Power*, numa configuração de 50 m de comprimento e 10000 veículos ligeiros, prevê uma geração de 51,0 kWh por dia.

Este sistema tem várias tipologias, com várias geometrias e formas para se adequar às variadas situações, como por exemplo, para lombas, para peões e para vias ferroviárias.

2.4 Aproveitamento da Energia Eólica

Mark Oberholzer (2006), vice-campeão na *Metropolis Next Generation Design Competition*, apresentou uma ideia que consistia em utilizar os separadores das infraestruturas rodoviárias com uma velocidade de circulação significativa, de forma a aproveitar o deslocamento do ar provocado pela passagem dos veículos. Para isso, teria que ser criado dentro dos separadores uma caixa livre para instalar várias micro turbinas de eixo vertical, conectadas a um eixo de transmissão, que por sua vez faria girar o veio do gerador (Figura 2.24). Este sistema teve o nome de *New Jersey Barrier*. Até à conclusão da presente dissertação, não foi possível verificar se esta ideia chegou a ser estudada.

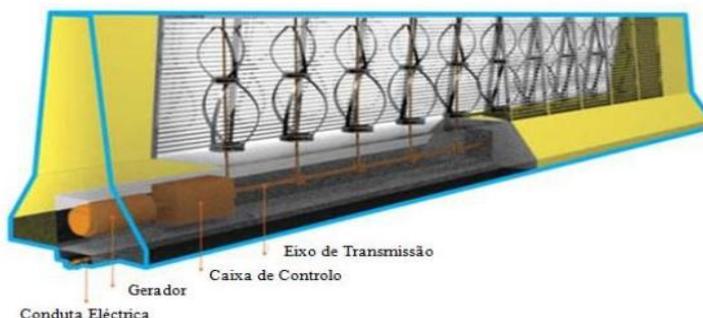


Figura 2.24 – Sistema *New Jersey Barrier* (Mark Oberholzer, 2006)

2.5 Considerações Finais

Um dos estudos realizados por Voigt *et al.* (2003) permitiu comparar a densidade de potência produzida para quatro tipos de técnicas de geração de energia (Figura 2.25). Em termos energéticos facilmente se percebe que, entre os quatro sistemas estudados, são os painéis fotovoltaicos que têm maior potencial para gerar energia elétrica. Mas essa eficiência energética depende das condições climáticas. Por exemplo, em períodos com ambiente nublado, os painéis fotovoltaicos geram menos energia do que o sistema piezoelétrico.

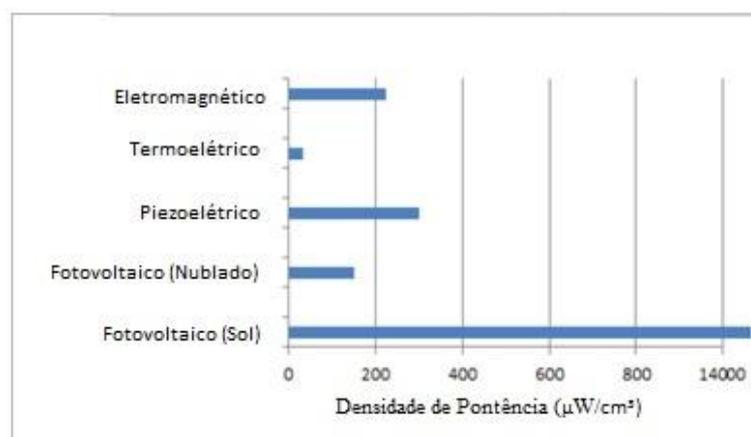


Figura 2.25 – Comparação da densidade de potência para quatro tipos de técnicas de geração de energia (Voigt *et al.*, 2003)

Para concluir a presente revisão da literatura de forma a comparar qualitativamente todas as técnicas de geração de energia renovável que foram referidas, apresenta-se o Quadro 2.3. As conclusões apresentadas baseiam-se na pesquisa que foi realizada.

Quadro 2.3 – Vantagens e desvantagens para cada tipo de sistema de geração de energia

Tipo de Sistema	Vantagens	Desvantagens
Coletor solar asfáltico	<ul style="list-style-type: none"> • Aquecimento de água para uso doméstico • Descongelamento dos Pavimentos • Aquecimento/arrefecimento Urbano • Aumenta o ciclo de vida do pavimento • Não necessita de produtos químicos para o descongelamento • Existência de muitos estudos • Diminui os consumos energéticos para arrefecimento/aquecimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil instalação do sistema • Não produz energia • Depende das condições climáticas • Custo de implementação elevado
Gerador termoelétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Produz energia suficiente para o funcionamento do sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Muito baixa produção de energia • Falta de estudos científicos • Tecnologia com baixo potencial
Painel fotovoltaico (PVNB)	<ul style="list-style-type: none"> • Sem limitações no uso do solo • Pode ser aplicado em grande escala • Incentivos da legislação Europeia • Produção razoável de energia 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende das condições climáticas • Depende das vias com necessidade de uso de barreiras sonoras • Eficiência depende das condições de limpeza e de manutenção
Painel fotovoltaico em pavimentos	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser aplicado em grande escala • Incentivos da legislação Europeia • Produção razoável de energia • Monitorização das marcas rodoviárias em tempo real • Monitorização do tráfego/peões/ciclistas 	<ul style="list-style-type: none"> • Possíveis problemas na aderência • Possíveis problemas na resistência para cargas elevadas • Depende das condições climáticas • Eficiência depende das condições de limpeza e de manutenção • Movimento sobre o sistema provoca período sem radiação solar

Quadro 2.4 – Vantagens e desvantagens para cada tipo de sistema de geração de energia (cont.)

Tipo de Sistema	Vantagens	Desvantagens
Sensores piezoelétricos	<ul style="list-style-type: none"> • Não depende das condições climáticas • Exploração da energia mecânica desperdiçada • Monitorização do tráfego/peões/ciclistas • Facilidade na instalação 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa produção de energia • Baixa área de influência/possibilidade dos veículos evitarem as "rodeiras" • Baixa resistência para grandes cargas • Produção de energia depende do número de veículos/peões • Produção de energia depende do valor da massa do veículos/peões
Gerador eletrocinético/hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> • Não depende das condições climáticas • Exploração da energia mecânica desperdiçada • Monitorização do tráfego/peões/ciclistas • Alta produção de energia • Elevada resistência para grandes cargas • Baixo custo de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades na instalação do sistema • Limitação no número de locais de implementação/zonas de desaceleração/baixas velocidades • Produção de energia depende do valor da massa do veículo/peão • Produção de energia depende do número de veículos/peões
Gerador eólico	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento da energia eólica devido ao deslocamento do ar provocado pela passagem dos veículos 	<ul style="list-style-type: none"> • Depende das velocidades de circulação • Limitação do número de locais de implementação/zonas com separadores centrais/barreiras • Falta de estudos científicos

3 CASO DE ESTUDO

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o sistema inovador de geração de energia nos pavimentos rodoviários da *Waydip*. Esta exposição do sistema conta com a análise dos resultados obtidos nos testes experimentais, bem como a aplicabilidade do mesmo do ponto de vista da Engenharia Civil, mais concretamente no âmbito logístico e económico. Este estudo apoia-se no local e na configuração do sistema piloto, implementado na cidade da Covilhã.

3.2 A *Waydip* e a Tecnologia *Waynergy Vehicles*

A *Waydip* é uma empresa *startup* que desenvolve projetos de I&D na área das energias renováveis. Foi fundada em Outubro de 2010, por dois antigos alunos de Engenharia Eletromecânica da UBI, Francisco Duarte e Filipe Casimiro. Esta *startup* da Covilhã conta já com três grandes prémios de inovação, com o projeto de lançamento *Waynergy*. Esta tecnologia inovadora transforma a energia cinética de um corpo em energia elétrica, através de sistemas eletromecânicos robustos embutidos nos pavimentos pedonais (*Waynergy People*) e rodoviários (*Waynergy Vehicles*). Ambas as tecnologias já se encontram patenteadas.

A *Waynergy Vehicles* consiste num sistema que converte o deslocamento linear de uma superfície accionada por um veículo num movimento rotacional, fazendo atuar componentes eletromagnéticos que geram energia elétrica. Consoante o que se pretende e se necessita, através da junção de vários módulos de por exemplo, 69 x 76 cm² com 23 cm de altura, prevê-se que cada módulo consiga produzir cerca de 50 J, por cada roda de um veículo de 2000 kg. A quantidade de energia gerada depende de vários fatores, nomeadamente do peso próprio do veículo, da velocidade de passagem sobre os módulos, e se existe ou não travagem em cima dos módulos capaz de gerar uma maior pressão sobre o sistema. Estas variáveis serão estudadas na análise dos resultados experimentais para se compreender até que ponto podem estas influenciar a quantidade de energia gerada nos módulos.

Existe a possibilidade de ter entre um a quatro geradores em cada módulo. Esta flexibilidade de construção tem em vista a necessidade de adequar os módulos ao tipo de utilização que se pretende e à quantidade de energia que se espera gerar, bem como ao tipo de investimento que se pretende realizar. No que diz respeito ao tipo de utilização, os módulos com apenas um gerador são destinados a gerar energia em situações onde existe partilha do mesmo espaço

(pavimento) entre o veículo e o peão, como por exemplo em passarelas. Uma configuração de dois a quatro geradores destina-se exclusivamente a veículos, onde o excesso da carga é aproveitada para gerar mais energia acionando os vários geradores.

Observando a Figura 3.1, o funcionamento deste sistema depende da oscilação da superfície (1) que faz acionar um sistema eletromecânico fixo na sua base inferior. A superfície móvel (1) é a parte superior, estando no mesmo patamar que o restante pavimento, passando esta a ser a superfície do pavimento com a qual as pessoas e/ou veículos estarão em contacto, tendo um movimento linear (no eixo vertical) quando uma carga for exercida sobre a mesma. Para garantir o movimento linear na superfície são utilizados componentes mecânicos de deslocamento linear que mantêm a superfície sempre numa posição horizontal, independentemente do ponto de aplicação da carga sobre esta. Assim, a carga que se desloca sobre a superfície será sempre aplicada de igual forma no sistema mecânico, permitindo uma maior durabilidade do sistema, pois o movimento irá ser sempre homogêneo, não havendo distribuições de cargas diferentes sobre o sistema mecânico de ligação ao veio do gerador (2) em função do ponto de aplicação das mesmas.

O movimento linear da superfície (1) irá acionar uma alavanca (5) no ponto (8), estando a alavanca fixa numa das extremidades e em contacto com uma engrenagem (4) na outra extremidade. Ao ser aplicada a carga no ponto (8), esta irá provocar um pequeno deslocamento nesse ponto que é convertido para um deslocamento maior na zona de contacto da alavanca com a engrenagem (4), maximizando o movimento rotacional desta. Por sua vez, a engrenagem (4) está ligada a uma caixa de engrenagens, existindo uma determinada relação de transmissão (multiplicação) entre elas, o que faz com que as rotações na engrenagem (4) sejam ampliadas para um número maior de rotações à saída da caixa de engrenagens, a qual está ligada ao veio do gerador (2). Consegue-se assim converter um pequeno movimento linear num movimento de rotação que, em função da velocidade com que a superfície (1) se desloca para baixo, pode conferir velocidades elevadas no veio do gerador (2). A caixa de engrenagens possui ainda um sistema de roda livre (9) na sua ligação com o veio do gerador, que faz com que, quando a alavanca (5) é pressionada para baixo, o veio seja acionado no sentido horário, e quando esta volta para cima por ação de uma mola (7), o veio não seja acionado no sentido contrário, o que possibilita que o movimento não tenha uma ação contrária que iria diminuir o tempo de rotação do veio do gerador (2) e, conseqüentemente, a quantidade de energia gerada. Deste modo, consegue-se que o veio fique mais tempo em rotação, mesmo após a carga deixar de ser aplicada sobre a superfície (1).

Para que a superfície móvel (1) volte à sua posição inicial são também utilizadas molas de compressão (11) distribuídas pelos quatro cantos do bloco. Para prolongar a continuidade do movimento é ainda utilizada uma roda de inércia (3) acoplada ao veio do gerador. Quanto ao gerador (2), este pode ser de dois tipos, eletromagnético (geração de corrente alternada) ou

gerador de corrente contínua. Em ambos os casos é utilizado um circuito eletrônico de controlo e regulação do carregamento dos sistemas de armazenamento (supercondensados e baterias).

Optou-se pela ilustração de um módulo com 2 geradores, pois foi esta a configuração adotada no teste piloto, mas ambas as configurações funcionam de forma idêntica.

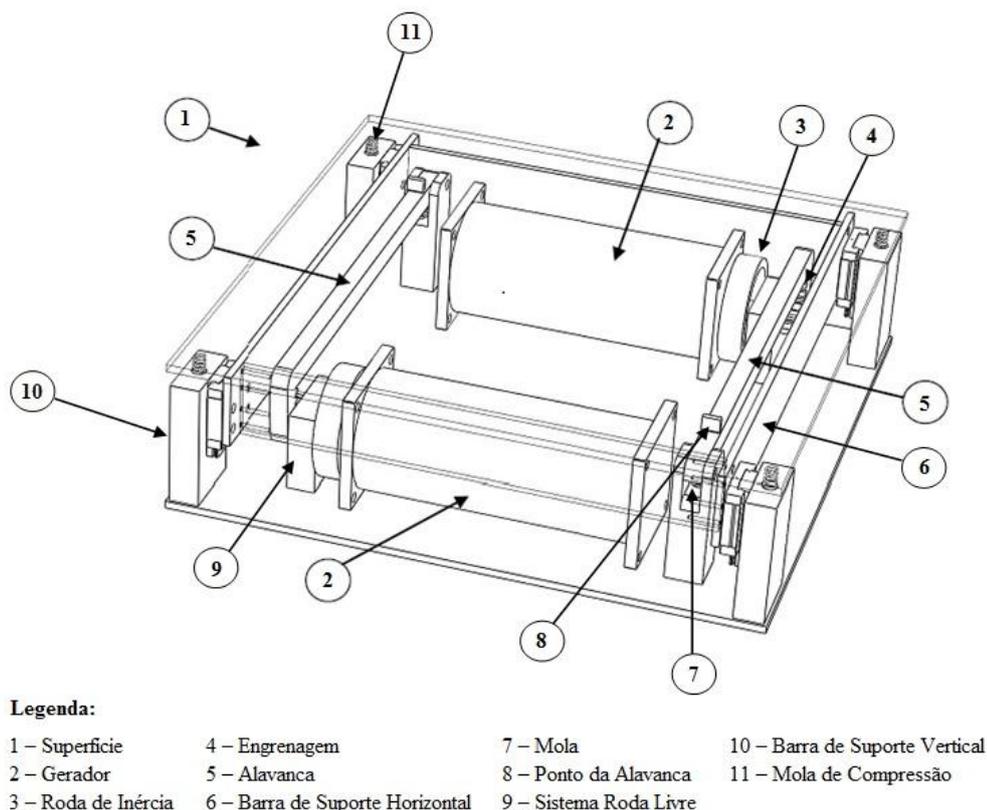


Figura 3.1 – Esquema de funcionamento da tecnologia *Waynergy Vehicles*

3.3 Análise dos Resultados Experimentais

A *Waydip* através de testes experimentais nos quais fez variar as componentes do sistema elétrico, nomeadamente o número de geradores, resistências e condensadores, chegou à conclusão que a melhor configuração do sistema elétrico teria que ser composto por dois geradores, uma resistência e dois condensadores. Todos os resultados analisados que se seguem são apenas os resultados para esta configuração elétrica, centrando-se no valor que realmente tem maior interesse, a energia gerada.

Para chegarem às conclusões anteriormente descritas, fizeram variar o peso próprio do veículo, a velocidade de passagem sobre os módulos, a altura que permitiam que a superfície descesse, e a forma da superfície. A análise destas variáveis, no que diz respeito à engenharia civil, são importantes na medida em que permitem ajudar no estudo do local onde os módulos devem ser instalados de forma a tirar maior rentabilidade dos mesmos.

Numa primeira análise serão unicamente estudadas as diferenças que ocorrem se se optar por deixar a placa descer 5 mm, 10 mm ou 15 mm, apenas para um veículo com um peso que se considera estar entre os valores médios, 1350 kg. Como se pode observar na Figura 3.2, para um deslocamento de 5 mm, a energia gerada aumenta com o aumento da velocidade de circulação sobre os módulos, com variações entre 52 e 60 J. Isto acontece também para veículos com um peso de 900 kg e de 2000 kg, com a particularidade de não existirem diferenças de energia entre as velocidades de 10 e 20 km/h e de 30 e 40 km/h. Para veículos de 5000 kg, a gama de velocidades entre os 20 e os 60 km/h geram sensivelmente a mesma energia.

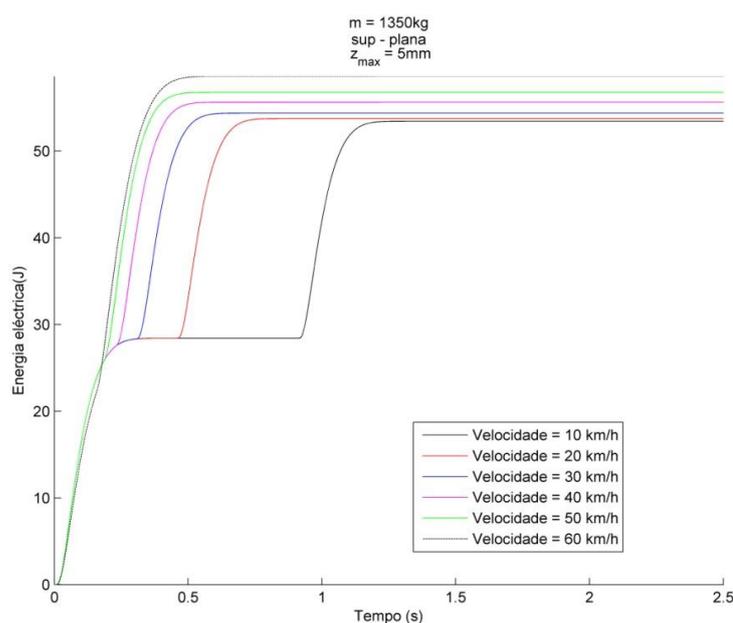


Figura 3.2 – Energia gerada com um deslocamento de 5 mm

Quando a variação da placa é de 10 mm (Figura 3.3), tem-se a vantagem de se conseguir gerar mais energia (entre 88 e 92 J) e com as velocidades capazes de gerar essa energia mais próximas umas das outras. Para velocidades de 40 e 60 km/h consegue-se gerar cerca de 92 J, e para velocidades de 30 e 50 km/h cerca de 88 J.

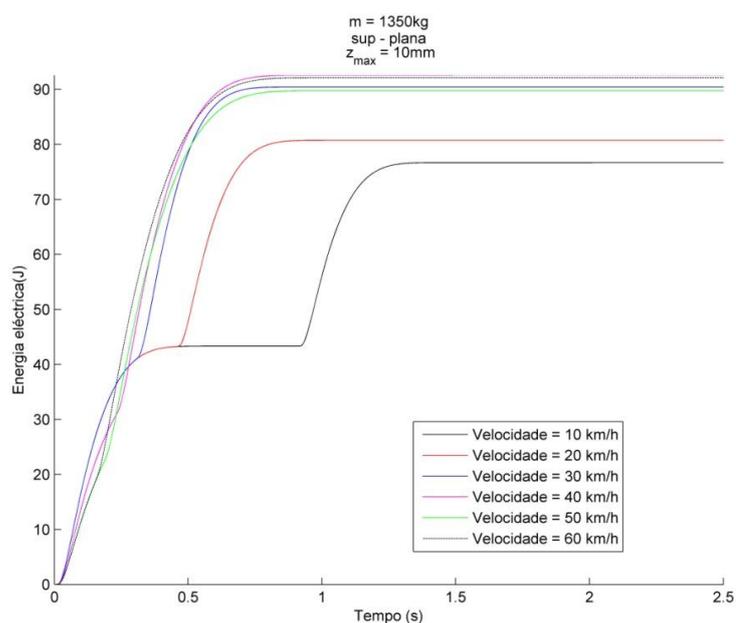


Figura 3.3 – Energia gerada com um deslocamento de 10 mm

Em comparação com o deslocamento de 10 mm, quando é permitido à placa descer até aos 15 mm (Figura 3.4), o máximo que se consegue gerar de energia é de 98 J, uma diferença no pico máximo de 6 J. O que se pode observar é que passando de 5 para 10 mm, a variação é efetivamente compensatória. Quando se passa de 10 para 15 mm esse aumento já é menor, ou seja, se a placa descer mais deixa de compensar, até por questões de segurança e conforto dos condutores.

Comparando as diferenças de energia e as velocidades entre o caso de deslocamento de 10 e 15 mm, neste último caso, para uma velocidade de 50 km/h gera-se 98 J, enquanto que no primeiro caso desse gera 88 J. Para uma velocidade de 20, 30 e 40 km/h, a energia gerada é aproximadamente a mesma. Para a velocidade de 10 km/h a mudança para 15 mm é compensatória em 3 J, enquanto para os 60 km/h ocorre o oposto, é prejudicial em 3 J.

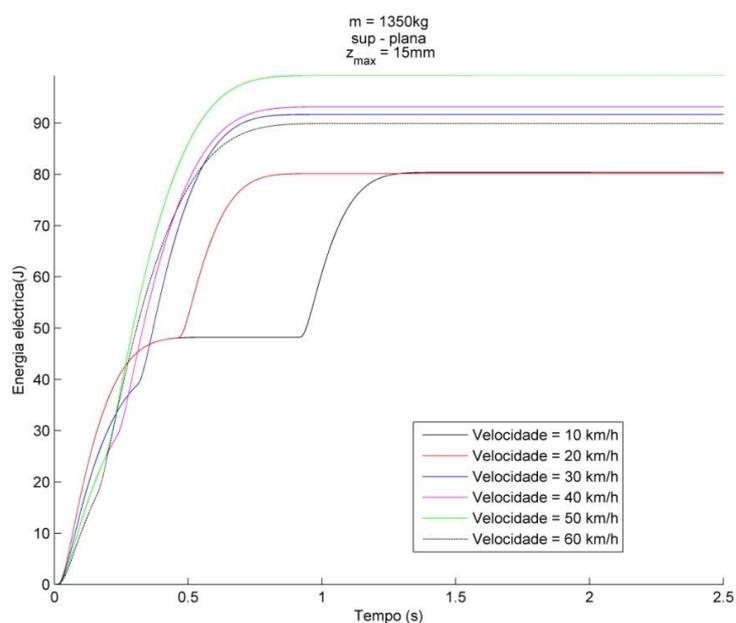


Figura 3.4 – Energia gerada com um deslocamento de 15 mm

Por uma questão de limitação das páginas, na presente dissertação, não serão apresentados os gráficos de comparação entre os deslocamentos para veículos com o peso de 900, 2000 e 5000 kg, mas pode-se afirmar que em ambos os casos a opção mais vantajosa é o deslocamento da placa até os 15 mm. Para um veículo de 900 kg, simulando um veículo de dois lugares, o facto de a placa descer até aos 15 mm faz com que em todas as velocidades se gere mais energia do que no caso de só descer 10 mm. Quando a massa que se desloca sobre o módulo é de 2000 kg, simulando um veículo familiar com uma ocupação considerável, para uma variação de 15 mm, todas as velocidades geram mais energia do que no caso de apenas descer 10 mm, exceto para a velocidade de 10 km/h que se mantém igual. No caso de o peso se aproximar ao de um veículo pesado (5000 kg), também para todas as velocidades a energia gerada é superior para o caso de a placa se deslocar até aos 15 mm.

Conclui-se que o ideal seria optar por permitir que a placa desça até aos 15 mm, pois geralmente em todas as velocidades para as diferentes massas, a energia gerada é maior quando comparado com o deslocamento de 10 mm da placa. No caso de um veículo de 1350 Kg, tendo em conta que se idealiza que este sistema deva ser implementado numa zona de desaceleração, o facto de gerar menos energia para uma velocidade de 60 km/h, não é preocupante.

Não era necessário ultrapassar os 15 mm, pois para 20 mm estima-se que a variação dos valores gerados de energia seja muito reduzida, não compensando essa diferença de deslocamento, e também por questões de segurança e conforto dos condutores.

Na análise que se segue faz-se variar os diferentes pesos dos veículos relacionando-os com as velocidades de passagem sobre os módulos, para uma configuração que se aproxima do sistema piloto implementado na Covilhã, ou seja, para um deslocamento de 15 mm (no sistema piloto foi usado 12 mm) e com a superfície plana.

Quando um veículo com um peso de 900 kg (Figura 3.5) se desloca sobre o sistema, a energia máxima que este consegue gerar é de 72 J. Este valor corresponde a uma velocidade de 40 km/h. Para velocidades de 30, 50 e 60 km/h, cada módulo gera 70 J. Para velocidades baixas, entre 10 e 20 km/h, a energia produzida é substancialmente menor.

É de realçar que, nas Figuras que se têm vindo a analisar, o acréscimo repentino que ocorre depois de a energia gerada estagnar é devido à passagem da segunda roda do veículo sobre o sistema. Essa variação nota-se mais para uma velocidade baixa, pois o intervalo de tempo entre a passagem dos eixos do veículo é maior nessa situação. Observando para uma velocidade de 10 km/h, na passagem da primeira roda sobre o sistema, o eixo do gerador é impulsionado até atingir o máximo de rotações que lhe foi possível, que corresponde a 36 J, e com a passagem da segunda roda existe um acréscimo de 22 J, gerando no total 58 J por cada módulo. Esta diferença está apenas associada à distribuição de cargas que existe sobre os eixos das rodas, ou seja, a roda da frente, devido à distribuição de cargas do veículo, transmite uma força maior ao pavimento do que a roda traseira. Prevê-se que a passagem de um segundo veículo logo a seguir ao primeiro, com as mesmas características do primeiro, consiga gerar um pouco mais do que o primeiro. Se o tempo de passagem do segundo veículo for suficientemente grande de modo a que o veio do gerador pare de girar, este vai gerar uma energia igual à do primeiro.

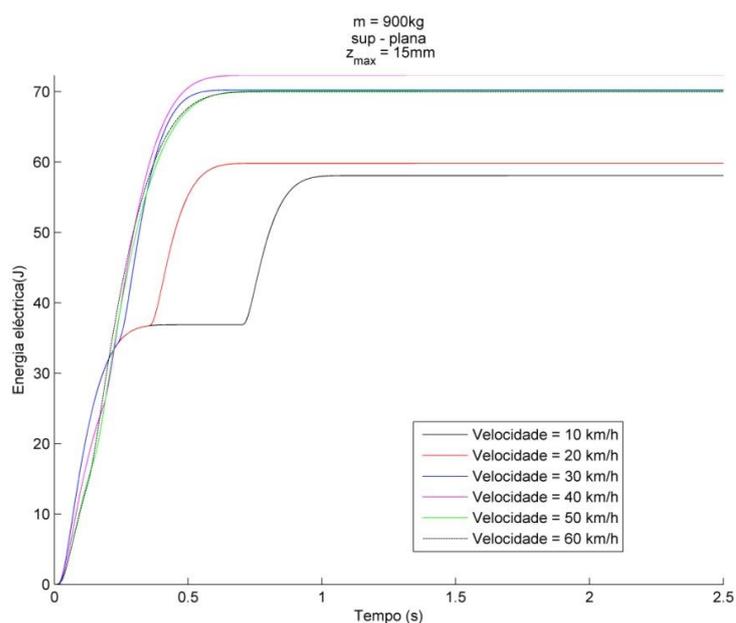


Figura 3.5 – Energia gerada por um veículo de 900 kg

Para um veículo de 1350 kg (Figura 3.4), a maior rentabilidade que se consegue atingir é de 98 J, a uma velocidade de 50 km/h. Para uma velocidade de 40 km/h, o sistema gera 93 J. Para as restantes velocidades analisadas o sistema gera sempre valores inferiores de energia. É de notar que, por volta do peso de 1350 kg, a partir de uma determinada velocidade, próxima dos 50 km/h, a energia gerada não aumenta com o aumento da velocidade.

Aumentando o peso do veículo para 2000 kg (Figura 3.6), com a sua passagem consegue-se obter um máximo de 196 J, quando este circula a 40 km/h. Nas restantes velocidades (exceto a 10 km/h), os valores diminuem até cerca de 188 J. Uma variação negativa de 8 J, o que faz com que a preocupação em definir um local dos módulos para um veículo com esta massa não seja relevante, pois os valores de energia produzida são muito próximos.

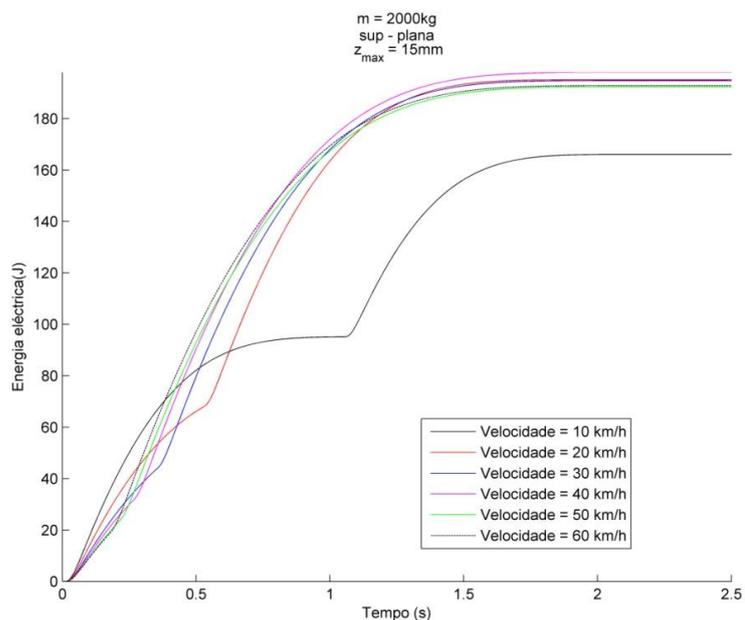


Figura 3.6 – Energia gerada por um veículo de 2000 kg

Para um valor que se aproxima do peso de um veículo pesado, 5000 kg (Figura 3.7), os módulos geram sensivelmente o mesmo valor de 428 J, para velocidades entre os 20 e os 40 km/h. Para velocidades maiores, a diferença já é substancialmente maior.

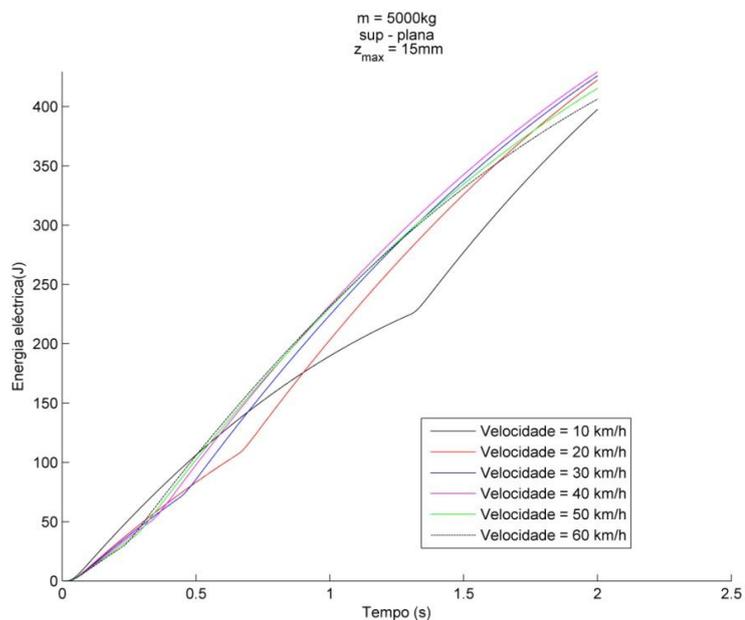


Figura 3.7 – Energia gerada por um veículo de 5000 kg

Como se foi observando durante a análise dos resultados, quanto maior for a carga aplicada sobre os módulos, maior será a energia gerada. Mas essas diferenças na geração de energia não estão relacionadas com o deslocamento, pois para ambos os pesos a placa tem sempre um deslocamento de 15 mm. Esse acréscimo de energia gerada está relacionado com a velocidade do deslocamento, ou seja, quanto maior for a carga, maior será a velocidade com que a superfície se desloca para baixo, e conseqüentemente maior será o número de rotações por minuto do veio do gerador, gerando assim mais energia. Tendo em conta apenas os valores máximos da energia gerada para cada peso, independentemente da velocidade, o aumento da energia gerada não é proporcional ao aumento do peso (Figura 3.8). Passando de 900 kg para 1350 kg, que representa um aumento de 50% em termos de peso, a diferença da energia máxima gerada é de 26 J. Aumentando o peso de 1350 kg para 2000 kg, que corresponde também sensivelmente a um aumento de 50% em termos de peso, a diferença da energia máxima gerada é de 98 J.

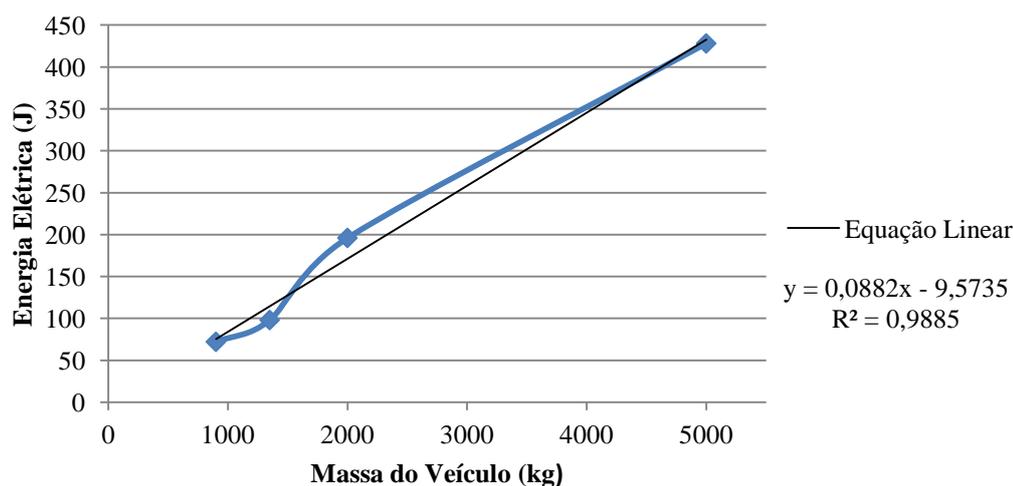


Figura 3.8 – Evolução da maior energia gerada com o aumento da massa

Analisando as diferenças entre as velocidades que correspondem à maior energia gerada, (Figura 3.9), apenas para o intervalo de peso dos veículos que são mais frequentes de se deslocarem em zonas urbanas, nota-se de uma maneira geral e com os resultados disponíveis que, para valores entre os 1000 e 1650 kg, a velocidade capaz de gerar mais energia é a de 50 km/h. Estima-se que a grande maioria dos veículos nos dias de hoje e com uma ocupação muito baixa, situa-se dentro desse intervalo (1000 a 1650 kg). Para veículos com 5000 kg, ou seja, entrando na tipologia dos veículos pesados, as velocidades que geram mais energia têm que ser inferiores a 50 km/h, mas superiores a 10 km/h. O que é benéfico, pois se os sistemas forem colocados em zonas urbanas onde os veículos ligeiros circulem por volta dos 50 km/h, os veículos pesados nessas zonas têm tendência a circular a velocidades mais baixas.

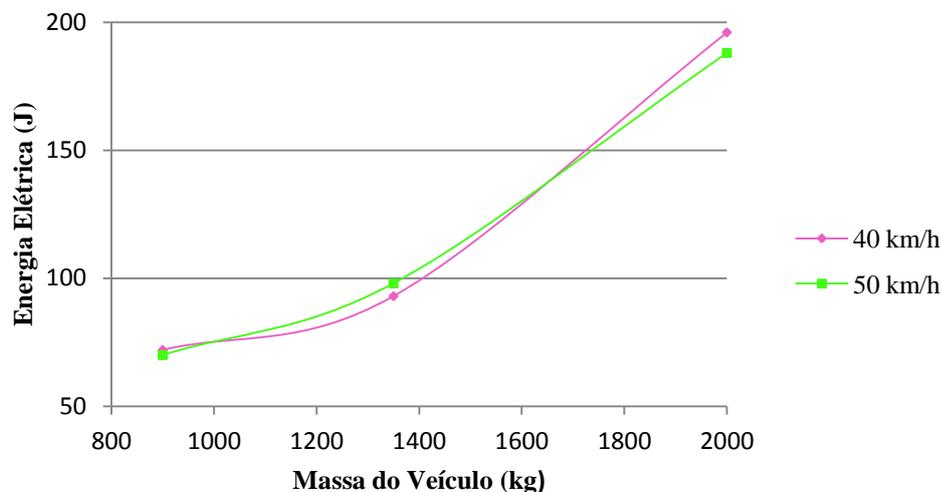


Figura 3.9 – Comparação da energia gerada entre os 40 e os 50 km/h para os veículos ligeiros

De forma a concluir a presente análise, foi-se comparar de forma quantitativa as diferenças de energia gerada para cada peso do veículo e para cada velocidade (Quadro 3.1), excluindo a de 10 km/h, que é unanimemente a velocidade que confere uma menor produtividade ao sistema.

Quadro 3.1 – Comparação da energia gerada para diferentes massas e respectivas velocidades

	Velocidade (km/h)				
	20	30	40	50	60
900	60	70	72	70	70
1350	80	92	93	98	90
2000	193	193	196	188	188
5000	421	423	428	412	403

Observando o Quadro 3.2 onde se fez a diferença entre o máximo e as restantes energias geradas para cada massa e velocidade, percebe-se que o local ótimo onde este sistema deve ser implementado é em zonas onde a circulação real dos veículos varie entre os 30 e os 50 km/h. No caso dos veículos pesados, nota-se que a uma velocidade de passagem de 50 km/h, a diferença já é bastante considerável, mas não é preocupante, pois em zonas de desaceleração onde os veículos ligeiros circulam a 50 km/h, os veículos pesados têm tendência a circular a velocidades menores. Para veículos com menor massa (900 e 1350 kg), que circulam a velocidades inferiores a 30 km/h, o sistema sofre uma maior diminuição na produtividade, em comparação com o que acontece com os veículos mais pesados (2000 e 5000 kg). Para velocidades superiores a 50 km/h, são os veículos com maior peso que conferem uma menor produtividade ao sistema.

Quadro 3.2 – Diferença entre a máxima energia gerada e as restantes energias para cada velocidade

		Velocidade (km/h)				
		20	30	40	50	60
Massa (kg)	900	12	2	0	2	2
	1350	18	6	5	0	8
	2000	3	3	0	8	8
	5000	7	5	0	16	25

3.4 Revestimento da Superfície do Módulo

O revestimento para a placa de alumínio, que vai estar em contacto com os pneus dos veículos, é uma das componentes dos módulos que no futuro terá que ser estudada experimentalmente para se encontrar uma solução capaz de garantir segurança ao condutor e total aplicabilidade às condições impostas pelas características do tráfego e da via.

Até agora, a *Waydip* já testou vários tipos de materiais para revestir as placas dos módulos mas nenhum dos materiais analisados foi de encontro ao pretendido. Nos testes experimentais analisaram uma mistura com aglomerados da 3M, que é normalmente utilizada nas juntas de dilatação e para tratar o fendilhamento do pavimento, mas era uma solução com um custo muito elevado. Experimentaram outra solução de uma tinta branca da Sociedade Nacional de Sinalização Vertical (SNSV), mas verificaram que ao longo do tempo a tinta desgastava-se facilmente, e não era de todo uma alternativa viável, pois a aderência ainda não era adequada. Depois destes testes, experimentaram uma outra forma de revestir a superfície de alumínio dos módulos, que consistiu na fixação de uma *speed bump* (lomba redutora de velocidade) da 3M na placa de alumínio. Como se pode observar nos resultados experimentais, comparando o mesmo veículo a circular sobre os módulos numa superfície plana (Figura 3.4), e noutra com uma superfície côncava (Figura 3.10), verifica-se de um modo geral que com uma lomba o sistema pode gerar mais energia do que com uma superfície plana. Com uma superfície côncava o sistema gera mais energia para velocidades entre os 30 e os 40 km/h. Com uma superfície plana o sistema gera mais energia para velocidades entre os 30 e os 50 km/h. Para cobrir toda a superfície da placa é necessário uma lomba com uma base de 90 cm, o que corresponde a uma lomba de 5 cm de altura, segundo as lombas da 3M. Com estas características, a maior parte dos condutores, perante tal obstáculo físico, abrandam a velocidade para valores entre os 20 e os 30 km/h, que corresponde a energias entre os 90 e 108 J. Já no sistema com uma superfície plana, dependendo do local onde seja implementado, existe um maior intervalo de velocidades (entre os 30 e os 60 km/h) que os veículos podem passar de forma a gerar também uma energia considerável (entre 91 a 98 J). Nesta

comparação entre os dois tipos de superfícies, optou-se por um veículo de 1350 kg, pois dentro dos resultados experimentais era o que se enquadrava melhor ao peso médio de um veículo e respetivos ocupantes.

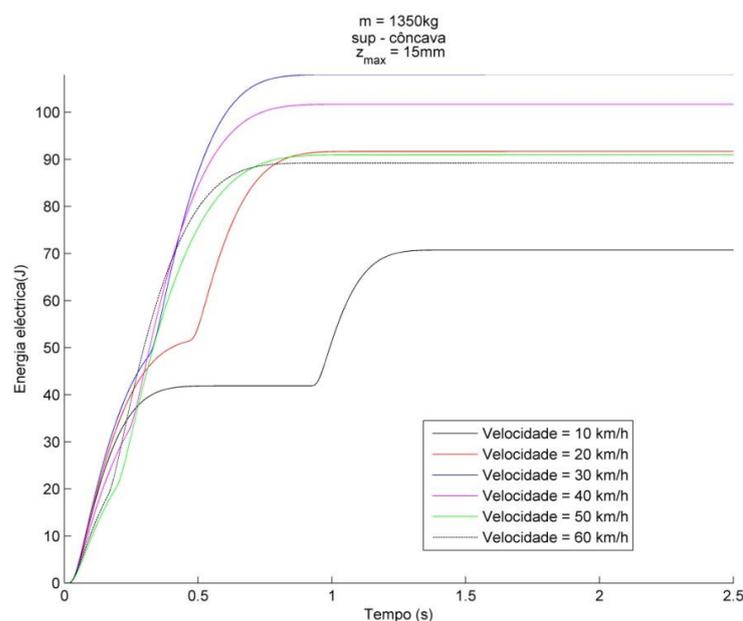


Figura 3.10 – Energia gerada com uma superfície côncava por uma massa de 1350 kg

Mas o revestimento da placa recorrendo a uma lomba tem várias implicações. Numa superfície deste tipo no instante inicial, quando ocorre o impacto entre o pneu do veículo e a face inclinada da lomba, vai provocar forças no sentido do movimento tangenciais ao pavimento. Estas forças vão provocar esforços para os quais a estrutura mecânica não está dimensionada, surgindo vibrações que podem colocar em causa a durabilidade do sistema. Um dimensionamento mais robusto provocaria um aumento do peso das peças que constituem o sistema, o que fazia com que este precisasse de maior força para rodar os geradores e para além disso, aumentaria o custo de produção dos módulos.

O material que constitui este tipo de lombas tem um módulo de deformabilidade baixo, ou seja, irá absorver parte da energia. Em termos de fixação aos módulos, seria necessário cortar as lombas de maneira a que se criasse uma folga para esta poder acompanhar a placa durante a variação de altura.

Para um sistema em que a sua rentabilidade depende da quantidade de veículos que por ele se deslocam, um revestimento com uma lomba limitaria muito a escolha do local, pois a aplicabilidade das lombas depende da velocidade de circulação permitida, da distância de uma intersecção, do tipo e das funções da via, da distância de uma passagem de peões, de uma ponte ou de um túnel, e se se trata ou não de um trajeto considerado como estratégico para os

veículos de emergência. Considerando a configuração do piloto onde existe o alinhamento de 5 módulos, revestir as superfícies com lombas seria impensável para o condutor, e incompatível para uma via que tem como função principal a circulação dentro da zona urbana, com o objetivo de garantir a maior fluidez possível do tráfego, conjugado com algumas técnicas de acalmia de tráfego em locais e situações onde se justifiquem.

Na fase piloto, a *Waydip* testou ainda umas lombas de madeira marinha, e apesar de serem mais rígidas que as da 3M, o que levaria a uma menor dissipação de energia, estas danificam-se facilmente, e não são bem vistas por se tratar de madeira num ambiente rodoviário.

A presente dissertação não tem como objetivo estudar e encontrar uma solução para este componente do sistema, mas mesmo assim, pretende-se com este estudo sugerir algumas possibilidades para o revestimento da superfície dos módulos. Uma das soluções encontradas é, simular a textura e a rugosidade de um pavimento rodoviário na própria placa de alumínio. Prevê-se que pode conferir uma razoável aderência entre o pneu e a placa. Outra solução encontrada é o revestimento antiderrapante colorido (Figura 3.11). É um material que costuma ser aplicado em zonas onde os veículos necessitam de uma aderência extra no pavimento, como por exemplo em descidas e curvas acentuadas, antes de intersecções e passagens de peões. Como a implementação dos módulos se vai situar em zonas onde é necessário travar, pode-se aplicar a frio ou a quente este material na área total da via onde os módulos se situam, contribuindo também para que toda a área confira uma maior aderência aos veículos. A colagem do material antiderrapante colorido é feita através de resina adesiva (por exemplo, poliuretano), sendo que um dos problemas que se prevê é a aderência entre este e o alumínio da placa, podendo não ser possível a colagem entre estes dois materiais. Para aumentar essa aderência sugere-se que se conjugue a primeira solução descrita com esta.

Se a colagem entre este material e o alumínio for possível, estamos perante uma solução muito compensadora do ponto de vista do custo e benefício, pois para além de se revestir de forma apropriada as placas dos módulos por baixo custo, confere-se ao pavimento uma grande aderência em zonas de travagem.



Figura 3.11 – Aplicação do revestimento antiderrapante colorido num pavimento betuminoso

3.5 Localização do Sistema de Geração de Energia nos Pavimentos da *Waydip*

Como se pôde verificar na análise dos resultados experimentais, quanto maior for a dissipação de energia do veículo sobre o pavimento rodoviário, maior será a energia elétrica que o sistema consegue gerar. Essa energia que se perde está relacionada com a energia cinética e a pressão que o veículo provoca no pavimento. De acordo com este princípio, para maximizar o rendimento do sistema, é necessário procurar zonas onde seja possível controlar de forma indireta a velocidade do veículo, e em locais onde os veículos necessitem frequentemente de travar, nomeadamente em locais de aproximação de cedência de passagem para outros veículos ou peões. Durante a travagem do veículo, o centro de gravidade desloca-se para a frente, proporcionando assim uma maior pressão no pavimento. Essa pressão extra devido à travagem depende da velocidade a que o veículo se desloca, do posicionamento normal do centro de gravidade, do peso próprio, e da força de travagem. Aumentando a pressão no pavimento, aumenta-se a força vertical que vai deslocar a placa. Aumentando essa força, a velocidade com que a placa desce é maior, gerando assim mais energia.

Um dos locais ótimos para se implementar este sistema é nas entradas das rotundas, preferencialmente na entrada com maior afluência de veículos, e se possível, tendo em conta os movimentos predominantes da intersecção, para verificar se na entrada escolhida existe uma maior frequência de ocorrer travagem antes do veículo entrar na rotunda. Ou seja, se for possível deve-se procurar rotundas em que os dois movimentos principais sejam conflituosos, em detrimento de rotundas onde os dois movimentos principais sejam paralelos, por questões de maior frequência de travagens.

Mas em ambas as situações, mesmo que não haja necessidade de parar completamente o veículo, na aproximação da rotunda o condutor tem sempre tendência em diminuir a velocidade, transmitindo assim maior pressão ao pavimento. Esta diminuição intuitiva da velocidade acaba também por fazer com que o veículo, quando não tem necessidade de parar, circule sobre o sistema com velocidades entre os 25 e os 45 km/h, um intervalo bastante aceitável. O ideal seria instalar uma configuração do sistema suficientemente extenso para que no início ainda se consiga captar os veículos a circularem a 50 km/h, e com a extensão igual ao comprimento total de travagem, até à entrada da rotunda. Esta extensão também era benéfica em períodos de hora de ponta, pois com uma extensão maior do que o comprimento médio ocupado pelo conjunto dos veículos que formam fila, iriam existir ainda módulos para captar a energia dos carros que iam chegando enquanto a fila ia diminuindo. Se a extensão for muito pequena, por exemplo com o comprimento igual ao comprimento ocupado pelos veículos que formaram fila, os módulos iriam estar quase na maior parte do tempo da hora de ponta com veículos a circularem com velocidades muito baixas sobre eles e com pouca pressão extra devido à fraca desaceleração.

Para além das vantagens descritas relativamente às rotundas, os condutores perante este tipo de intersecção têm um comportamento aleatório, o que não acontece nas intersecções semaforizadas.

Durante um ciclo semaforico, que pode durar até cerca de 120 segundos, o comportamento do condutor é sensivelmente igual de ciclo para ciclo, no que diz respeito à travagem e aceleração. Quando está no período onde tem prioridade sobre os restantes veículos, não existe travagem e as velocidades reais situam-se entre os 45 e os 65 km/h. Um intervalo que já não gere tanta energia. E também devido ao facto de não existir travagem durante esse período. Além do mais, é um período relativamente grande em comparação com o que teoricamente pode acontecer numa rotunda. Supondo que a configuração da fase piloto (ANEXO C) tivesse sido instalado numa intersecção com semáforos, os veículos no período sem prioridade que necessitariam de travar sobre os módulos eram de apenas um por ciclo, tendo em conta que o comprimento médio do veículo é de 4.5 m. Após o semáforo ligar o verde, os restantes veículos que formaram fila, movimentam-se sobre o sistema de forma lenta, transmitindo apenas o peso próprio do veículo, gerando menos energia do que era expectável. Normalmente, a fila criada num semáforo é maior do que numa rotunda. O que significa que a configuração do sistema num semáforo tende a ser, na maior parte das vezes mais extensa do que se a instalação fosse numa rotunda.

Concluindo, de uma maneira muito geral, o que hipoteticamente pode acontecer numa entrada de uma rotunda tem maior probabilidade de gerar mais energia do que numa intersecção semaforizada.

Para ambos os casos deverá ser feito um estudo ao funcionamento da intersecção, de forma a observar-se quais os movimentos predominantes, quais as vias mais solicitadas, a quantidade de tráfego, a velocidade de circulação, a distância média de travagem e a extensão da fila formada nas horas de ponta.

Outro local onde se pode instalar este sistema é na aproximação de uma lomba. Se os módulos estiverem bem posicionados, no intervalo de espaço onde existe travagem, existirá uma grande dissipação de energia sobre os mesmos. Neste caso, existe sempre travagem de todos os veículos antes da lomba, pois o condutor é obrigado a travar perante este obstáculo físico, sem imobilizar completamente o veículo. Do ponto de vista da frequência com que o veículo exerce pressão sobre os módulos e as velocidades a que circula antes da lomba, faz com que este local seja o local ótimo. Mas as lombas com rampas, nomeadamente as de forma trapezoidal, parabólica e circular, são medidas de acalmia de tráfego que só se devem aplicar em distribuidoras locais ou em acessos locais. Como este tipo de vias tem um baixo fluxo de tráfego, a instalação deste sistema nestas vias pode não ser rentável. Existe outro tipo de lombas, as *Speed Bumps*, onde o impacto visual que estas provocam ao condutor torna a sua aplicabilidade numa distribuidora principal em zona urbana mais tolerável. Para aplicar estas lombas numa distribuidora principal, tem que ser em zonas que se justifiquem e tendo em conta as condicionantes expostas anteriormente. Normalmente são aplicadas antes de atravessamentos de peões com fluxos elevados, ou antes de um equipamento escolar ou de saúde, ou de uma intersecção problemática. Se for possível aplicar este tipo de lombas numa distribuidora principal, a melhor opção seria aplicar este sistema de geração de energia antes destas. Era uma escolha que iria produzir mais energia, comparando com o que pode acontecer numa entrada de uma rotunda ou intersecção semaforizada, devido ao facto de todos os veículos necessitarem de travar antes destas lombas, pelas velocidades de circulação antes das lombas, e por não se formar uma fila significativa em períodos de ponta. A extensão neste caso iria depender da velocidade de circulação, e com menor peso, do fluxo de tráfego. Quanto maior for a velocidade maior será a extensão necessária do conjunto de módulos.

Após 2 anos de estudos e de testes do sistema *Waynergi Vehicles*, a *Waydip* através de uma parceria com a Câmara Municipal da Covilhã, conseguiu implementar o seu sistema numa via pública na cidade da Covilhã, colocando assim a ideia laboratorial num ambiente real. Por se tratar de uma instalação piloto e com os custos de implementação a serem suportados pela Câmara Municipal da Covilhã, a localização da implementação do sistema foi da responsabilidade da Câmara. Sendo assim optaram por o localizar na Alameda Pêro da Covilhã. No caso de estudo, decidiram implementar o sistema numa saída de uma rotunda, apenas na via da direita. Para além de ser um dos principais acessos à zona antiga da cidade, a escolha deste local deveu-se ao facto de existir uma pequena via segregada para táxis com

acesso à Alameda, como se pode visualizar na Figura 3.12. Esta característica teve um grande peso na decisão da localização, pois possibilita o desvio do tráfego de forma fácil e eficiente durante a implementação e para futuras reparações, otimizações e verificações. Com esta particularidade na via, o nível de serviço é pouco afetado e não obriga o condutor a fazer longos desvios. Apesar de se concluir que o sistema deve ser implementado numa zona de travagem, aliado a uma zona onde se consiga de forma indireta certificar-se que as velocidades estejam dentro do intervalo desejável, o mais importante na fase piloto, é perceber a durabilidade, a eficiência na drenagem dos módulos e a aderência entre o pneu e a face superior do sistema. No fundo, apenas importa estudar como o sistema se comporta num ambiente real, exposto a todas as condições que o ambiente rodoviário lhe impõe. Houve então uma preocupação em optar por um local onde salvaguardasse os condutores de futuras intervenções necessárias nos módulos.



Figura 3.12 – Localização do sistema piloto na Alameda Pêro da Covilhã

3.5.1 Enquadramento do Município da Covilhã

O Município da Covilhã pertence ao distrito de Castelo Branco, que é delimitado geograficamente a Norte pelo distrito da Guarda, a Sul pelo distrito de Portalegre, a Oeste pelos distritos de Santarém, Leiria e Coimbra, e a Leste pelas fronteiras com o País vizinho, Espanha. Para além do Município da Covilhã, o Distrito de Castelo Branco é constituído por mais 10 Municípios: Belmonte, Penamacor, Fundão, Idanha-a-Nova, Oleiros, Sertã, Vila de Rei, Proença-a-Nova, Vila Velha do Ródão, e Castelo Branco. O Concelho da Covilhã, segundo o Dec. Lei n° 244/2002, onde especifica a NUTS, enquadra-se na NUTS II no Centro e na NUTS III na Cova da Beira.

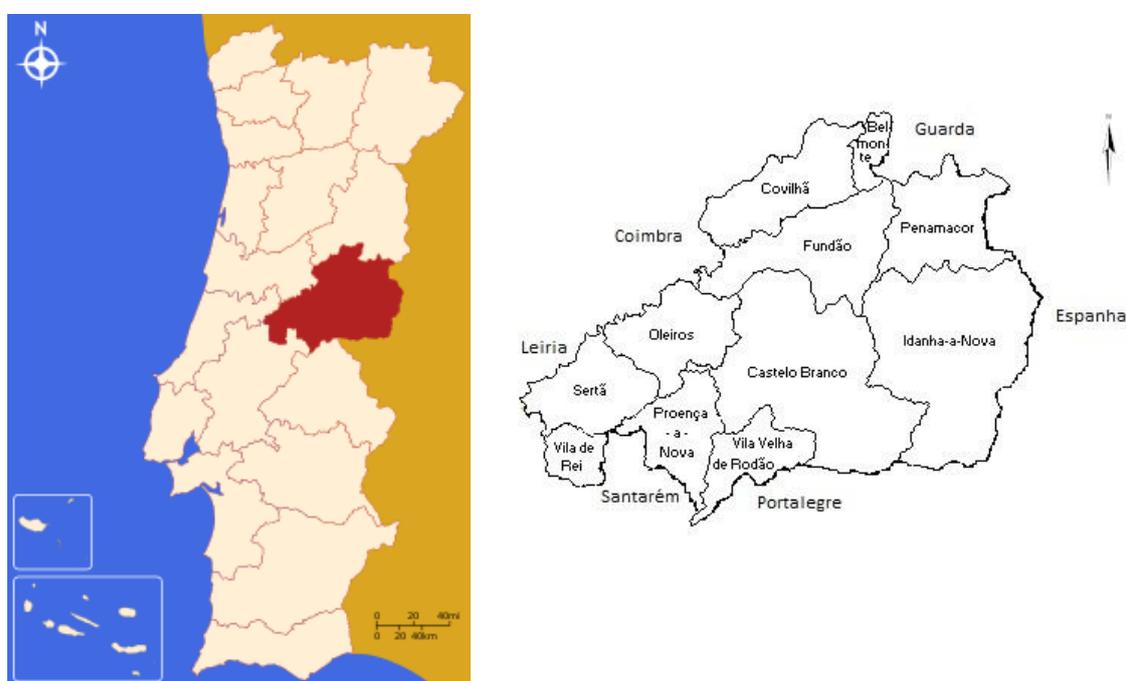


Figura 3.13 – Localização geográfica do Distrito de Castelo Branco e dos respetivos Municípios

Este Município tem uma área de 555 Km² e é constituído por 31 freguesias: Aldeia de São Francisco de Assis, São Jorge da Beira, Casegas, Sobral de São Miguel, Ourondo, Erada, Paul, Coutada, Barco, Peso, Vales do Rio, Cortes do Meio, Unhais da Serra, Tortosendo, Dominguiso, Boidobra, Ferro, Cantar Galo, Vila do Carvalho, Teixoso, Santa Maria, São Martinho, São Pedro, Conceição, Peraboa, Verdelhos, Sarzedo, Orjais, Aldeia do Souto, Canhoso e Vale Formoso.



Figura 3.14 – Localização geográfica das Freguesias do Município da Covilhã

De acordo com os resultados dos Censos de 2011, a população residente no Concelho da Covilhã é de 51.797 habitantes, sendo o segundo Município de Castelo Branco com mais população. Comparando com os resultados dos anos anteriores, denota-se um decréscimo da população na generalidade dos anos de recenseamento demográfico, como se pode constatar na Figura 3.15.

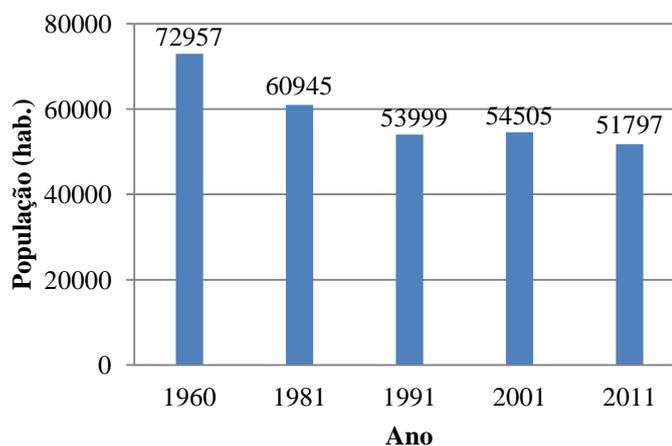


Figura 3.15 – Evolução da população residente no Município da Covilhã

Após os anos 60, existiu uma forte emigração da população Portuguesa, por questões económicas e na tentativa de fugir ao serviço militar durante a Guerra Colonial. A partir do final dos anos 80, tem-se vindo a assistir a um fenómeno de migração da população ativa dentro do território Português. Esta migração ocorre do interior para o litoral de Portugal

Continental, com o intuito de procurarem melhores oportunidades de trabalho e melhor qualidade de vida, resultado do maior desenvolvimento da zona litoral comparando com as regiões do interior. Todos estes fatores contribuíram para o decréscimo da população da Covilhã ao longo dos anos, bem como na generalidade das regiões do interior do País.

Esta litoralização da população ativa influencia a distribuição etária deste concelho, em comparação com os valores globais de Portugal relativamente ao ano de 2011, como se pode verificar no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Distribuição etária da população residente no Município da Covilhã

Idade	Covilhã	Portugal
0-24	22%	26%
25-64	54%	55%
65+	24%	19%

3.5.2 Localização dos Equipamentos Coletivos na Cidade da Covilhã

Os equipamentos coletivos são meios materiais necessários para desempenhar uma determinada atividade, podendo ser considerados como infraestruturas. Estes têm um papel fundamental na dinamização da economia em qualquer aglomerado populacional. Um dos principais fatores para a categorização das povoações é a quantidade e a qualidade dos equipamentos coletivos. Portanto, são elementos de valorização territorial, capazes de alterar a qualidade de vida da respetiva população.

Fez-se uma análise à rede de equipamentos da cidade da Covilhã, que consistiu na localização e identificação de equipamentos coletivos capazes de gerar grandes volumes tráfego, para se perceber a importância de cada troço da rede rodoviária, e de modo também a auxiliar a categorização de cada via. Apesar de se ter realizado uma identificação quase na totalidade do território da cidade da Covilhã, por motivos gráficos, apresentam-se no ANEXO A apenas os equipamentos na zona onde se prevê que a circulação na Alameda Pêro da Covilhã seja afetada pelos mesmos, ou seja, apresentam-se aqueles para os quais, para se ir do ponto A para o equipamento B, exista uma grande probabilidade de se deslocarem pela Alameda.

Nesta análise apenas se consideraram os equipamentos coletivos de maior importância social e de maior utilidade pública, pois são estes os principais geradores de viagens. Foram então tidos em conta equipamentos de saúde (cor vermelha), educação (cor azul), desportivos (cor verde), de transportes (cor castanho), e alguns equipamentos coletivos de caris comercial devido à grande procura (cor amarelo). Não se teve em conta equipamentos de segurança pública, nomeadamente postos de GNR ou PSP, e bombeiros, por serem equipamentos que

geram poucas viagens em comparação com os considerados, embora sejam equipamentos de grande utilidade pública e social.

Como se pode verificar no ANEXO A, grande parte dos equipamentos coletivos encontram-se adjacentes à Alameda Pêro da Covilhã. Importantes equipamentos como o Hospital da Cova da Beira, o Complexo Desportivo da Covilhã, o Covilhã *Shopping*, o Centro de Saúde da Covilhã, todos têm acesso direto à Alameda. Os restantes equipamentos como a UBI, o Departamento de Engenharia da UBI, a Faculdade de Ciências da Saúde da UBI, a Escola Secundária Quinta das Palmeiras, o Agrupamento de Escolas Pêro da Covilhã, a grande superfície comercial *Intermarché*, o Serra *Shopping*, e a Central de Camionagem, encontram-se apenas a uma via de ligação com a Alameda, ou seja, grande parte do acesso a estes equipamentos passa pela circulação na Alameda Pêro da Covilhã. Os restantes equipamentos que não se encontram assinalados, são equipamentos de pouca expressão comparados com os expostos.

É de notar com este estudo que a via onde se optou por localizar o sistema de geração de energia da *Waydip*, é possivelmente a via mais importante e com maior afluência de veículos na rede da cidade da Covilhã.

3.5.3 Hierarquização Viária da Rede da Cidade da Covilhã

A hierarquização viária é uma preocupação de extrema importância a nível municipal, pois sem uma boa organização viária o espaço urbano torna-se, do ponto de vista da mobilidade e da vivência, inoperacional. Deve-se oferecer um nível e uma qualidade adequada à procura, preservando o espaço envolvente e promovendo de certa forma a utilização de modos de transporte mais sustentáveis. Com uma hierarquização viária de qualidade os utentes sentem-se mais seguros enquanto se deslocam. Além disso, minimiza os efeitos barreira e intrusão, contribui para a requalificação e/ou prospeção dos espaços e protege os espaços naturais.

A análise da hierarquização viária da cidade da Covilhã tem como objetivos verificar a classe da via onde se localiza o sistema, de forma a apurar se é suscetível a existência de um tráfego elevado nessa via e como se enquadra com a restante rede urbana.

O estudo da rede é de uma maneira geral difícil devido à complicação na delimitação das fronteiras entre cada classe, tornando assim a classificação um pouco ambígua em casos em que um determinado trecho tem funções de circulação e de acessibilidade próximas de uma dada fronteira, como se pode observar na Figura 3.16. As vias coletoras e as distribuidoras principais têm como função principal a circulação, sendo vias estruturantes numa rede. É de prever que estas vias tenham um Tráfego Médio Diária Anual (TMDA) mais elevado do que nas distribuidoras locais e as vias de acesso local, onde predomina a função de acessibilidade.

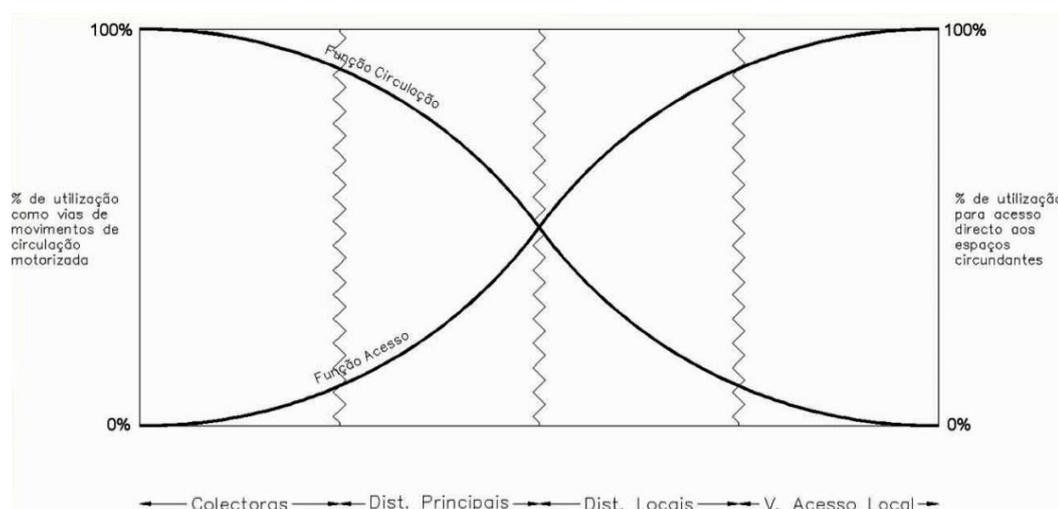


Figura 3.16 – Delimitação das fronteiras consoante a função de cada via

Esta análise teve em conta o aspeto físico e as funções básicas para cada trecho da rede urbana, recorrendo ao apoio da informação do *Open Street Maps*, da *Geofabrik*. Nos aspetos físicos observou-se em particular o tipo de estacionamento, a coordenação existente com o modo pedonal, a tipologia dos cruzamentos, o tipo de utilizadores e o acesso aos espaços adjacentes. Esta classificação também teve em conta a função predominante em cada via, recorrendo à localização de equipamentos coletivos de grande importância, zonas residências, e a nós de acessos principais, bem como a disposição hierárquica das vias que se intersectam.

A cidade da Covilhã situa-se na vertente oriental da Serra da Estrela, com a zona antiga da cidade a atingir cerca de 700 metros de altitude. É uma cidade com grandes declives e com uma edificação densa nessa zona, tornando difícil conceder certos aspetos físicos necessários na construção de vias estruturantes. A cidade acabou por se expandir para zonas onde os declives não são tão acentuados. Como se pode observar no ANEXO B, após a análise da hierarquia viária, é na parte mais nova, particularmente na entrada da cidade, onde se localizam as poucas vias estruturantes que servem as restantes vias locais.

A Alameda Pêro da Covilhã na sua totalidade tem cerca de 2,5 km. É constituída por duas vias em cada sentido com um pequeno separador central, onde todas as intersecções são da tipologia rotunda, e não tem qualquer estacionamento ao longo da via. Tem apenas passeadeiras na aproximação das rotundas, e 3 delas, nas quais ocorrem atravessamentos de peões nos acessos ao Hospital Cova da Beira e ao Centro de Saúde da Covilhã, são semaforizadas. É ainda de notar que a rotunda onde se localiza o sistema apenas tem duas entradas e as respetivas saídas, ou seja, não se trata de uma intersecção. Esta particularidade na Alameda tem como função principal permitir a inversão de marcha, principalmente aos

veículos prioritários, de forma a diminuir o trajeto quando pretendem ter acesso ao Hospital da Cova da Beira. Para além desta comodidade, a rotunda através da natural deflexão do traçado impõe uma diminuição de velocidade em todos os veículos antes de uma passadeira e da entrada principal do Hospital. Como se trata de um trecho da via considerado estratégico pelos serviços de emergência, segundo o despacho da DGV, não deve conter qualquer tipo de imposição física, nomeadamente lombas.

A Estrada da Palmatória tem cerca de 1,0 km, ligando-se com a Alameda através de uma rotunda, tendo também todas as intersecções da tipologia rotunda. É constituída apenas por uma via em cada sentido, sem qualquer separador central. Existe algum estacionamento paralelo à via, em locais onde o afastamento do edificado e a topografia assim o permite. Tem apenas passadeiras junto às rotundas.

Ambas estas estradas têm passeios nos dois lados e no total contam com 8 paragens de autocarros, com todas as zonas de paragem destinadas exclusivamente a estes. Todos os cruzamentos respeitam a hierarquia relativa das vias que se intersectam.

Estas duas vias formam a única distribuidora principal da cidade da Covilhã, porque contêm todas as características físicas que uma distribuidora principal deve e pode ter. Para além das características descritas, ambas as estradas têm claramente predominância na função de circulação, com pouca função de acessibilidade. Desempenham o papel de distribuir de forma primordial o tráfego desde o acesso principal da cidade até à zona histórica. Acabando na rotunda que dá acesso a dois grandes geradores de viagens como, os Departamentos da UBI e o núcleo residencial mais antigo. Dentro destas zonas o tráfego rodoviário já se encontra nitidamente repartido pela malha urbana local. No que diz respeito ao principal acesso à cidade, a distribuidora principal liga-se a uma via coletora, a nacional N18, através de acesso por entrada e saída na mão. A nordeste, relativamente a esta intersecção, a via coletora liga-se à autoestrada A23.

Apesar de se esperar que numa via coletora haja um elevado TMDA, os veículos em regime livre circulam com uma velocidade superior a 80 km/h, tornando a instalação do sistema numa via deste tipo pouco viável, pois para velocidades superiores a 50 km/h existe um decréscimo na energia que o sistema consegue gerar. Para além desta desvantagem na aplicação deste sistema em vias com velocidades de circulação elevadas, o funcionamento mecânico do sistema coloca em causa a segurança dos veículos que por ele transitam. Como foi explicado, o módulo gera energia através de um movimento oscilatório vertical da placa, fazendo com que na passagem do veículo a grandes velocidades se perca aderência entre o pneu e a placa.

Conclui-se que este sistema de geração de energia deve ser aplicado em distribuidoras principais em ambiente urbano porque a velocidade de circulação em regime livre é cerca de 50 km/h e têm um TMDA mais elevado em comparação com as vias locais. Quanto maior for o número de veículos, maior será a energia gerada pelo sistema, mas até a um certo ponto, pois quando o número de veículos por hora se aproxima da capacidade máxima de uma via, não é benéfico, porque as velocidades de circulação nessas condições diminuem muito e as filas nos locais onde se encontram os módulos aumentam.

Após a análise hierárquica viária da rede urbana da cidade da Covilhã, do ponto de vista da localização consoante o tipo de via, verifica-se que o sistema se encontra bem localizado por estar instalado numa distribuidora principal em zona urbana.

3.5.4 Agenda dos Trabalhos de Implementação do Sistema Piloto

A instalação do sistema piloto da *Waydip* na Alameda Pêro da Covilhã teve início no dia 22 de Abril de 2013. Por se tratar de uma instalação nunca antes feita em Portugal, e em particular na Covilhã, desconhecia-se à partida qual o tempo que seria necessário para finalizar os trabalhos de implementação deste sistema inovador. Além do mais, também não se sabia ao certo quais as técnicas de construção necessárias e mais adequadas para a sua realização. A obra evoluiu no sentido da necessidade, dependendo do ponto em que se encontrava. Estas indefinições normais numa obra deste cariz fizeram com que a duração da obra se tornasse um pouco extensa, visto que se tratava apenas de uma relativa pequena intervenção num pavimento rodoviário.

Todos os equipamentos e custos ficaram a cargo da Câmara Municipal da Covilhã, bem como a mão-de-obra. Na realização desta instalação piloto contou-se com o apoio de equipamentos de construção como uma retroescavadora, uma placa vibratória, uma serra de pavimentos, um caminhão basculante, bem como o acompanhamento profissional de um pedreiro, um técnico para a condução da retroescavadora e de um camião basculante, da presença periódica dos Engenheiros da Câmara Municipal da Covilhã, e evidentemente com a entajuda de todos os presentes na obra.

1º Dia

Antes do primeiro dia, foi instalado na zona de implementação do sistema um painel publicitário eletrónico com o objetivo de apresentar em tempo real a quantidade total de energia gerada, e uma caixa que se destinava ao equipamento eletrónico.

No primeiro dia de trabalhos, como não se tinha definido a localização exata da abertura da caixa no pavimento rodoviário, houve uma reunião para se decidir com precisão onde seria mais vantajoso a sua abertura. Existiram alguns condicionamentos na localização dos

módulos. Um deles foi a presença de uma tampa do saneamento básico como se pode observar na Figura 3.17. Apesar da tampa estar visivelmente fora da via, esta ligava-se de forma cônica com o sistema de saneamento, ou seja, o diâmetro aumentava em profundidade. Estas características fizeram com que a localização do sistema dependesse da posição da mesma. Portanto, decidiu-se que a abertura da caixa no pavimento teria que ser realizada antes da tampa de saneamento, logo após a saída da rotunda.



Figura 3.17 – Condicionamento na localização dos módulos

Depois de definida a localização da abertura, e recorrendo ao projeto das peças de betão que servem de suporte base para a fixação de cada módulo da *Waydip* (ANEXO C), fizeram-se as medições no pavimento, e em seguida, utilizando uma serra cortou-se o pavimento betuminoso, como se pode observar na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Utilização de uma serra durante o corte do pavimento

Com o auxílio da retroescavadora, procedeu-se à abertura do pavimento rodoviário em forma de uma caixa, com uma profundidade suficiente para haver margem de manobra na regularização e compactação do solo, de acordo com a altura de 49 cm das peças de betão armado. Recorrendo ao camião basculante, todo o material em excesso foi retirado da obra rapidamente, pois havia muita limitação no espaço com o tráfego a transitar em redor da obra. Depois da caixa estar completamente desimpedida de material e com uma profundidade adequada à situação que se pretendia, regou-se o solo, e com o auxílio de uma placa vibratória procedeu-se à sua compactação, como se pode verificar na Figura 3.19. Nesta fase não houve qualquer preocupação em deixar já o solo regularizado com os 49 cm necessários para que o topo das caixas de betão ficassem no mesmo nível que a superfície de desgaste da via. Apenas se teve o cuidado de compactar devidamente o solo em primeiro lugar, pois tinha-se acabado de o movimentar.

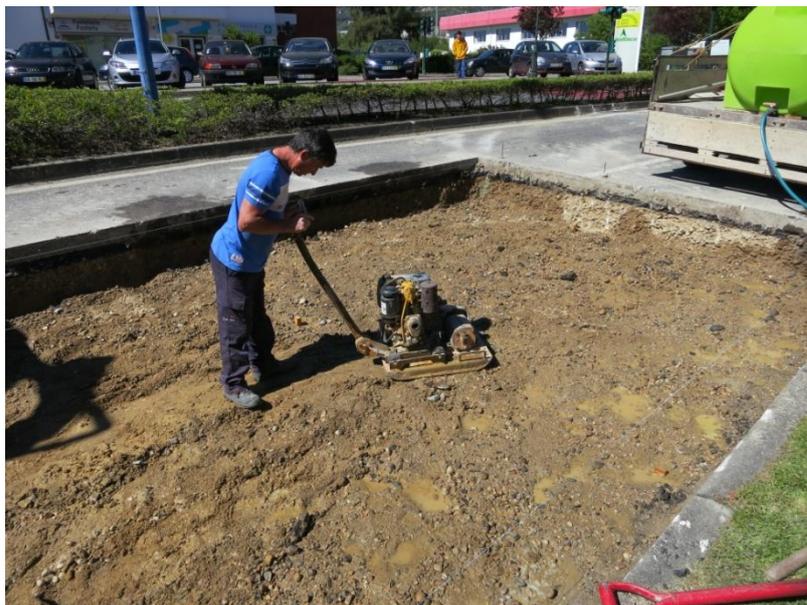


Figura 3.19 – Utilização da placa vibratória durante a consolidação da fundação

2º Dia

Após uma conversa com os Engenheiros responsáveis da Câmara, foi permitida a escavação do separador do lado direito, entre a via onde se fazia a intervenção e a via destinada aos táxis, como se pode visualizar na Figura 3.20. Esta opção esteve relacionada com o facto de ambas as caixas de betão terem uma aba na sua base que contribuem para impedir tensões negativas entre a base e o solo, tornando-a toda ativa, impossibilitando assim a rotação da caixa. Como se tinha uma berma muito pequena e logo de seguida o separador, os 5 módulos da direita destinados a captar o movimento das rodas direitas de cada veículo, iriam ter a sua área de influência a começar a 55 cm da berma, espaço suficiente para que os condutores passassem com as rodas da direita fora da superfície dos módulos, ou na melhor das hipóteses, com metade fora e outra dentro. Então houve a necessidade de escavar cerca de 40 cm o separador direito para que o módulo começasse logo de seguida à pequena berma, ficando com as abas do lado direito enterradas na área do separador direito. Por sua vez, os módulos do lado esquerdo não iriam começar a cerca de 2,7 m da berma, ou seja, já quase na via da esquerda. Assim, os módulos do lado esquerdo iriam começar a 2,3 m da berba.



Figura 3.20 – Escavação do separador do lado direito

Neste dia também se procedeu à regularização do solo onde iriam assentar as peças de betão armado de maneira a que as superfícies dos módulos ficassem ao mesmo nível da superfície do pavimento rodoviário, para que a sensação de algum desconforto que o condutor pudesse sentir não fosse acentuada. Esta regularização foi efetuada recorrendo a várias estacas cravadas no solo em sítios distintos. A estaca era cravada até uma determinada profundidade, de maneira a que a distância medida entre o topo da estaca e o fio-de-prumo preso no pavimento fosse cerca de 45 cm. Esta distância era inferior aos 49 cm necessários, pois após compactar o solo, este iria ceder e aumentar até aos 49 cm pretendidos. Esta tarefa foi efetivamente a mais difícil de se realizar. Tiveram que se fazer várias correções enquanto se fazia a compactação, pois o solo ou cedia demais ou não compactava junto à delimitação da caixa no pavimento. Para além do mais, teve que se fazer uma verificação da altura em vários pontos. É uma técnica de construção que não garante uma total homogeneização da altura. No final do dia chegaram as peças de betão armado. Procedeu-se à retirada das peças da transportadora, recorrendo à retroescavadora, e com umas cintas uniu-se a pá às peças de betão que vinham com ferros em forma de aros, destinados exclusivamente para o seu deslocamento na obra.

3º Dia

Continuou-se com a regularização do solo, colocando uma mistura de solo com agregados nos locais em que a altura desejada era superior, e nas partes onde a altura era inferior, retirou-se material. Após este processo muito importante, procedeu-se à colocação das peças de betão

uma a uma na abertura do pavimento, como ilustra a Figura 3.21. No total foram colocadas 10 peças de betão destinadas aos 10 módulos de geração de energia. A primeira peça a ser colocada na abertura era muito importante, pois era a peça que iria conferir o posicionamento das restantes peças de betão. Então fizeram-se as medições necessárias e com a ajuda da retroescavadora colocaram-se todas as peças devidamente encostadas umas às outras. As peças que faziam parte do conjunto de cada lado foram fixadas entre elas na base, através de dois parafusos. O facto do solo ter alguns agregados salientes na superfície dificultou a colocação das peças de betão, pois impediam que toda a base da peça assentasse totalmente e de igual maneira no terreno. Este problema fazia com que o topo da peça que se estava a colocar não ficasse nivelado com a peça adjacente, impedindo assim de as aparafusar uma a outra. Teve que se retirar várias vezes a peça e descompactar um pouco o solo onde ela ia assentar.



Figura 3.21 – Colocação das peças de betão armado

4º Dia

Foi o dia onde se tratou da parte da tubagem, como se pode visualizar na Figura 3.22. A água que escorre pela superfície do pavimento consegue entrar para o interior dos moldes devido à folga entre o molde de betão e o módulo que permite o movimento vertical da placa. Então, dentro da peça de betão criou-se um desnivelamento da área onde o sistema é fixado, de forma a existir uma regadeira em torno do seu perímetro, com inclinação suficiente para a água se movimentar no sentido do orifício de escoamento. Os módulos também contam com um fole de borracha à sua volta para impedir que a água entre em contacto com o sistema

elétrico. Foram então colocados tubos (vermelhos) para drenar a água acumulada no interior da peça que depois seriam todos ligados a uma caixa com abertura para o exterior, que por sua vez se liga ao sistema das águas pluviais. Também foram inseridos os tubos para o sistema elétrico que se ligam à caixa exterior do sistema elétrico.



Figura 3.22 – Tratamento da tubagem para o sistema de geração de energia

Final de Maio de 2013

A Câmara Municipal da Covilhã decidiu só fechar a caixa aberta no pavimento rodoviário após a conclusão de uma outra obra no Município que necessitava também de betume. Foi então no final de Maio que foi colocado as camadas granulares e mistura betuminosa, de forma que para o exterior só ficassem visíveis as aberturas das peças de betão. Depois de se tratar da limpeza do interior das peças de betão, foram fixados os sistemas da *Waydip* dentro de cada peça (Figura 3.23).



Figura 3.23 – Resultado final depois de fechar a caixa de trabalhos

3.5.5 Análise de Custos e Benefícios

Quando se pretende fazer qualquer tipo de investimento é necessário perceber até que ponto esse investimento é viável de se realizar. Fazer um balanço entre os custos que se têm e os benefícios que esse esforço financeiro pode vir a trazer no futuro, é um exercício que deve ser sempre realizado para que se tenha sucesso nas decisões que se tomam. Foi dentro desta ideia que se tentou perceber se este sistema pode vir a ser considerado como um investimento rentável a longo prazo.

Optou-se por estudar a rentabilidade deste sistema através de uma análise de custos e benefícios. Trata-se de uma análise que apenas tem em conta os custos e os benefícios monetários, sendo limitada quando se pretende medir parcelas qualitativas. Para além disso, a previsão que esta análise oferece depende muito das condições do mercado.

Esta tecnologia é um sistema de geração de energia renovável que terá claramente impactes ambientais positivos, mas estes, através desta análise, não se conseguiram medir nem contabilizar. Por se estar perante um sistema piloto onde os custos de produção são naturalmente elevados, nesta primeira análise apenas se teve em conta os custos de implementação e de manutenção e os benefícios em relação à energia gerada, de forma a perceber, apenas do ponto de vista financeiro, quanto teria que ser o custo de produção para que o investimento não desse prejuízo às entidades investidoras.

De forma a tornar esta análise mais próxima da realidade, fizeram-se contagens do tráfego que se desloca sobre o sistema piloto implementado na Covilhã. Este estudo foi realizado durante dois dias da semana, diferenciando os veículos ligeiros, os veículos pesados e os transportes públicos na via da direita, onde está instalado o sistema, e também na via da esquerda. Também se contabilizou o tráfego na via da esquerda para se perceber se também teria sido rentável instalar nessa via um outro sistema idêntico ao que foi colocado na via da direita.

No primeiro dia de contagens realizaram-se dois turnos. Um das 12:00 às 17:00 horas, e o outro das 21:00 às 23:00 horas. Praticamente durante todo o tempo das contagens no primeiro dia, as condições climáticas eram de chuva moderada, o que pode ter influenciado em excesso o número de veículos contabilizados, uma vez que as pessoas têm maior tendência a usar o veículo próprio quando se deparam com as condições descritas, mesmo que a viagem seja de curta duração. No segundo dia contabilizaram-se os veículos entre as 7:00 e as 12:00 horas, e das 17:00 às 21:00 horas. Neste segundo dia, não houve precipitação.

Como se pode verificar na Figura 3.24, nas chamadas horas de ponta, ocorre naturalmente o maior número de veículos a circular sobre o sistema, mas é de realçar que o valor máximo do tráfego por hora acontece das 14:00 às 15h:00 horas. Para além de ser depois do período de almoço, este horário coincide com o início das visitas no Hospital da Cova da Beira (começam às 14:00 horas). Outra particularidade é o facto de não haver uma diferença muito relevante entre as horas de pico e as restantes. Essas diferenças são no máximo na ordem dos 30%, o que se pode justificar pelo facto de o principal acesso ao hospital ter que passar na via onde está implementado o sistema que, por sua vez, é um grande gerador de viagens devido às visitas, às consultas, às urgências e, logicamente, um local de trabalho que emprega muita população.

Mesmo assim, olhando para as horas onde ocorre o volume de tráfego mais elevado, verifica-se que a via da direita é apenas solicitada no máximo numa hora por 471 uvl. Mesmo sem contabilizar os veículos pesados, são volumes de tráfego que ficam longe da capacidade normal para cada via, que toma valores entre os 1600 a 1800 uvl/h.

Os volumes de tráfego para a via da esquerda são muito baixos devido a tipologia da rotunda, com apenas duas entradas e respetivas saídas, ao baixo volume de tráfego e ao hábito dos condutores que tendem quase sempre em sair na via da direita mesmo que circulem na via interior da rotunda. Sendo assim, implementar um sistema deste tipo na via da esquerda não seria rentável.

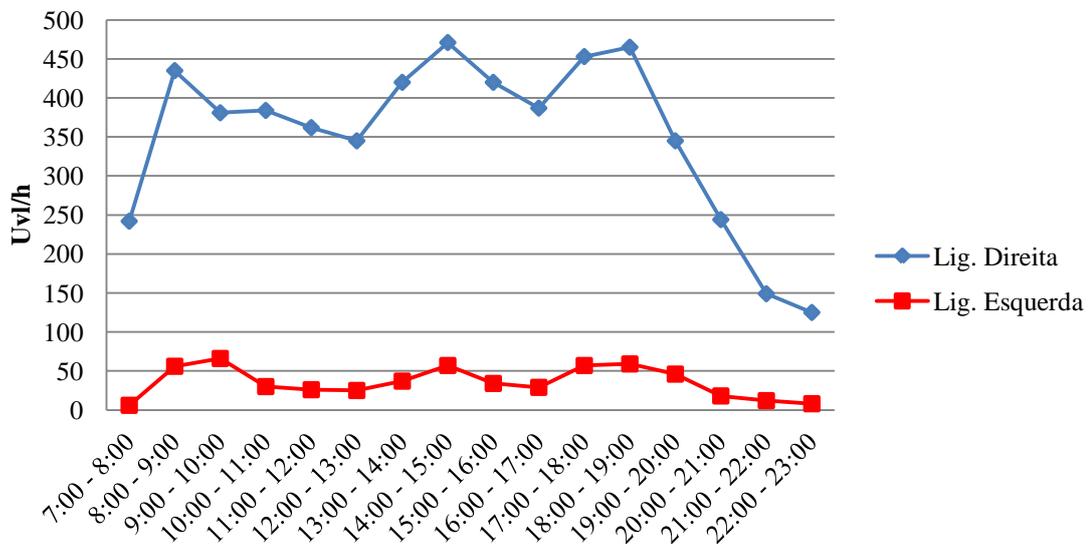


Figura 3.24 – Diagrama do volume de tráfego diário dos veículos ligeiros na zona piloto

Em relação aos veículos pesados (Figura 3.25), separaram-se os transportes públicos, mas em termos de análise consideraram-se como pesados. Estes resultados correspondem à via da direita. Na via da esquerda não foram observados veículos pesados.

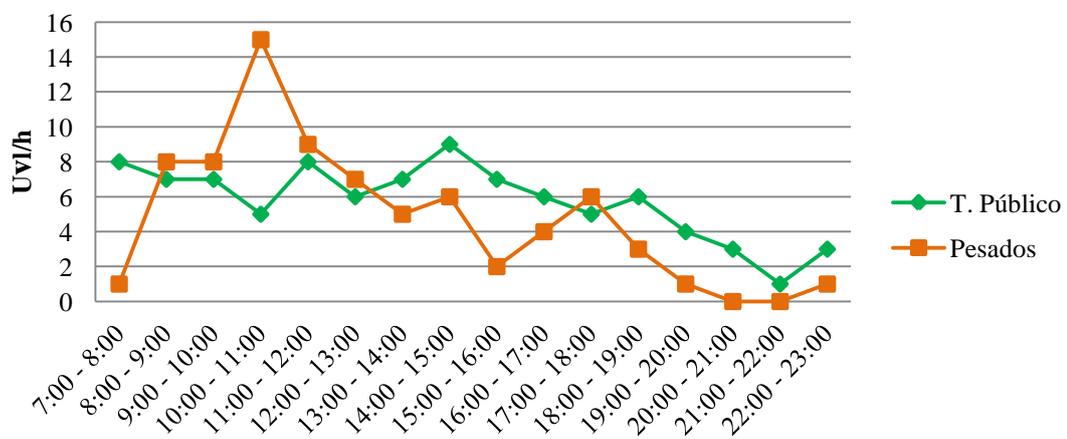


Figura 3.25 – Diagrama do volume de tráfego diário dos veículos pesados na zona piloto

Como os volumes de tráfego que dizem respeito à madrugada costumam ser muito baixos, fez-se uma estimativa para esse período. Utilizando os últimos três valores medidos do dia, recorrendo a uma função logarítmica, $y = -111.4 \times \ln(x) + 239.21$ com $R^2 = 0.9674$, estimou-se o tráfego para as restantes horas (Figura 3.26), não permitindo que a função descresse dos 30 uvl/h. Para o período das 5:00 às 6:00 horas, igualou-se o tráfego que

aconteceu da 1:00 às 2:00 horas por se estar a aproximar o início do dia. Das 6:00 às 7:00 horas considerou-se que seria cerca de metade do que acontece na hora seguinte.

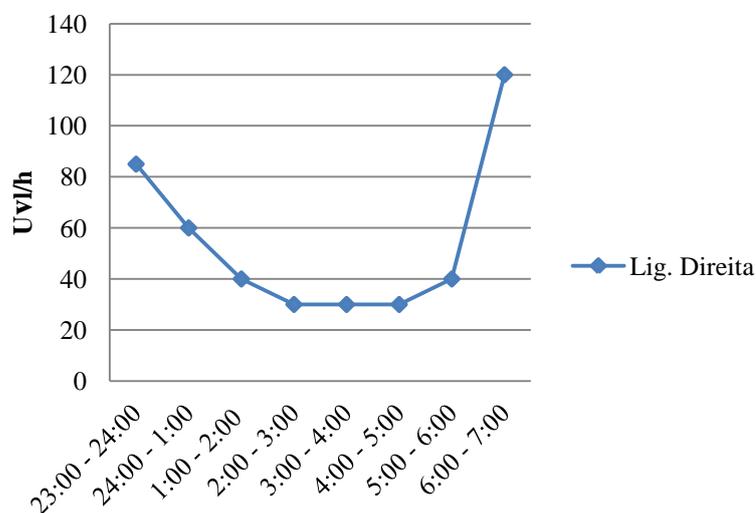


Figura 3.26 – Estimativa dos veículos ligeiros na via da direita para a madrugada

Nos veículos pesados, por não haver transporte público durante a madrugada e pelo facto de haver sempre alguns veículos de transporte de materiais residuais durante o período noturno, considerou-se que durante essa parte do dia existiam dois veículos pesados por hora, e das 6:00 às 7:00 horas cerca de metade da hora seguinte.

A rotunda em questão tem duas passadeiras com semáforos, uma na entrada e outra na saída. Esses semáforos destinados aos peões têm uma programação fixa, ou seja, durante uma hora eles, em simultâneo, retiram a prioridade aos veículos durante 28 segundos dando prioridade aos peões, com uma frequência de 33 vezes por hora. Então, enquanto se fazia a contagem, foi-se percebendo que alguns dos veículos que se aproximavam dos semáforos, por terem uma boa percepção do funcionamento dos mesmos, quando estes passavam em amarelo nos primeiros e seguiam em frente na direção dos segundos semáforos, já sabiam que teriam que parar. Portanto, passavam na saída da rotunda sobre os módulos de forma lenta, logo o sistema não iria tirar o maior rendimento da passagem desses veículos. Quando se formava fila, o segundo carro aproximava-se de forma lenta e parava em cima do conjunto de módulos. Os restantes veículos da fila também passavam de forma lenta. Devido a estas observações contou-se o número de carros que formavam fila e considerou-se nos cálculos que o número de veículos a partir do segundo veículo (inclusive) da fila iam produzir energia que correspondia à passagem sobre os módulos a 10 km/h. Observou-se, também, que em média os carros saíam da rotunda a cerca de 40 km/h. Ainda para efeitos de cálculo, considerou-se

que em média um veículo ligeiro tem uma massa de 1350 kg e os veículos pesados 9000 kg para tornar esta análise mais real, pois no mínimo um veículo pesado tem cerca de 4500 kg. Através da equação linear apresentada na Figura 3.8, estimou-se para um peso de 9000 kg e para uma velocidade de 30 km/h que a energia gerada por cada módulo é de 775 J. Como se trata de uma previsão e por não se saber se o comportamento dos módulos, no que diz respeito à geração de energia para situações extremas de massa é linear, vai-se minorar essa energia para os 600 J, de forma a estar do lado da segurança.

Quadro 3.4 – Dados da energia gerada na fase piloto

Nº Módulos	10
Energia (40 km/h e 1350 kg)	93 J
Energia (10/20 km/h e 1350 kg)	80 J
Energia (30 km/h e 5000 kg)	600 J

Sabendo que 1 kwh corresponde a 3600000 J e que custa sensivelmente 15 cêntimos, obtiveram-se os seguintes resultados apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resultados do número de veículos ligeiros e de pesados e respetiva energia gerada e os seus benefícios monetários na fase piloto

	Dia	Ano
Ligeiros (uvl)	6063	$2,21 \times 10^6$
Pesados (uvl)	187	$6,83 \times 10^4$
Veic. Fila (uvl)	280	$1,02 \times 10^5$
Energia (J)	$6,72 \times 10^6$	$2,45 \times 10^9$
Energia (kwh)	1,87	681,76
Euros	0,28	102,26

Para o cálculo do VAL considerou-se que a taxa de atualização é igual à taxa do aumento do kwh que se tem vindo a verificar nos últimos 3 anos, ou seja, 2%.

Devido à conjuntura económica e social que se tem vindo a assistir nos últimos anos em Portugal e na Europa, prevê-se de forma otimista com o melhoramento do panorama Nacional que, nos próximos anos, exista um crescimento dos veículos a circular nas estradas do território Nacional. Para esse efeito, considerou-se que após o segundo ano de análise existe um crescimento de 1% em cada ano, ou seja, no final dos 20 anos (período de vida útil do sistema) existe um crescimento total de 22% no volume de tráfego. Ainda no cálculo do VAL, a *Waydip* prevê a manutenção dos equipamentos de ano a ano, com um custo que corresponde a 1% do custo de produção dos módulos. Tendo em conta estas considerações, verificou-se

que o custo de instalação e de produção teria de ser inferior a 1571,93 € para o sistema piloto de forma a não dar prejuízo às entidades que financiam este projecto.

Como se pôde verificar, é um valor um pouco baixo devido a vários aspetos. Trata-se de uma avaliação de um sistema piloto, ou seja, o importante não seria verificar a rentabilidade do sistema mas sim a durabilidade e o comportamento das componentes expostas à agressividade do tráfego rodoviário. Por isso optaram por um local que não colocasse em causa os interesses dos utentes, em detrimento de tentar tirar um melhor aproveitamento desta tecnologia. Esta avaliação não teve em conta o benefício dos impactos ambientais. Mesmo que ao fim de 20 anos exista um prejuízo residual, este sistema tem que ser visto também como uma mais-valia em termos ecológicos e não apenas centralizando as atenções em valores monetários.

Por último, é um sistema embrionário e como todas as novas tecnologias é um sistema que enfrenta um período de melhoramentos. Nos próximos anos esta tecnologia estará certamente num patamar muito superior em termos de rendimento. Atualmente a Waydip pretende otimizar os módulos utilizados na fase piloto, de forma a aumentar a rentabilidade e em simultâneo tornar o sistema mais leve e sem que haja necessidade em utilizar as peças de betão armado na instalação, de maneira a tornar mais fácil as técnicas de construção e também para diminuir o custo da obra e do próprio sistema.

Desta forma, numa segunda abordagem ao problema, vai-se estimar quanto teria que ser o custo de produção numa situação em que esta configuração dos módulos seja instalada num local ideal, nomeadamente antes de uma *Speed Bump*, de maneira a que todos os veículos necessitem de travar e numa via em que exista um volume de tráfego maior do que na via em que o sistema piloto foi implementado.

Baseando a previsão do tráfego para a nova abordagem no diagrama de veículos que circulam na Alameda Pêro da Covilhã, calculou-se um índice que é obtido através da relação entre o total de veículos ligeiros por dia e o maior número de veículos ligeiros da hora de ponta (das 14:00 às 15:00 horas). Este índice serve para determinar o número total de veículos ligeiros por dia, sabendo apenas o número de veículos na hora de ponta. O índice obtido é de 13. Para se aplicar este sistema numa via com um tráfego razoável na hora de ponta, considera-se que a essa hora circulem 800 uvl/h, número que representa quase duas vezes mais do que acontece na Alameda Pêro da Covilhã. Então, através da multiplicação pelo índice determinado, obtém-se um tráfego médio diário de 10400 uvl. Utilizou-se o mesmo método para determinar os veículos pesados, onde se obteve um índice de 22. Neste caso utilizou-se apenas um fator de 1,5 para aumentar os veículos na hora de ponta.

Para simular o facto de haver sempre travagem sobre os módulos, utilizaram-se os valores dos veículos com uma massa de 2000 kg a circular a uma velocidade média de 40 km/h. Para os

veículos pesados, usou-se o mesmo valor de energia estimado usado anteriormente.

Quadro 3.6 – Dados da energia gerada da segunda abordagem

Nº Módulos	10
Energia (40km/h e 2000 kg)	196 J
Energia (30 km/h e 9000 kg)	600 J

Manteve-se o mesmo crescimento do tráfego, a mesma taxa de atualização e a manutenção recomendada pela *Waydip*.

Quadro 3.7 – Resultados do número de veículos ligeiros e de pesados e respetiva energia gerada e os seus benefícios monetários da segunda abordagem

	Dia	Ano
Ligeiros (uvt)	10400	$3,80 \times 10^6$
Pesados (uvt)	660	$2,41 \times 10^5$
Energia (J)	$2,43 \times 10^7$	$8,89 \times 10^9$
Energia (kwh)	6,76	2468,21
Euros	1,01	370,23

Para se realizar a análise de custos e benefícios é necessário calcular uma previsão do custo total da operação. Após o que se observou durante os dias de trabalho na aplicação do sistema na Covilhã, chega-se à conclusão que a implementação do sistema consegue ser realizada em 3 dias e não em 5 dias, se houver mais mão-de-obra, e se as técnicas de construção estiverem mais consolidadas entre os trabalhadores.

Segundo o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde especifica os custos, consegue-se obter uma previsão para os custos da operação (Quadro 3.8).

Quadro 3.8 – Custo de cada operação para uma configuração do sistema como na fase piloto

Descrição da Operação	Custo
Abertura da caixa no pavimento	237,60
Transporte de terras a 2 km do local	164,59
Compactação do solo	57,30
Colocação das peças de betão	383,28
Colocação do Betume	973,41
Total	1816,18

€

Através da análise de custos e benefícios concluiu-se que, para não dar prejuízo à entidade investidora, o custo total de produção dos módulos tem que ser inferior a 4130,00 €. Que corresponde a 413,00 € por módulo, um valor já bastante aceitável e próximo dos valores que neste momento estão a ser idealizados para os futuros módulos da *Waydip*.

3.6 Potencialidades do Sistema da *Waydip*

Nos últimos anos a microgeração de energia tem vindo a crescer, no sentido de desenvolver novas tecnologias que permitem gerar energia renovável no local onde é consumida, ou posteriormente vendida à rede. São tecnologias que ainda estão numa fase de amadurecimento e de aceitação pela generalidade da população.

O sistema da *Waydip* é uma tecnologia que promete aumentar esse leque de escolhas dentro da microgeração. Distingue-se das restantes por se tratar de um sistema de geração de energia que não depende diretamente das condições climáticas.

A investigação que decorre no momento tem por objetivo a otimização das componentes eletromecânicas dos módulos da fase piloto. Essa reformulação do sistema passa por aumentar o rendimento na produção de energia, ao mesmo tempo que se procura por soluções com menor custo. Procura-se, também, diminuir as dimensões dos módulos de forma a facilitar a sua aplicação nos pavimentos rodoviários, fazendo com que os custos de instalação sejam menores. Assim, nos próximos anos, esta ideia inovadora tem tudo para ser rentável em termos económicos e vantajosa para qualquer entidade investidora.

Como a produção de energia do sistema *Waynergy Vehicles* depende do número de veículos existente no local onde se pretende gerar energia, esta tecnologia pode ser associada à engenharia de tráfego, tornando a ideia mais apelativa.

Através de uma programação que consiga interpretar as quantidades geradas por cada passagem de veículo, de forma a conseguir contar o número de veículos e separando os veículos ligeiros dos pesados, obtem-se informação muito precisa da evolução do Tráfego Médio Diário Anual de pesados (TMDAp) ao longo do tempo. Esta informação será muito útil na altura em que se necessite de intervir no pavimento e durante a aplicação de um Sistema de Gestão de conservação dos Pavimentos rodoviários (SGP).

Com essa informação conseguia-se diminuir os erros que normalmente se têm durante a previsão do TMDAp para o ano zero e a estimativa da taxa de crescimento do TMDAp para os anos seguintes. O aumento da precisão destes dados faz com que as intervenções futuras na via onde está instalado o sistema estejam mais próximas da realidade, o que conduz a uma diminuição dos custos e a uma melhor racionalização entre os custos e as intervenções.

Como este sistema da *Waydip* vai ser instalado em vias onde o volume de tráfego é elevado,

faz com que ainda seja mais relevante essa informação para um SGP, pois as vias de maior importância nesta metodologia são precisamente as que têm um maior volume de tráfego.

Outra característica que se pode incorporar neste sistema de forma a tornar este investimento mais útil e apelativo é introduzir um sensor, por exemplo, um botão numa das zonas onde a placa do módulo encosta quando esta desce totalmente para que consiga dar informação ao computador que a placa desceu, ou que continua pressionada. Assim, o sistema conseguia comunicar a presença ou não de veículos parados sobre os módulos. Oferecendo esta simples característica aos módulos, estes passavam a ter a mesma funcionalidade dos sensores de presença que são usados nas soluções atuadas nos semáforos, mas tinham a vantagem de conseguirem ao mesmo tempo gerar energia para tornar os semáforos autossuficientes do cruzamento em questão, sem depender das condições climáticas.

De forma a se entender como pode funcionar um cruzamento semaforizado com a atuação dos módulos da *Waydip*, considerou-se na Figura 3.27, um cruzamento tipo, com um volume relevante nas viagens à esquerda, nos movimentos A-D e B-C.

O fundo azul refere-se a localização dos módulos. A extensão dos módulos deve ser superior ao comprimento médio formado pelas filas na hora de ponta, de forma a conseguir detetar os veículos que estejam parados durante o tempo de vermelho e os que se aproximam. Todos os semáforos têm que ter um tempo mínimo (t_{\min}) que decorre dentro do tempo da fase (t_{fase}) ou tempo máximo (t_{\max}). O t_{\min} depende da estratégia adotada na programação do sensor com o semáforo. Pode ser entre 8 e 10 segundos, mais a extensão (ext), entre 2 e 5 segundos, referente ao tempo em que o semáforo fica na expectativa de aproximação de outros veículos. Também pode ser igual a 0, numa fase secundária, quando o semáforo está à espera que qualquer um dos outros sensores seja ativado. E ainda, pode não existir t_{\min} , ou seja, haver apenas um t_{fase} ou $t_{\min} = t_{\text{fase}}$.

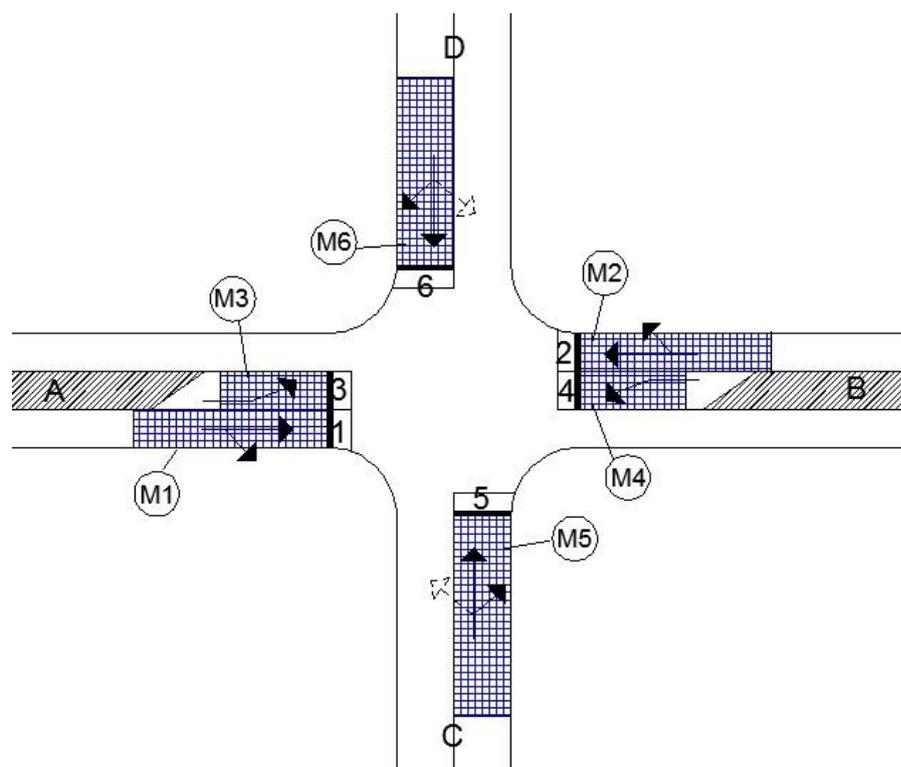


Figura 3.27 – Cruzamento tipo com a localização dos módulos da *Waydip*

Observando a Figura 3.28, considera-se que a primeira fase é constituída pelos movimentos dos semáforos 1 e 2, a segunda fase pelos movimentos dos semáforos 3 e 4 e a terceira fase pelos movimentos dos semáforos 5 e 6.

Na primeira fase, se após o t_{\min} os módulos não detetarem qualquer movimento, a primeira fase pode ser finalizada antes de concluir o t_{fase} ou o t_{\max} . Mas esta fase só termina se as superfícies dos módulos, dos movimentos 3 e 4, estiverem em baixo. Se não estiverem pode-se saltar a segunda fase e passar para a terceira fase. Se na terceira fase os módulos não estiverem carregados, continua-se na primeira fase até que os módulos das fases seguintes detetem algum movimento. Esta lógica mantém-se para qualquer das fases em que se encontra o ciclo.

Na Figura 3.28 apresentada, o cardinal (#) representa a continuação da fase em que se encontra, mas com a particularidade de se tratar de uma fase secundária, ou seja, continua-se nessa fase por um tempo infinito, até que seja carregado algum dos módulos das fases seguintes. As setas esquemáticas a preto representam a mesma resposta à pergunta para duas fases. A ext especificada na Figura 3.28, refere-se ao caso de se estender, ou não, a respetiva fase após o t_{\min} .

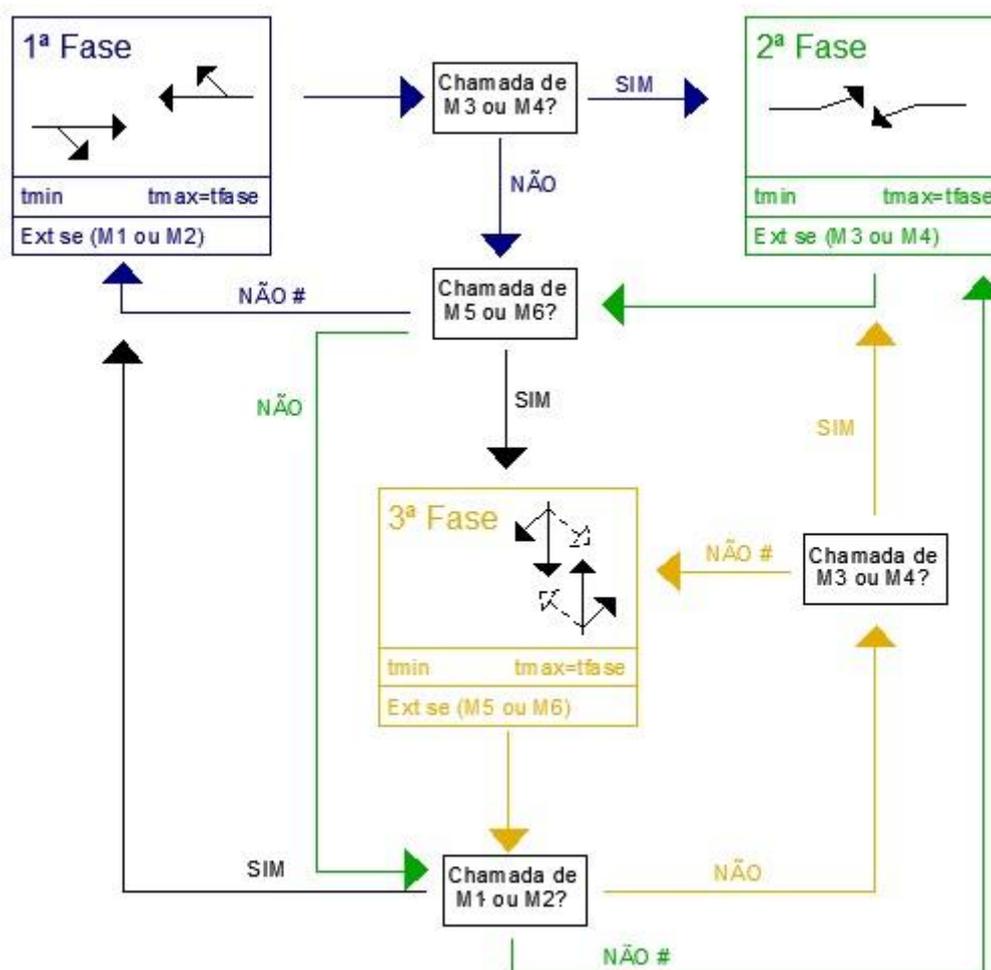


Figura 3.28 – Plano para o cruzamento considerado com atuação dos módulos da *Waydip*

Os módulos também podem dar a informação da presença de um autocarro enquanto decorre o período de vermelho. Um autocarro é um veículo longo, logo a distância entre os eixos é superior do que no caso de qualquer veículo ligeiro. Em relação aos veículos pesados, do que se observou na Alameda Pêro da Covilhã, a maior parte deles não eram veículos longos. Mesmo que existam veículos pesados longos, certamente que numa zona urbana não são comparáveis com o número de passagens de autocarros.

Portanto, imaginando que um autocarro está parado em cima da configuração dos módulos, vão haver vários módulos seguidos que não vão estar carregados por causa da distância entre os eixos, ou seja, se houver um intervalo seguido de módulos que não estão carregados e haver outros que estão, o sistema pode interpretar isso como se se tratasse de um autocarro. Assim, o sistema logo após interpretar essa situação, quando terminasse o t_{min} na fase em que se encontra o ciclo, pode dar ordem ao sistema semaforizado para saltar as seguintes fases no sentido de servir a fase onde se encontra o autocarro parado, dando prioridade ao autocarro.

O sistema da *Waydip* também pode ser implementado em parques de estacionamento, não com o objetivo de gerar grandes quantidades de energia, mas apenas por uma questão de gestão do próprio parque.

Colocando este sistema nas entradas e nas saídas do parque é possível fazer o balanço entre o número de veículos que entram e os que saem. Desta forma, consegue-se obter a lotação do parque de estacionamento. Essa informação pode ser divulgada através de um placar informativo eletrónico, num local antes da decisão de entrar ou não no parque em questão, para que todos os condutores, antes de entrarem, tenham a consciência da dificuldade que existe ou não na procura de um lugar para estacionar. Para além disso, com um número adequado de módulos, conseguia-se tornar o painel eletrónico autossuficiente.

Esta ideia seria mais vantajosa se fosse aplicada em parques de estacionamento gratuitos, pois nos pagos já existe um controlo de quem entra e sai devido ao facto de se cobrarem por isso.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Durante a apresentação do estado da arte relativo à geração de energia nos pavimentos rodoviários, foi possível constatar que a tecnologia que apresenta maior produção de energia elétrica corresponde aos geradores eletrocínéticos ou os hidráulicos. É o tipo de tecnologia onde se enquadra o sistema da empresa *Waydip*.

Após a análise dos resultados experimentais, foi possível concluir que este sistema deve ser instalado em locais onde seja possível controlar de forma indireta a velocidade de circulação dos veículos, nomeadamente em zonas de cedência de passagem. Os módulos devem estar implementados em zonas onde a velocidade de circulação se situe entre os 30 e os 50 km/h, de maneira a fazer o maior aproveitamento possível da capacidade de produção de energia do sistema. Além do mais, deve ser colocado em zonas de travagem para aumentar a pressão exercida e, conseqüentemente, aumentar a velocidade de rotação do veio do gerador de forma a gerar mais energia.

Também se pôde concluir que a variação do deslocamento da superfície móvel do módulo deve situar-se entre os 10 e os 15 mm, pois para variações menores do que 10 mm existe uma grande diferença negativa na geração de energia. Para deslocamentos superiores a 15 mm, a variação de energia produzida, apesar de ser positiva, não é compensatória. Além disso, chegou-se à conclusão que a superfície dos módulos deve ser plana em detrimento da côncava.

De acordo com as velocidades ótimas para se obter a maior eficiência do sistema, e por questões de segurança e conforto, este sistema não deve ser instalado em autoestradas, ou vias coletoras e distribuidoras principais fora das zonas urbanas.

Tendo em conta que, quanto maior for o volume do tráfego a circular sobre os módulos, maior a energia gerada, este deve ser instalado em distribuidoras principais em zonas urbanas, em detrimento das restantes vias locais.

Portanto, antes de se proceder à instalação do sistema deve haver um estudo da rede viária da zona urbana em questão, no sentido de se perceber quais os locais que possam apresentar um volume de tráfego significativo, tendo em conta todas as considerações expostas até ao momento.

Se o objetivo for maximizar a produção de energia, estes sistemas devem ser colocados na zona de desaceleração, antes de uma *speed bump* que proporcione a redução da velocidade dos veículos até aos 30 km/h.

Mas visto que nem sempre é possível instalar uma *speed bump* numa distribuidora principal, este sistema também pode ser implementado nas entradas das rotundas e nas entradas dos cruzamentos semaforizados. Mas para tirar melhor proveito do sistema, este deve ser instalado em rotundas em detrimento dos cruzamentos semaforizados, pois perante o funcionamento normal de uma solução semaforizada, prevê-se que não seja tão rentável (a nível das quantidades produzidas de energia) a sua instalação, em comparação com o que pode acontecer na entrada de uma rotunda.

Para um tráfego médio diário de 10400 uvl, através da análise de custos e benefícios, chegou-se à conclusão que os próximos módulos da *Waydip*, para serem comercializados, deverão ter um custo de produção na ordem dos 413,00 euros, de maneira a que o sistema seja economicamente viável. Várias ideias foram sugeridas de forma a tornar este sistema mais apelativo e mais rentável. As ideias consistiram em incorporar componentes ao sistema da *Waydip* para que no futuro se consiga monitorizar o tráfego e se possa substituir os atuais sensores de presença usados nas soluções atuadas nos semáforos, entre outras. Desta forma o sistema poderia ser visto de forma mais rentável para os cruzamentos semaforizados.

Durante o decorrer da realização da presente dissertação, mas principalmente na fase final, constatou-se que existe muito trabalho para se realizar no sector da Engenharia Civil relativamente ao sistema estudado da *Waydip*. Este sistema requer mais investigação para se encontrar o tipo de revestimento a ser usado nas superfícies dos módulos, de forma a garantir segurança aos veículos que por ele circulam, e a aderência entre esse material e o alumínio da superfície móvel do módulo. Também seria interessante comparar a extensão necessária do conjunto dos módulos, as velocidades de passagem sobre os mesmos, o número de veículos que não tiram o aproveitamento máximo do sistema, variando o volume de tráfego, para uma interseção semaforizada e para uma rotunda, recorrendo à microsimulação. Para além do mais, este sistema necessita de mais resultados experimentais, como por exemplo, para veículos com uma massa intermédia (entre os 1350 e os 2000 kg) e para uma massa superior aos 5000 kg analisados, para uma situação onde existe a passagem consecutiva de vários veículos, para situações de travagem e aceleração sobre os módulos e para situações em que o veículo para sobre os módulos durante diferentes períodos de tempo e depois retoma o movimento. Estes resultados ajudavam a compreender o comportamento dos módulos para certas situações impostas pelo ambiente rodoviário.

5 REFERÊNCIAS

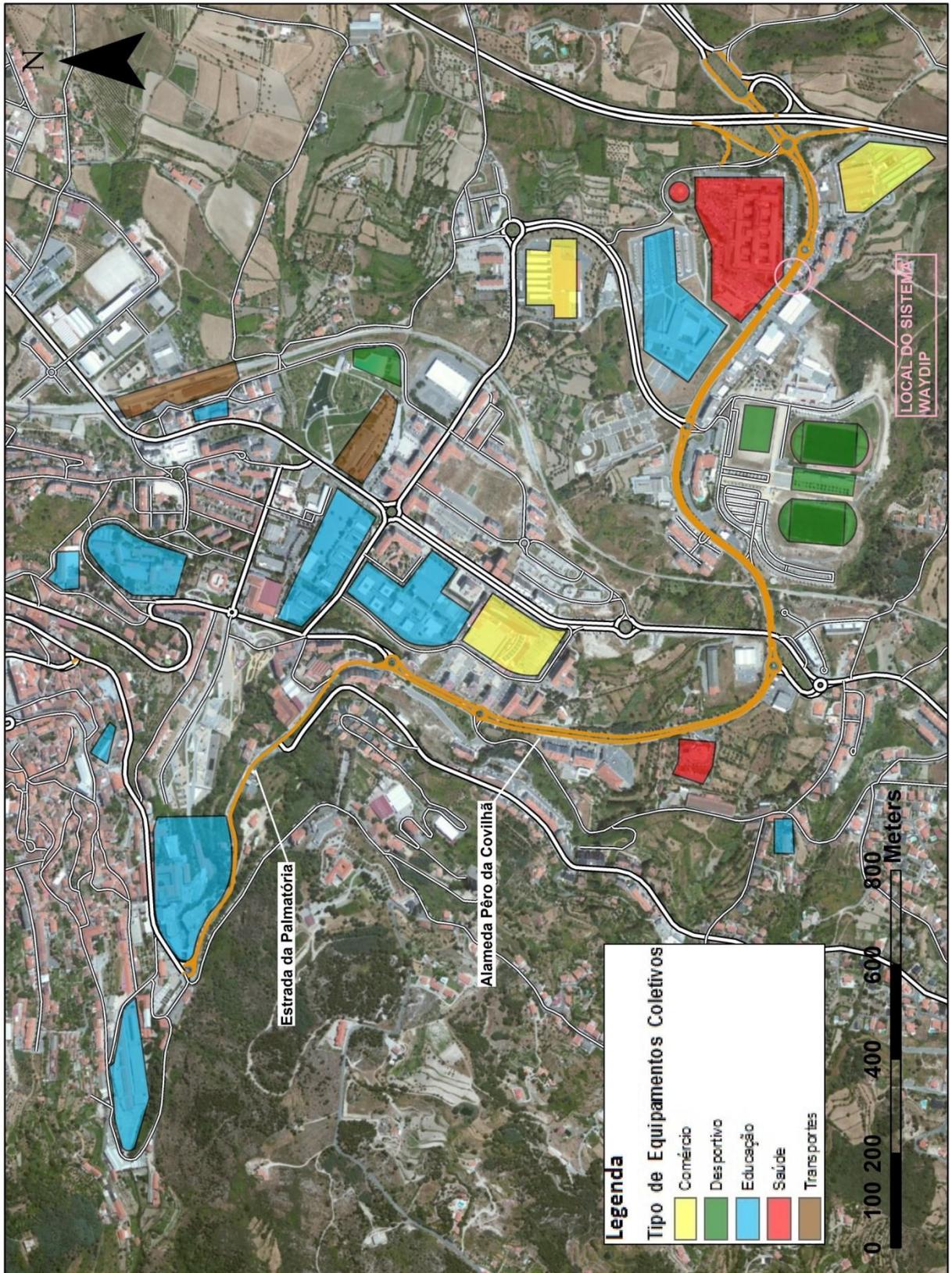
- Andriopoulou, S., (2012), “Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure”, Tese de Mestrado, Sem referência à Instituição.
- Asaeda, T., Ca, V.T., Wake, A., (1996), “Heat Storage of pavement and its effect on the lower atmosphere”, *Atmospheric Environment*, Vol. 30, Issue 3, pp. 413-427.
- Asaeda, T., Ca, V.T., (2000), “Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment”, *Building and Environment*, Vol. 35, Issue 4, pp. 363-375.
- Beeby, S.P., Tudor, M.J., White, N.M., (2006), “Energy harvesting vibration sources for Microsystems applications”, *Journal of Measurement Science and Technology*, Issue 17, pp. 175-195.
- Bondt, A. and Jansen, R., (2006), “Generation and saving of energy via asphalt pavement surfaces”.
- CM-COVILHA @ (2013). <http://www.cm-covilha.pt/> . Câmara Municipal da Covilhã, Portugal. Acesso em Novembro de 2013.
- Chen, M., Hong, J., Wu, S., Wan, L., Xu, G. (2011), “Optimization of Phase Change Materials Used in Asphalt Pavement to Prevent Rutting”, *Journal of Advanced Materials Research*, Vol. 219-220:1375-1378.
- Chiasson, A.D., Spitler, J.D., (2000), “A model for simulating the performance of a pavement heating system as a supplemental heat rejecter with closed-loop ground-source heat pump systems”, *Journal of Solar Energy Engineering*, Issue 122, pp. 183-191.
- DR. Estratégia Nacional Energética. Resolução da Legislação da Republica, Dec. Lei 33/2010, Issue 73, pp. 1289-1296.
- Duarte, F., Casimiro, F., (2011), “Pavimento sustentável para geração de energia elétrica a partir do movimento de pessoas e veículos”, Instituto Nacional da Propriedade Industrial, PT 105126.
- Duarte, F., Casimiro, F., Correia, D., Mendes, R. and Ferreira, A. (2013), “Waynergy People: a new pavement energy harvest system”, *Municipal Engineer (ISI Journal)*, Institution of Civil Engineers, 166 (4), 250-256.
- Duarte, F., Casimiro, F., Correia, D., Mendes, R., Ferreira, A. (2013), “A new pavement energy harvest system”, *Proceedings of the International Renewable and Sustainable Energy Conference*, CD Ed., irsec13_paper_37.pdf, pp. 1-6, Ouarzazate, Morocco.
- ECOCHOICE @ (2014). <http://www.ecochoice.pt/iad/active-floor/> . ECOCHOICE - Active Floor - Think Energy, Portugal. Acesso em Janeiro de 2014.
- Edmison, J., Jones, M., Nakad, Z., Martin, T., (2002), “Using piezoelectric materials for wearable electronic textiles”
- Ferreira, A. (2012), “Briefing: Recent developments in pavement energy harvest systems”, *Municipal Engineer (ISI Journal)*, Institution of Civil Engineers, 165 (4), 189-192.
- Ferreira, A., (2012), “Apontamentos teóricos”, *Disciplina Engenharia de Infraestruturas de Transporte*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

- Gao, Q., Huang, Y., Li, M., Liu, Y., Yan, Y.Y., (2010), “Experimental study of slab solar collection on the hydronic system of a road”, *Solar Energy*, Issue 84, 2016-2102.
- Geofabrik @ (2013). <http://www.geofabrik.de/> . Geographic Information Systems, Germany. Acesso em Outubro de 2013.
- Golden, J.S., Carlson, Kaloush, E.K., Phelan, P., (2007), “A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures”, *Journal of Solar Energy*, Issue 81, pp. 872-883.
- Google Maps @ (2013). <https://maps.google.pt/> , Portugal. Acesso em Outubro de 2013.
- Hasebel, M., Kamikawa, Y., Meiarashi, S., (2006), “Thermoelectric generators using solar thermal energy in heated road pavement”, 25th International Conference on Thermoelectrics (ICT), Vienna, Agosto 2006.
- Herb, W. R., Janke, B., Mohseni, O., Stefan, H.G., (2008), “Ground surface temperature simulation for different land covers”, *Journal of Hydrology*, Vol. 356, Issue 3-4, pp. 327-343.
- Innowattech @ (2014). <http://www.innowattech.co.il/> . Innowattech – Energy Harvesting Systems, Israel. Acesso em Janeiro de 2014.
- Instituto Nacional de Estatística @ (2013) <http://www.ine.pt/> . Statistics Portugal, Portugal. Acesso em Outubro de 2013.
- Julia, E., (2011), “Conception d’un système pour la recuperation de l’énergie thermique des chaussées”, Projet d’Initiaton à la Recherche et Développement, Département Génie Énergétique et Environnement, Institu National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, pp. 13-25.
- Kang-Won, W., Correia, A.J., (2010), “A pilot study for investigation of novel methods to harvest solar energy from asphalt pavements”, Korea Institute of Construction Technology (KICT).
- Kinergy Power @ (2014). <http://www.kinergypower.com/> , Kinergy Power – Energy Carpet, USA. Acesso em Janeiro de 2014.
- Liu, X.B., Rees, S.J., Spitler, J.D., (2007), “Modeling snow melting on heated pavement surfaces”, *Applied Thermal Engineering*, Issue 27, pp. 1115-1124.
- MEID. Legislação Portuguesa Dec. Lei 141/2010, 31 de Dezembro (2010). Ministério da Economia, Inovação e do Desenvolvimento, Diário da República, Issue 235, pp. 6093-6098.
- Menezes, M., “Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise da segurança do tráfego”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Metropolismag @ (2007). <http://www.metropolismag.com/January-2007/The-New-Jersey-Barrier/> . Metropolis Magazine, USA. Acesso em Janeiro de 2014.
- Morino, H., Konishi, Y., (1982), “Heat recovery system with low temperature difference. Brevet JP 6147566 (A), 27 Maio 1994.
- New Energy Technologies, Inc @ (2014). <http://www.newenergytechnologiesinc.com/> , New Energy Technologies, Inc – Innovating Alternative and Renewable Energy Solutions, USA. Acesso em Janeiro de 2014.
- Nordmann, T., Clavadetscher, L., (2004), “PV on Noise Barriers”, *Journal of Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Issue 12, pp. 485-495.

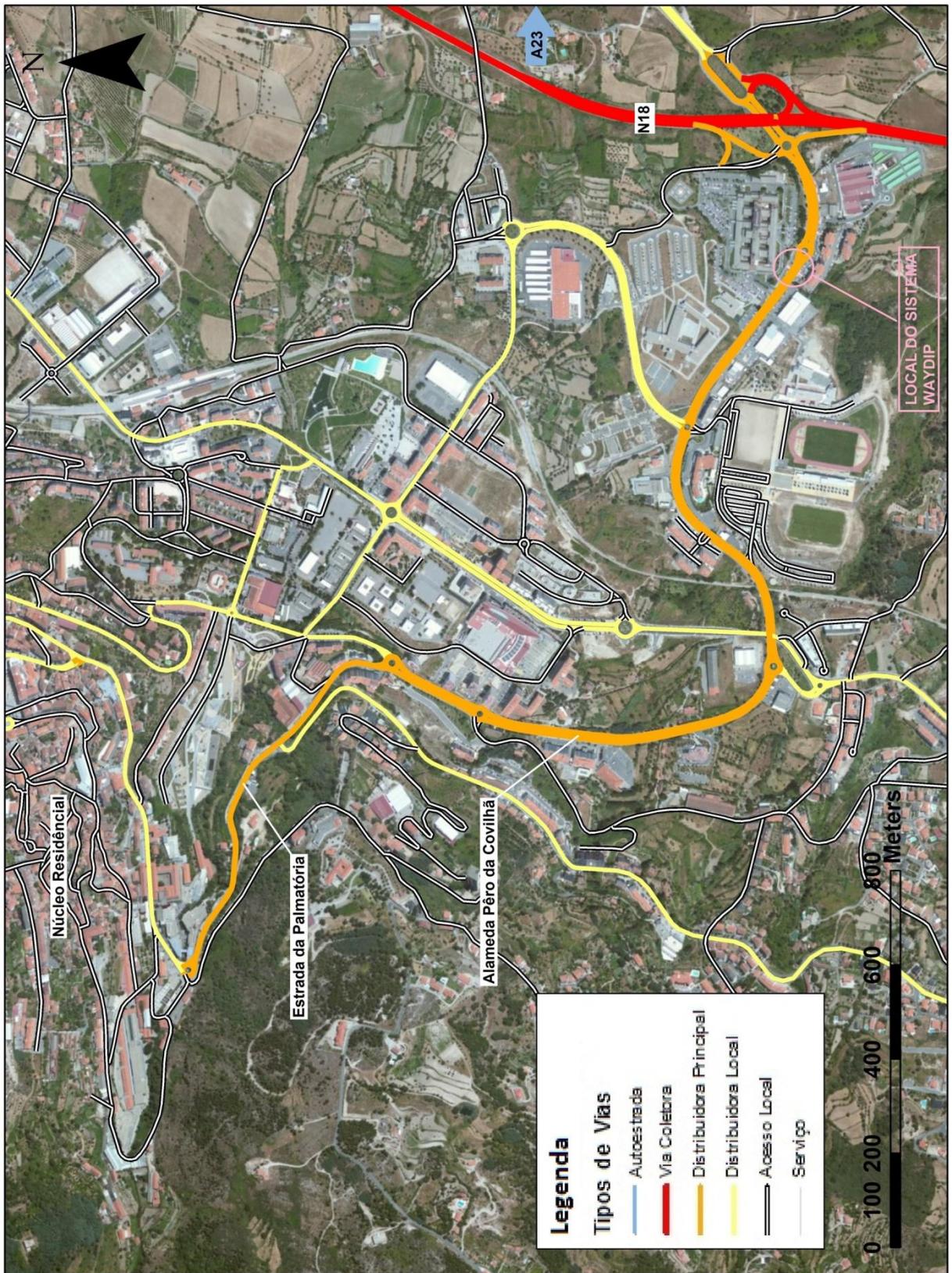
- Nordmann, T., Froelich, A., Goetzberger, A., Kleiss, G., (2000), “The potential of PV Noise Barrier Technology in Europe”, Proceedings at the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, Maio.
- Onyx Solar @ (2014). <http://www.onyx-solar.com/>, Spain. Acesso em Janeiro de 2014.
- Open Street Map @ (2013). <http://www.openstreetmap.org/>. Acesso em Outubro de 2013.
- Pavegen@ (2014). <http://www.pavegen.com/>. Pavegen Systems - generating energy from footsteps, England. Acesso em Janeiro de 2014.
- Seco, A., Bastos, A., (2012), “Apontamentos tóricos”, Disciplina Seminário de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Shkrebtii, A., Kryuchenk, Y.V., Kupchak, M., GasRari, F., Sachenk, A.V., Sokolovskyi, O., Kazakevitch, A., (2008), “Hydrogenated Amorphous silicon (A-SI:H) based solar cell: Material characterization and optimization, IEEE.
- SNSV @ (2014). <http://www.snsv.pt/>. Sociedade Nacional de Sinalização Vertical, Lda, Portugal. Acesso em Janeiro de 2014.
- SR. Solar Roadways @ (2014). <http://www.solarroadways.com/main.html>. Solar Roadways, USA. Acesso em Janeiro de 2014.
- TNO @ (2014). <https://www.tno.nl/index.cfm/>. Organization for Applied Scientific Research, Netherlands. Acesso em Janeiro de 2014.
- UP Gen@ (2014). <http://www.upgen.it/>. Underground Power, Italy. Acesso em Janeiro de 2014.
- Van Bijsterveld, W.T., Houben, L.J.M., Scarpas, A., Molenaar, A., (2007), “Using pavement as solar collector. Effect on pavement temperature and structural response”, Transportation Research Board, Vol. 1778/2001, pp. 140-148.
- Voigt, T., Ritter, H., Schindler, J., (2003), “Utilizing solar Power in Wireless sensor Networks”, Proceedings of the 28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, Issue 20-24, pp. 416-422.
- Wang, H., Wu, S.P., Chen, M.Y., Zhang, Y., (2010), “Numerical simulation on the thermal response of heat-conduction asphalt pavements”, Physica Scripta, T139.
- Waydip @ (2014). <http://www.waydip.com/>. Waydip – Energia e Ambiente, Lda, Portugal. Acesso em Janeiro de 2014.
- Wischke, M., Masur, M., Kroer, M., Woias, P., (2011), “Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes”, Journal of Smart Materials and Structures, Issue 20, pp. não definidas.
- Wu, G., Yu, X. (2011) “Thermal Energy Harvesting Across Pavement Structure”, Transportation Research Board (TRB), Annual Meeting, Washington, USA, Janeiro de 2012.
- Wu, S.P., Chen, M.Y., Wang, H., Zhang, Y., (2009), “Laboratory study on solar collector of thermal conductive asphalt concrete”, International Journal of Pavement Research and Technology, Issue 2, pp. 130-136.
- Wu, S.P., Chen, M.Y., Zhang, Y., (2011), “Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs”, Applied Thermal Engineering.
- Xiong, H., Wang, L., Wang, D., Druta, C., “Piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 5, Issue 5, pp. 333-337.

Zhao, H., Yu, J., Ling, J., (2010), “Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement”, Journal of the Ceramic Society of Japan, Issue 118, pp. 909-915.

ANEXO A



ANEXO B



ANEXO C

