

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

JULIANO ADORNO MAIA

Viabilidade técnica e econômica de microusinas piezoelétricas em centros urbanos com grande circulação de pedestres

Goiânia, 2021.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Juliano Adorno Maia

Matrícula: 20182011140119

Título do Trabalho: Viabilidade técnica e econômica de microusinas piezoelétricas em centros urbanos com grande circulação de pedestres

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/_____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Local

Goiânia , 11 / 12 / 2021.

Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

JULIANO ADORNO MAIA

Viabilidade técnica e econômica de microusinas piezoelétricas em centros urbanos com grande circulação de pedestres

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes

Coorientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto

Goiânia, 2021.

M28v Maia, Juliano Adorno.

Viabilidade técnica e econômica de microusinas piezoelétricas em centros urbanos com grande circulação de pedestres / Juliano Adorno Maia. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

104 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes.

Coorientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Energia limpa. 2. Piezoeletricidade. 3. Contagem de pedestres. I. Gomes, Raphael de Aquino (orientador). II. Pinheiro Neto, Daywes (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 621.042

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Karol Almeida da Silva Abreu CRB1/ 2.740
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

PARECER 20/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

JULIANO ADÔRNO MAIA

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE MICROUSINAS PIEZOELÉTRICAS EM CENTROS URBANOS COM GRANDE
CIRCULAÇÃO DE PEDESTRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Aprovada em: 11/11//2021

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Raphael de Aquino Gomes – PPGTPS IFG

Coorientador: Prof. Dr. Daywes Pinheiro Neto – PPGTPS IFG

Avaliador Externo: Prof. Dr. Marcos Paulino Roriz Junior – UFG

Avaliador Interno: Prof. Dr. José Luis Domingos – PPGTPS IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- Marcos Paulino Roriz Junior, MARCOS PAULINO RORIZ JUNIOR - OUTROS - UFG (01567601000143), em 16/12/2021 13:45:39.
- Daywes Pinheiro Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/11/2021 17:00:48.
- Jose Luis Domingos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/11/2021 12:51:09.
- Raphael de Aquino Gomes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/11/2021 12:11:32.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 11/11/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 217880

Código de Autenticação: fe19a3e04e



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110

(62) 3227-2811 (ramal: 2811)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Ciência que luta diariamente para que a humanidade possa ter mais conforto e que possamos viver num mundo com menos desigualdades.

Dedico também aos meu pais, Antônio Fernando Vieira Maia e Marlene Batista Adorno Maia, que sempre foram motivadores e incentivadores dos meus estudos, ao meu irmão Luciano Adorno Maia e a minha vó Terezinha Vieira Maia que de diversas maneiras estiveram comigo em toda a minha caminhada acadêmica.

Dedico principalmente à pessoa que me faz crer que tudo vale a pena, minha filha Alice Reis Maia, que é a grande motivadora para que eu pudesse dar continuidade aos meus estudos para contribuir mesmo que minimamente para que exista um mundo melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade que o Instituto Federal de Goiás me proporcionou, principalmente na pessoa de Raphael de Aquino Gomes, que foi fundamental para que eu conseguisse realizar este trabalho, com a sua brilhante atuação como orientador. Agradeço também o apoio e ajuda do coorientador deste trabalho Daywes Pinheiro Neto, que em alguns momentos foi crucial para o desfecho deste trabalho. Agradeço ainda o apoio de Sabrina Leles de Lima Miranda, minha chefe imediata, sempre compreensiva nos momentos em que tive que me dedicar à produção técnica. Agradeço o apoio e motivação da minha esposa, Shirlieny Silva Borges Maia, que esteve ao meu lado em boa parte do desenvolvimento deste trabalho e que foi meu esteio e pilar de sustentação nos momentos difíceis que enfrentei nesta caminhada.

"Não existem métodos fáceis para resolver problemas difíceis."

René Descartes,
1596-1650.

RESUMO

Título: Viabilidade técnica e econômica de microusinas piezoelétricas em centros urbanos com grande circulação de pedestres

Autor: Juliano Adorno Maia

Orientador: Dr. Raphael de Aquino Gomes

Coorientador: Dr. Daywes Pinheiro Neto

A produção de energia oriunda de fontes ditas limpas se destaca atualmente como uma das principais preocupações nos diferentes setores econômicos. Dentre as formas de energia limpa existe uma ainda pouco explorada que converte a energia mecânica em elétrica, usando materiais piezoelétricos. Este tipo de produção pode se beneficiar do intenso fluxo de pedestres em centros urbanos de grandes metrópoles através de placas contendo células piezoelétricas, instaladas nas calçadas. Contudo, é necessário oferecer mecanismos que permitam analisar a viabilidade técnica e econômica desta categoria de geração. Diante disso, uma ferramenta computacional que automatiza a contagem de pedestres nos supostos locais de instalação de microusinas piezoelétricas e, com base neste e outros parâmetros definidos para o projeto, oferece uma análise de viabilidade técnica e econômica do projeto proposto. É apresentado o projeto e implementação da ferramenta proposta, o que inclui o método computacional usado para a contagem de pedestres, configuração das células piezoelétricas, metodologia de análise de viabilidade econômica e análise de sensibilidade dos principais parâmetros que afetam as análises de viabilidade técnica e econômica. Por meio de um estudo de caso no maior centro comercial de Goiânia - GO é realizada a validação e demonstração da ferramenta desenvolvida. O uso da ferramenta no estudo de caso considerado demonstrou a viabilidade técnica e econômica do desenvolvimento de microusinas desta modalidade em todos os cenários considerando duas placas geradoras, sendo inviável ao considerar apenas uma placa. A análise de sensibilidade também demonstrou que todas as variáveis consideradas afetam a viabilidade do projeto, sendo esta mais sensível à área da placa, quantidade de pedestres e à tarifa de energia. Espera-se com os resultados estabelecer referências e parâmetros para criar matrizes celulares geradoras de energia elétrica limpa, que poderão ser utilizadas em grandes centros urbanos, com intuito de dirimir os impactos ambientais gerados pelas fontes primárias, geralmente mais poluidoras.

Palavras-chave

energia limpa, piezoelectricidade, contagem de pedestres, viabilidade técnica e econômica.

ABSTRACT

Title: Proposal and evaluation of a computational tool for the economic viability analysis of alternative sources of electrical energy using piezoelectric cells

Author: Juliano Adorno Maia

Advisor: Dr. Raphael de Aquino Gomes

Coadvisor: Dr. Daywes Pinheiro Neto

The production of energy from so-called clean sources is currently highlighted as one of the main concerns in different economic sectors. Among the forms of clean energy there is a still little explored one that converts mechanical energy into electrical energy, using piezoelectric materials. This type of production can benefit from the intense flow of pedestrians in urban centers of large cities through plates containing piezoelectric cells, installed on sidewalks. However, it is necessary to offer mechanisms that allow analyzing the technical and economic feasibility of this generation category. Therefore, a computational tool that automates the counting of pedestrians in the supposed locations of installation of piezoelectric micro plants and, based on this and other parameters defined for the project, offers an analysis of the technical and economic feasibility of the proposed project. The design and implementation of the proposed tool is presented, which includes the computational method used for pedestrian counting, configuration of piezoelectric cells, economic feasibility analysis methodology and sensitivity analysis of the main parameters that affect the technical and economic feasibility analysis . Through a case study in the largest shopping center in Goiânia - GO, the developed tool is validated and demonstrated. The use of the tool in the case study considered demonstrated the technical and economic feasibility of developing micro-plants of this modality in all scenarios considering two generator plates, being unfeasible when considering only one plate. The sensitivity analysis also showed that all the variables considered affect the project's feasibility, which is more sensitive to the area of the plate, the number of pedestrians and the energy tariff. The results are expected to establish references and parameters to create cellular matrices that generate clean electricity, which can be used in large urban centers, in order to reduce the environmental impacts generated by primary sources, which are generally more polluting.

Keywords

renewable energy, piezoelectricity, pedestrian counting, technical and economic feasibility

LISTA DE FIGURAS

2.1	Imagem de um sensor PZT-5H.	33
2.2	Direções de Polarização, nas três dimensões de uma placa piezoelétrica em casos de compressão e tração.	34
2.3	Efeito piezoelétrico direto e inverso.	34
2.4	Esquema para a geração de energia usando a piezoeletricidade, com fornecimento e armazenamento da energia.	36
2.5	Funcionamento de um retificador, utilizado para transformar um sinal elétrico pulsado ou oscilado em um sinal contínuo.	37
2.6	Metodologia da análise de sensibilidade univariada.	41
3.1	Organograma relativo à metodologia do trabalho.	44
3.2	Disposição dos sensores PZT em uma placa de células piezoelétricas.	48
3.3	Exemplo de transdutor PZT.	49
3.4	Circuito modelado para simular nove sensores PZT.	49
3.5	Respostas dos circuitos das correntes internas I_c	50
3.6	Respostas dos circuitos das correntes total I_t e a tensão de saída V_c	52
3.7	Criação da delimitação e cálculo do centroide de cada objeto.	54
3.8	Cálculo da distância euclidiana entre cada par de centroides originais e novos centroides.	54
3.9	Método simples de <i>Object Tracking</i> com centroides associando as distâncias minimizadas.	55
3.10	Identificadores associados aos objetos detectados.	55
3.11	Exemplo de execução do componente de contagem de pedestres.	56
3.12	Início da execução do sistema de contagem de pedestres, escolha do ponto inicial para traçar a reta.	57
3.13	Escolha do segundo ponto na imagem, de modo que se possa traçar uma reta para a delimitação da área de contagem.	58
3.14	Término da execução do vídeo, com o relatório produzido após o processamento deste pelo sistema de contagem de pedestres.	59
3.15	Fluxograma com a descrição geral da ferramenta de análise econômica.	61
4.1	Imagem de Satélite que mostra a região do estudo de caso.	71
4.2	Imagem de satélite destacando o cenário do estudo de caso.	72
4.3	Imagens coletadas na região do shopping Mega Moda, usadas para a contagem de pedestres.	74
4.4	Comparação da contagem automática com a manual.	76
4.5	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 1, considerando uma placa.	81
4.6	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 2, considerando uma placa.	81
4.7	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 3, considerando uma placa.	82
4.8	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 4, considerando uma placa.	82
4.9	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 1, considerando duas placas.	83
4.10	Fluxo de caixa relacionado ao cenário 2, considerando duas placas.	84

4.11 Fluxo de caixa relacionado ao cenário 3, considerando duas placas.	84
4.12 Fluxo de caixa relacionado ao cenário 4, considerando duas placas.	84
4.13 Análise de sensibilidade variando a área da placa no cenário considerado.	86
4.14 Análise de sensibilidade variando a quantidade de placas instaladas na calçada analisada no cenário considerado.	87
4.15 Análise de sensibilidade variando a quantidade de pedestres que caminhem sobre a placa por hora no cenário considerado.	88
4.16 Análise de sensibilidade para avaliar o VPL variando o valor do <i>kWh</i> no cenário considerado.	89
4.17 Análise de sensibilidade para avaliar o VPL variando a taxa de atratividade no cenário considerado.	90

LISTA DE TABELAS

4.1	Comparação da contagem de pessoas manual e automática usando o sistema de contagem de pedestres.	75
4.2	Parâmetros piezoelétricos construtivos (custos)	77
4.3	Parâmetros piezoelétricos construtivos (características)	78
4.4	Descrição dos cenários considerados	79
4.5	Resultados da análise econômica com uma placa.	80
4.6	Resultados da análise econômica com duas placas.	83
4.7	Parâmetros base para a análise de sensibilidade do VPL	86

LISTA DE ALGORITMOS

3.1	viabilidade_economica	70
-----	-----------------------	-----------	----

LISTA DE CÓDIGOS DE PROGRAMAS

3.1	Arquivo de configuração da ferramenta computacional.	62
-----	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AER44	Associação Empresarial da Região da 44
CAFe	Comunidade Acadêmica Federada
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FNDTC	Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
HOG	<i>Histogram of Oriented Gradients</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IMUS	Índice de Mobilidade Urbana Sustentável
LEDs	<i>Light Emission Diode</i>
MAE	<i>Mean Absolut Error</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
P&D	Processo de Pesquisa e Desenvolvimento
PEE	Programa de Eficiência Energética
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PVDF	Polifluoreto de Vinilideno
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
QUCS	<i>Quit Universal Circuit Simulator</i>
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
SPICE	<i>Simulation Program Integrated Circuit Emphasis</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TJLP	Taxa de Juros de Longo Prazo
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TR	Taxa Referencial
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
VPL	Valor Presente Líquido
YOLO	<i>You Only Look Once</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

dpq	Distancia mínima entre dois pontos
FC_t	Fluxo de caixa no tempo
FC_0	Investimento inicial
t	Momento em que o fluxo de caixa ocorreu
i	Taxa de atratividade
VPL	Valor Presente Líquido
TMA	Taxa mínima de atratividade
PD	Período considerado para o retorno do investimento
n	Período considerado para o projeto
I_c	Corrente elétrica
x	Quantidade de execuções na contagem de pessoas
F	Força mecânica aplicada
Q	Campo elétrico
TIR	Taxa interna de retorno
z	Quantidade de sensores
d_c	Contagem manual por vídeo da amostra
f_c	Contagem automática por vídeo da amostra
c	Índice do conjunto de amostras
I_t	Corrente total
P	Distancia euclidiana
p_x	Ponto dimensional para distância euclidiana
q_x	Ponto dimensional para distância euclidiana
X	Coordenada cartesiana
Y	Coordenada cartesiana
V_p	Tensão de pico
ρ	Sinal retificado
T	Período total de um ciclo
C_t	Custo total do projeto
C_p	Custo de produção por placa
C_r	Custo do retificador
C_{ti}	Custo de total de implantação da placa
M_{pm}	Média do pé adulto masculino
M_{pf}	Média do pé adulto feminino
M_{pe}	Média do pé adulto do brasileiro
P_f	População feminina brasileira
P_m	População masculina brasileira
P_b	População total brasileira
A_{pe}	Área média de um pé adulto
A_s	Área aproximada de um sensor PZT-5H
Q_{pas}	Quantidade de passadas em relação ao comprimento da placa
l	Comprimento da placa

Q_{ph}	Quantidade de pedestres por hora
Q_s	Quantidade de sensores atingidos por um pe
Q_p	Quantidade de placas
τ	Potencia de cada sensor
p	Perdas
mt	Perdas pelo material piezoelétrico
g	Perdas na geração piezoelétrica
pm	Perdas na produção de energia
C_e	Custo do kWh
x_n	Entrada do sistema da análise de sensibilidade
y_n	Saída do sistema da análise de sensibilidade
α_n	Constante de entrada da análise de sensibilidade
tp	Tamanho das placas

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE ALGORITMOS	13
LISTA DE CÓDIGOS DE PROGRAMAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos	25
1.2 Estrutura do Trabalho	26
2 REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1 Contagem de Pedestres	27
2.2 Visão Computacional	29
2.3 Geração de Energia Piezoelétrica	32
2.3.1 Geração, distribuição e armazenamento usando piezoeletricidade em calçadas	35
2.3.1.1 Tapete Piezoelétrico	36
2.3.1.2 Retificador	36
2.3.1.3 Conversor	37
2.3.1.4 Bateria	38
2.3.1.5 Sistema de controle da unidade consumidora	38
2.4 Análise de Viabilidade Econômica	38
2.4.1 TMA	39
2.4.2 VPL	39
2.4.3 <i>Payback</i> descontado	40
2.4.4 TIR	40
2.4.5 Análise de sensibilidade	41
3 FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA EM SISTEMAS PIEZOELÉTRICOS	43
3.1 Metodologia utilizada para o desenvolvimento da ferramenta computacional proposta	43
3.2 Simulação de um circuito piezoelétrico	46
3.2.1 Modelo simulado no QUCS	47
3.3 Implementação de um componente para contagem de pedestres	52
3.3.1 Fluxo da contagem	57
3.3.1.1 Início da configuração	57

3.3.1.2	Delimitação da reta	58
3.3.1.3	Término da execução do vídeo	58
3.3.1.4	Relatório Final de execução	60
3.4	Análise da viabilidade econômica	60
3.4.1	Parâmetros de entrada e configuração	60
3.4.2	Cálculo dos custos e capital inicial	64
3.4.3	Geração de energia	65
3.4.4	Cálculo do fluxo de caixa	68
3.4.5	Cálculo dos indicadores de viabilidade econômica	69
4	ESTUDO DE CASO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA PROPOSTA	71
4.1	Coleta de dados e contagem de pedestres	72
4.2	Análise da viabilidade econômica	77
4.3	Resultado para os diferentes cenários do estudo de caso	79
4.3.1	Análise de sensibilidade	85
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
5.1	Trabalhos futuros	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica tem motivado a comunidade científica e tecnológica a procurar fontes alternativas de energia limpa e renovável. Esse caminho se torna irreversível quando se leva em consideração dois fatores principais: fim dos combustíveis fósseis e a preocupação com o meio ambiente.

Alternativas energéticas vem sendo estudadas desde os meados da década de 70 por diversos pesquisadores de instituições de pesquisa e centros tecnológicos no mundo. Isso se deve principalmente porque a crise do petróleo e a busca por fontes de energia menos nocivas ao meio ambiente foram grandes impulsionadoras nesta década para o despertar da Ciência sobre tal questão (SIMAS; PACCA, 2013).

Embora a poucas décadas atrás alguns países tenham relutado em reduzir a produção e o consumo de energia fóssil, como foi o caso dos Estados Unidos durante a assinatura do protocolo de Kyoto em 1997 (OBAMA, 2017), atualmente o uso de fontes de energias ditas limpas, com menor emissão de poluentes como o CO₂, são tidas como possíveis soluções para diminuir o impacto do lançamento desses gases na atmosfera terrestre.

Acompanhando o avanço mundial na implementação de energias limpas, o Brasil mostrou-se preocupado com tal questão, ao tomar algumas atitudes como o fomento de fontes energéticas limpas, mediante os incentivos fiscais fornecidos pelo governo às empresas que implantarem essa alternativa energética (KAFRUNI, 2019). Outro incentivo é a obrigatoriedade, por parte de empresas do setor elétrico e indústria de petróleo, para que invistam 1% (um por cento) da receita operacional líquida conforme BRASIL (2016):

- 0,5% para o Programa de Eficiência Energética (PEE) (0,4% para projetos de Energia Elétrica e 0,1% para o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel));
- 0,5% para o Processo de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (0,2% para projetos P&D + 0,2% Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDTC) + 0,1% Ministério de Minas e Energia (MME)).

A perspectiva é que esse aumento gradativo chegue a 48% (quarenta e oito por cento) da energia produzida e consumida no Brasil em 2040, de acordo com os dados da companhia de petróleo britânica *British Petroleum*, divulgados em novembro de 2018 (ELIAS, 2018).

Como consequência direta dos incentivos, a produção de energia limpa e renovável ganha espaço e força nos cenários de pesquisa brasileiro e mundial. Dentre estas, as mais comuns são a de origem eólica, solar e térmica. Porém um modelo que vem chamando a atenção dos pesquisadores é o chamado *Energy Harvesting*. Este termo é utilizado para se referir a sistemas de produção de energia limpa nos quais, por intermédio de fontes externas, a energia é produzida em pequenas quantidades de potencial elétrico. Um exemplo de sistema que adota este modelo é o relógio de pulso *Kinect* desenvolvido pela *Seiko* (SEIKO, 2021), que é alimentado por energia cinética produzida através do movimento do braço (MITCHESON, 2010).

Uma técnica amplamente adotada para a *Energy Harvesting* é o uso de materiais piezoelétricos como meio de transformar vibrações do ambiente em energia elétrica, que pode então ser armazenada e usada para alimentar outros dispositivos (ERTURK; INMAN, 2011). Com o recente avanço de dispositivos em microescala, a geração de energia piezoelétrica pode fornecer uma alternativa às fontes de energia tradicionais. De fato, o crescimento no uso destes dispositivos se deve também a outras áreas. Como exemplo, na Engenharia Biomédica, este efeito é largamente utilizado para captar sinais elétricos biológicos, como a pulsação do coração, pulmão e diafragma (DAGDEVIREN, 2014). Esses sistemas requerem materiais mais sensíveis e que tenham uma acurácia mais próxima a valores teóricos reais.

O efeito piezoelétrico pode ser utilizado também para a captura e amplificação de sons (microfones), uma aplicação dos sensores piezoelétricos utilizada em larga escala. Contudo, uma das aplicações mais promissoras desse fenômeno científico é a possibilidade de gerar uma pequena corrente elétrica por meio da compressão mecânica destes (KUHN, 2014).

A pesquisa nessa área avançou consideravelmente nos últimos 10 anos. Alguns transdutores menores, que usam nanotecnologia para melhorar a resistência e a flexibilidade, e que sejam altamente eficientes são desenvolvidos desde o início deste período (QI *et al.*, 2011). Este avanço possibilitou a exploração do potencial de geração de energia através desta modalidade em uma escala menor, como o caminhar de pedestres em grandes centros urbanos. Esta motivação está associada ao fato de espaços urbanos, como calçadas e vias de rolagem das grandes cidades, serem um dos objetos de estudos de sustentabilidade, associando a criação de cidades sustentáveis à resolução de problemas de mobilidade urbana.

A escolha desse tipo de geração de energia limpa leva a aspectos sociais, tecnológicos, ambientais e econômicos. Isso se deve ao fato de que, quanto maior a mobilidade urbana, mais recursos energéticos são dispendidos.

Goiânia - GO constitui um exemplo desses grandes centros urbanos, com uma população estimada em aproximadamente 1,54 milhões (IBGE, 2020). Essa cidade em

questão passa por um processo de transformação no aspecto urbano de mobilidade em uma velocidade elevada. Seu plano diretor indica uma ampliação nos meios de transporte, mas também alternativas para se ter uma cidade urbanisticamente com menores problemas para seus habitantes. Esse plano diretor é fundamental para um planejamento urbano de uma cidade melhor para se viver.

Uma das métricas usadas no planejamento urbano das cidades é o Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), o qual mede o nível de sustentabilidade das cidades do ponto de vista da mobilidade, de modo que quanto melhor a mobilidade urbana, mais próximo de 1 (um) é este fator. Em 2013, Goiânia possuía aproximadamente 0,658 como indicador de mobilidade urbana sustentável (ABDALA, 2013). Nos últimos anos (2016 a 2018), esse índice subiu e atingiu valores próximo a 0,8 para a metrópole em questão (FERREIRA *et al.*, 2018), sendo que o aumento do IMUS foi possível a partir de implementações de políticas de mobilidade urbana como, por exemplo, a ampliação e criação de ciclovias e ciclofaixas. Isso corrobora que é necessário implantar alternativas de mobilidade nesse grande centro.

Uma consequência direta dessas políticas de mobilidade é o incentivo ao transporte ativo. Associado a isso, grandes centros comerciais já pressupõe a existência de fluxo contínuo de pedestres. Dessa forma, dispositivos piezoelétricos podem ser implantados como forma de explorar essa oportunidade. Com isso, surge a necessidade de metodologias e ferramentas que permitam realizar o levantamento de dados e oferecer o estudo da viabilidade técnica e econômica para se implantar um sistema de geração de energia renovável e limpa desta natureza em grandes centros urbanos.

A piezoelectricidade como fonte geradora de energia é algo relativamente novo. Entretanto, alguns trabalhos mostram a capacidade de análise destes modelos. Algumas alternativas mostram essa potencialidade, como o trabalho de Urroz-Montoya *et al.* (2019) que explana as formas de se aproveitar essa energia nos meios sócio-urbanos e ambientais. Essas expectativas de produção de energia vêm associadas à possibilidade de um retorno no viés econômico.

Os ambientes industriais e os locais em que o trabalho eletromecânico possui presença significativa podem se tornar objeto de estudo visando a transformação de energia cinética em fontes geradoras de energia e, conseqüentemente, trazer um ganho econômico. Baseado nessa possibilidade, Ennawaoui *et al.* (2016) apresentam um modelo teórico de energia, obtida através de polímeros piezoelétricos, que aproveita a energia das vibrações mecânicas, convertendo-as em energia elétrica através dos sensores instalados nestas.

Diversos trabalhos tratam da viabilidade técnica da implantação de microusinas geradoras de energia usando materiais piezoelétricos. Hwang *et al.* (2015) projetaram uma placa geradora de energia usando tal tecnologia, em que simulam a pisada de um adulto

com aproximadamente 68 kg, de modo que essa ação resultou no acendimento de 60 *Light Emission Diode* (LEDs) de baixa potência. Porém, este trabalho apresentou apenas aspectos técnicos construtivos, não considerando uma análise de viabilidade econômica.

Nesta mesma vertente, Jeon *et al.* (2005) propõem a construção de um dispositivo para gerar energia através de pressão mecânica, de modo que se tal estrutura seja pressionada gera um potencial elétrico. Assim como o trabalho de Hwang *et al.* (2015), esse artigo também não discrimina o aspecto econômico, deixando em aberto esse tipo de análise.

Além dos trabalhos citados anteriormente, a ideia de otimização nos parâmetros dos materiais piezoelétricos, é algo bem difundido no meio acadêmico. Sun, Shi e Wang (2010) realizaram um estudo que estima numericamente o potencial elétrico e a eficiência destes nanomateriais para a geração de energia através de vibrações mecânicas.

Com relação à exploração do efeito piezoelétrico aliado à mobilidade, Sousa e Costa (2016) analisaram a viabilidade técnica de produção de energia através do tráfego de veículos em um cruzamento na cidade de Balsas - MA. Como conclusões, a energia gerada seria suficiente para abastecer o semáforo. Contudo, não houve análise do ponto de vista econômico. Proposta semelhante foi elaborada por Najini e Muthukumaraswamy (2016) onde, usando simulações considerando um fluxo constante de veículos e diferentes valores de velocidade, foi analisado o potencial de geração de energia. Foi realizada análise de viabilidade econômica considerando o uso de empréstimo, mas sem aprofundar muito, deixando de realizar, por exemplo, uma análise de sensibilidade. Nesta mesma vertente, Farias e Sallum (2013) analisaram a viabilidade técnica de geração de energia por pedestres, considerando como cenário o restaurante universitário da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A metodologia considerou a contagem manual de pedestres e o projeto da microusinas, não sendo realizada análise de viabilidade econômica.

Como pode ser visto, uma das principais lacunas nestes trabalhos é a inexistência de análise de viabilidade econômica, embora o tema seja explorado considerando outras fontes renováveis. Como exemplo, Pinto *et al.* (2020) propuseram uma metodologia para a análise de viabilidade econômica na produção de energia elétrica a partir do biogás. Outro trabalho nesta seara é o de Neto *et al.* (2018), em que a análise realizada foi em relação à energia eólica, outro setor de energia renovável em forte crescimento.

Uma fonte renovável muito explorada para a análise de viabilidade econômica é a fotovoltaica. Rabuske, Friedrich e Fontoura (2018) realizaram uma análise dessa natureza implantando placas de energia fotovoltaica sobre um estacionamento veicular. De forma semelhante, Almeida *et al.* (2017) também abordam essa temática.

Entretanto poucos trabalhos foram publicados sobre o tema de viabilidade econômica para projetos de implantação de microusinas piezoelétricas. Dentre estes, Saifan *et al.* (2019) demonstram uma análise em sistemas de geração híbrido, de piezoelectricidade

com sistemas fotovoltaicos. Contudo, trabalhos analisando apenas o primeiro tipo de geração energético praticamente são inexistentes.

A reduzida quantidade de artigos publicados com essa finalidade nas bases de dados indexadas à plataforma Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) (CNPQ, 2019) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), bem como do sistema de pesquisas de trabalhos acadêmicos da Google (GOOGLE, 2019), indicam que existe a necessidade de mais pesquisas relacionadas à análise econômica de projetos de geração de energia usando a piezoelectricidade.

Levando em consideração esse nicho e principais lacunas identificadas, a proposição de um estudo da viabilidade técnica e econômica para se implantar um sistema de geração de energia renovável e limpa em grandes centros urbanos usando piezoelectricidade, de modo que esse tema se tornou de grande relevância nos dias atuais, sobretudo pelo potencial de geração devido ao alto fluxo de pedestres que ali transitam.

Para se realizar uma análise técnica e econômica para implantação de microusinas piezoelétricas, é necessário que se crie um mecanismo confiável de contagem de pessoas que trafegam sobre o provável local de geração de energia. Esse parâmetro é fundamental para se estimar o potencial energético.

Uma forma de contagem de pedestres é a implantação de sistemas de contagem por sinais eletrônicos. Segundo Vanz e Karakiewicz (2015), a contagem de pessoas para estimar a produção de energia nos corredores e escadas da câmara municipal da cidade de Melbourne na Austrália, usando a piezoelectricidade, pode ser realizada por captação de sinais de dispositivos eletrônicos, em que sensores de presença seriam instalados no local de análise. O funcionamento desse consiste em captar o sinal do sensor desde que o pedestre esteja na área de alcance do dispositivo eletrônico. O que torna esse método falho seria a sobreposição de duas ou mais pessoas que passassem simultaneamente na área de abrangência deste, fazendo com que assim o sistema não contabilize os pedestres que estiverem simultaneamente transitando por ali.

Além dessa forma de contagem, existem outras por meios eletrônicos, que captam sinais Wi-Fi dos celulares e/ou dispositivos em que o pedestre esteja portando consigo. Em Guillén-Pérez e Baños (2018) foi utilizada esta alternativa, em que pode se estimar com uma boa precisão até mesmo se o pedestre estiver caminhando, identificando sua posição, ou se ele estiver parado. Porém esse apresenta alguns pontos negativos para a contagem de pedestres com por exemplo, se a pessoa que estiver caminhando não possuir um dispositivo com Wi-Fi naquele momento, ou se o dispositivo de comunicação móvel (celular, *tablet*...) do pedestre estiver desligado, ou ainda se ele estiver portando mais de um dispositivo de comunicação naquele momento, o que faria que o sistema contasse mais de uma vez a mesma pessoa.

Outro método utilizado para a contagem de pessoas seria o de captação de

imagens de câmeras, onde um sistema inteligente possa realizar essa contagem de forma automatizada. No trabalho de Almeida, Padilha e Eckhardt (2020) foi proposto um sistema computacional que realiza a contagem de pessoas que estejam numa casa de eventos, onde a lotação máxima desta é controlada. A vantagem dessa ferramenta é que não depende do fator humano na contagem, visto que este pode errar a contagem devido a fatores fisiológicos e/ou psicológicos, ou até mesmo por distração por algum evento externo.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe uma ferramenta computacional para o levantamento automatizado da quantidade de pedestres e a análise de potencial de geração de energia usando o efeito piezoelétrico. A proposta visa desenvolver uma solução que preenche as principais lacunas discutidas, de forma a auxiliar na implantação de usinas de geração utilizando a piezoeletricidade como base tecnológica, em cenários de grandes centros urbanos. Consequentemente, será determinado se há ou não a viabilidade, tanto do aspecto técnico, considerando o projeto e dimensionamento das placas geradoras de energia usando células piezelétricas, quanto do ponto de vista econômico. A análise é realizada levando em consideração o custo de implantação e a manutenção desse sistema.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é projetar, implementar e avaliar uma ferramenta computacional que permita analisar e comparar a viabilidade técnica e econômica na implantação de sistemas microgeradores de energia em diferentes espaços onde há fluxo de pedestres, usando a piezoeletricidade. Em harmonia com o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar aspectos técnicos da configuração de células piezoelétricas, buscando identificar quais materiais são mais adequados no cenário considerado;
- Propor um modelo computacional para a contagem automática de pessoas que trafegam nos locais de implantação da microusina, que permita caracterizar o fluxo de pedestres nestes ambientes;
- Definir indicadores de viabilidade econômica aplicáveis ao cenário estudado;
- Avaliar o modelo com um estudo de caso ao considerar um cenário tipicamente favorável à instalação dessas microusinas;
- Identificar quais parâmetros do cenário estudado afetam mais significativamente a viabilidade econômica.

1.2 Estrutura do Trabalho

Esta seção apresenta uma visão geral do restante do trabalho. Tal feito se dará a partir da estruturação em capítulos que detalham a ferramenta computacional para a análise da viabilidade técnica e econômica para a implantação de microusinas geradoras de energia usando a piezoelectricidade.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, com uma visão do estado da arte no que tange sistemas de geração de energia piezoelétrica e a tecnologia dos materiais utilizadas neste ramo de geração de energia. Também é discutido aspectos sobre contagem automática de pessoas como elemento decisivo para a implantação do sistema, pois será importante para se confirmar técnica e economicamente a viabilidade do projeto. Outro tópico explorado neste capítulo é o de métricas da Engenharia Econômica, que irão subsidiar a análise de viabilidade econômica para implantação de tais microusinas geradoras de energia, valendo-se da piezoelectricidade.

No Capítulo 3 é discutido o desenvolvimento do software que abrange toda a análise da viabilidade econômica para sistemas de geração de energia ao utilizar a piezoelectricidade sob pressão mecânica pelo caminhar de pedestres. Inicialmente é apresentada a metodologia utilizada no desenvolvimento da ferramenta proposta, assim como métricas que auxiliaram na sua construção e validação. Outro elemento integrante, ainda neste capítulo, é a descrição do fluxo e processamento de dados ao se fazer uso das métricas de Engenharia Econômica escolhidas para a previsibilidade econômica concernente ao escopo deste projeto.

No Capítulo 4 é demonstrado um estudo de caso realizado nas calçadas do shopping Mega Moda, localizado nas proximidades da Rua 44, próximo à rodoviária de Goiânia. A ferramenta computacional proposta é a base para uma análise com dados coletados de câmeras de segurança fornecidas pelo estabelecimento. Dessa forma, com base nesses dados, é possível mostrar e discutir os resultados da viabilidade econômica para a implantação deste projeto nas calçadas adjacentes a este centro comercial.

O último ponto para o desfecho desta pesquisa foram as considerações finais sobre essa tecnologia para geração de energia, bem como a discussão sobre resultados obtidos com a pesquisa, apresentados no Capítulo 5.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para se compreender o escopo desta pesquisa é necessário um embasamento teórico que consiste em mostrar os conceitos principais relacionados ao trabalho. Em virtude disso, neste capítulo inicialmente são discutidas as principais estratégias para contagem de pessoas. Em seguida, são apresentados aspectos relacionados à visão computacional, a estratégia utilizada neste trabalho para esta tarefa. Também são apresentados conceitos referentes à geração de energia por piezoelectricidade. Por fim, são definidas as métricas empregadas para a análise de viabilidade econômica.

2.1 Contagem de Pedestres

A contagem de pessoas é algo difundido entre algumas áreas de pesquisas como a Geografia, como descritos nos trabalhos de Procopiuck (2019) e Felix, Riondet-Costa e Palma-Lima (2019), na Engenharia de Tráfego (DANTAS, 2019) e, principalmente, na Computação, geralmente através de aprendizado de máquina. Alguns exemplos nesta área são os trabalhos de Garcia *et al.* (2013) e Albiol, Mora e Naranjo (2001), entre outros.

Uma das áreas que demandam este tipo de estimativa são os grandes centros, que necessitam cada vez mais de uma organização e alternativas para a mobilidade urbana, além de um planejamento urbano que servirá para enfrentar os desafios territoriais e de mobilidade (FERREIRA, 2013). Uma das ferramentas para se chegar a esse objetivo é a criação de planos diretores, que poderão sugerir soluções futuras e eficientes para a otimização espacial, bem como da mobilidade urbana. Para se analisar essa mobilidade nos grandes centros, um dos fatores importantes é fazer a contagem de pedestres que trafegam pelos centros comerciais das grandes cidades.

Além de ser uma variável essencial no planejamento urbano, a contagem de pedestres é fundamental para estatísticas de lugares ou até mesmo para fazer estimativas e planejamentos de eventos ou ações do Estado em determinada situação. Essa métrica pode ser usada para indicar quantas pessoas estão entrando ou saindo de determinado ambiente (lojas, comércio, etc) (CHO; KANG, 2018). Outra vertente é saber a quantidade de pessoas que trafegam por uma determinada região para planejar o efetivo policial suficiente para aquele local visando garantir a segurança preventiva e ostensiva (LIU *et al.*, 2005). Além disso, em locais com controle de temperatura e luminosidade, a quantidade de pedestres seria necessária para se ter um sistema de climatização ideal para aquele local sem que haja desperdício de energia, com este ambiente vazio ou totalmente cheio (DIAS, 2005).

Como outro exemplo, uma aplicação para a contagem automatizada de pessoas utilizando imagens de câmeras de monitoramento seria a de verificar a quantidade de passageiros que acessam ônibus e metrô. Isso influenciará o número de veículos num determinado horário para otimizar a frota (CORDEIRO *et al.*, 2019). Além disso, essa contagem pode indicar estatisticamente o fluxo de pedestres na região de abrangência dos veículos de transporte público.

Outra avaliação que pode ser feita com a contagem de pessoas é a de prever estatisticamente a quantidade de possíveis consumidores no local, para a instalação de propaganda e outras ações de marketing, baseada no tráfego de possíveis consumidores de algum produto disponibilizado naquela região. Além disso, a contagem de pessoas em tempo real que entram ou que saem de locais de festas e eventos pode ser crucial, para a pré-determinada lotação de um local desses (ALMEIDA; PADILHA; ECKHARDT, 2020).

Por fim, outra aplicação para uso de estatísticas da quantidade de pessoas caminhando num determinado local seria a potencialidade para o desenvolvimento de projetos de geração de energia usando a piezoelectricidade. Esta informação é crucial pois influencia diretamente no potencial de geração de energia e, conseqüentemente, na viabilidade econômica de projetos desta natureza.

Nesse entendimento, estudos da Física e Estatística mostram o fluxo de pessoas se deslocando sobre uma calçada, comparando o fluxo de pedestres ao de fluidos sendo escoado. Neste caso, estima-se o valor máximo e o mínimo de pessoas caminhando num determinado espaço delimitado. Um dos principais resultados nesta vertente são os modelos estudados por Vargas *et al.* (2012) que mostram o fluxo de pessoas caminhando como modelos físicos. Estes modelos são determinados por três escalas:

- **Microscópico** - Em que os pedestres são analisados individualmente, ou seja, cada pedestre com a sua posição e velocidade é importante para contagem;
- **Macroscópico** - Modelo que leva em consideração a média local da quantidade de pessoas caminhando naquele ambiente, análogo a um fluido escoando;
- **Cinética ou Mesoscópica** - Nesta o indivíduo não é contabilizado individualmente, mas usando uma distribuição de probabilidade para o estado microscópico considerando uma variável aleatória.

O modelo macroscópico de contagem de pessoas, baseado num fluido, pode ser aplicado a uma estrutura de caminhada para pedestres com um determinado comprimento e largura, considerando um intervalo de tempo. Assim, pode-se estimar a quantidade de pessoas de forma estatística que trafegam num espaço em relação ao tempo predeterminado.

Segundo Vargas *et al.* (2012) o modelo macroscópico descreve que a densidade de fluidos, comparadas ao fluxo de pessoas, é melhor aplicada quando se tem uma

alta densidade. A implicação disso é que em cenários onde existam muitos pedestres, se consegue obter uma estimativa de pessoas caminhando próxima do valor real. Nos resultados apresentados no modelo proposto, têm-se que: *i)* o mínimo de velocidade encontrado foi $0,02m/s$ com um fluxo muito intenso em um espaço; *ii)* quando a densidade de pessoas for baixa, os pedestres podem caminhar a uma velocidade de $2m/s$, onde isso representa o pico. Este modelo é interessante para mostrar que num espaço se tem limites, superiores e inferiores, de pessoas caminhando, pois a velocidade que os pedestres atingem está relacionada às dimensões do espaço. Entretanto, esse serve apenas de base para se entender fluxo de pedestres, não oferecendo medidas sobre a quantidade em uma determinada região. De fato, a quantidade de pedestres varia conforme elementos externos como: dias da semana, hora do dia, intempéries, bem como situações adversas como fechamento de comércio por motivos de força maior.

Diante de todos os aspectos sobre a contagem de pessoas, e ao se levar em consideração a importância disso, é necessária uma ferramenta para automatizar essa tarefa. Uma alternativa viável seria a utilização de Visão Computacional (SZELISKI, 2010), que será discutida na próxima seção.

2.2 Visão Computacional

O ramo da Ciência da Computação que apresenta uma diversidade grande de opções para classes de problemas relacionados a reconhecimento de padrões é a Visão Computacional. Nesta, existem diversas pesquisas relacionadas ao tema de contagem de pessoas: (GARCIA *et al.*, 2013; ALBIOL; MORA; NARANJO, 2001; ALMEIDA; PADILHA; ECKHARDT, 2020; DIAS, 2005), entre outros.

A abrangência de algoritmos que compõem essa classe é bastante ampla, podendo ser selecionado conforme a necessidade da aplicação. Alguns modelos requerem um reconhecimento de objetos (conhecido como *object detection*), com uma maior acurácia, ao passo que outros necessitam de uma velocidade e precisão maior para o rastreamento desses objetos (identificado como *object tracking*).

Existe uma diferença fundamental entre detecção de objetos e rastreamento desses, onde a junção dos dois tipos de algoritmos pode ser utilizada para fornecer uma contagem de pedestres automatizada. No primeiro, procura-se detectar o objeto na imagem e sua posição neste momento, o que gera um custo computacional maior e, como consequência, oferece maior latência de processamento em relação ao rastreamento do objeto (ROSENBROCK, 2018).

Alguns algoritmos consagrados de detecção podem ser usados para essa finalidade, como por exemplo, *Histogram of Oriented Gradients* (HOG), que é um algoritmo que utiliza um histograma de orientação vetorial (FREEMAN; ROTH, 1995). Há ainda o *Sup-*

port *Vector Machine* (SVM), algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado para classificação de objetos (RAY, 2017), bem como detectores baseados em aprendizado profundo, como por exemplo o *You Only Look Once* (YOLO). Este último detecta objetos baseado na regressão para caixas delimitadoras espacialmente separadas (REDMON *et al.*, 2015).

O rastreamento de um objeto, por sua vez, faz o controle das coordenadas deste (após a sua detecção). Esse procedimento computacional faz com que o objeto receba um identificador único (um número por exemplo), e logo em seguida monitore as coordenadas à medida que o objeto se mova no vídeo. Isso é realizado detectando a posição deste no próximo *frame* (quadro em inglês), usando fatores como o gradiente da imagem, fluxo ótico, entre outros (ROSENBROCK, 2018).

A detecção e rastreamento de objetos, é possível devido ao tratamento prévio das imagens que serão utilizadas. Esse pre-processamento de imagens pode ser feito com pacotes computacionais disponíveis para algumas linguagens de programação, como por exemplo o OpenCV (OPENCV, 2021).

O OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) é uma ferramenta de código aberto, utilizada em diversas plataformas computacionais. O intuito dessa é fornecer funções que auxiliam na detecção e rastreamento de objetos em imagens e vídeos. O OpenCV é muito utilizado em projetos de visão computacional por ter na sua base de dados algoritmos otimizados para esse fim e ser acessível a usuários de forma gratuita.

Alguns algoritmos muito utilizados podem ser encontrados na biblioteca OpenCV, entre eles o *Boosting Tracker*, um algoritmo muito antigo e que está obsoleto para os problemas em que haja rastreamento de objetos, devido ao seu alto consumo computacional (LEHTOLA *et al.*, 2017), além de oferecer uma baixa acurácia para imagens que contenham muita oclusão.

Outros algoritmos como o *TLD Tracker* (KALAL; MIKOLAJCZYK; MATAS, 2011) e o *MOSSE Tracker* (BOLME *et al.*, 2010) também são utilizados nessa classe de problemas. Eles se diferem quanto à velocidade de processamento e à acurácia (LEHTOLA *et al.*, 2017). Algumas desvantagens também podem ser vistas entre esses dois algoritmos, como por exemplo, a oclusão no *MOSSE Tracker* aumenta em muito a falha em detecção e rastreamento (LEHTOLA *et al.*, 2017), o que faz com esse não seja muito recomendado para o rastreamento de pedestres. Além disso, apesar do algoritmo *TLD Tracker* possuir processamento rápido, ele não é muito recomendado no OpenCV (LEHTOLA *et al.*, 2017), pela detecção de falsos positivos (detecção de objetos que não pertençam à classe esperada), fazendo com que ele se torne pouco usado para problemas dessa categoria.

Além dos algoritmos citados, outras estratégias são baseadas em *Single Shot Multibox Detector* (SSD) (LIU *et al.*, 2016) e *MobileNet* (HOWARD *et al.*, 2017). O SSD é um algoritmo eficiente de detecção que utiliza rede neural, ao passo que o *MobileNet*

é uma arquitetura de rede neural convolucional, usada para problemas de detecção e rastreamento de objetos. O uso destas soluções, sobretudo de maneira combinada, permite resultados satisfatórios mesmo em máquinas não muito robustas.

O SSD funciona da seguinte maneira: primeiro a imagem é tratada passando por uma série de camadas convolucionais que possuem diferentes filtros, onde cada mapa de recursos utiliza um filtro convolucional 3x3, que são filtros oriundos de uma matriz 3x3 em que as dimensões dessa matriz são detecção de bordas, nitidez e desfoque (RODRIGUES, 2019). Esses filtros servem para avaliar um conjunto menor de *bounding boxes* (caixas delimitadoras dos objetos). Nessas caixas delimitadoras menores, os objetos são classificados para saber se pertencem a uma classe específica.

Nessa fase de treinamento da rede neural a *bounding box* original é comparada com a que foi prevista, atribuindo a essa uma nota (peso classificador), buscando garantir que o valor quantificado dessa nota seja superior a um limiar chamado de intervalo de confiança. A caixa delimitadora com a melhor nota será sinalizada como positiva, assim como todas as outras que obtiverem um peso superior ao limiar escolhido inicialmente como parâmetro.

A principal característica observada nessa fase é que se faz todo o processo em um único passo (“*One-Shot*”) em vez de realizar diversas iterações sobre uma mesma imagem, aumentando dessa maneira a velocidade de treinamento e com isso diminuindo recursos computacionais. Além dessa característica, outro elemento observado é que o SSD possui um método próprio de inferência das *Bounding Box*, utilizando o *non-maximum suppression* (BODLA *et al.*, 2017), em que une caixas delimitadoras com muita sobreposição, mantendo maior acurácia.

O algoritmo SSD tem como principal característica não necessitar de muitos recursos computacionais, o que viabiliza muitos projetos de detecção de objetos em que possam ser executados em diferentes máquinas computacionais em cenários variados (LI *et al.*, 2018). Isso se dá pelo fato de que reduz muitos parâmetros da aprendizagem, sem prejudicar a precisão na detecção, tornando-o uma alternativa com baixo custo computacional (LI *et al.*, 2018)).

A desvantagem que o SSD apresenta é devido ao método de detecção baseado nas cores e detalhes de bordas dos objetos nas imagens, ou seja, quanto menor a imagem e/ou oclusões relativos à sobrecarga de informações na imagem, a acurácia é mais prejudicada (WANG *et al.*, 2018). Isso o torna não muito atraente em situações que necessitam de detecção em tempo real com equipamentos que possuam pouca qualidade na captura de imagens.

O método tradicional do SSD possui como característica negativa o limiar de confiança fixo, o que pode ser um problema em sistemas em tempo real. Isso acontece pois o nível de confiança adaptativo às características de detecção aumenta a acurácia

nesse método (WANG *et al.*, 2018). Uma alternativa a isso seria a método adaptativo usando a Lógica *Fuzzy* para o ajuste do limiar de confiança, fazendo desta maneira com que se possa detectar objetos com uma maior precisão, baseando-se nas informações e características de padrão de imagens analisado (WANG *et al.*, 2018). Da mesma forma que o SSD, *MobileNet* se baseia em menos parâmetros, requerendo menor tempo de processamento. Consiste em uma arquitetura simplificada que usa convoluções para construir redes neurais profundas e leves que podem ter baixa latência para dispositivos móveis embarcados.

Mesmo alternativas como essas que oferecem maior desempenho possuem limitações. Uma das principais é a dificuldade de detectar objetos quando há oclusão, mesmo que parcial (WANG *et al.*, 2020). Essa limitação é observada principalmente em imagens que estejam relativamente distantes do ponto focal e em tempo real. Outro problema é quando um objeto está em uma escala pequena em relação ao tamanho total da imagem analisada, podendo gerar duas *Bounding Box* do mesmo objeto com pesos diferentes, causando dessa maneira um conflito na detecção do objeto (ZHANG; LI; YANG, 2019). Desta forma, estes algoritmos funcionam bem quando o objeto ocupa uma região grande com alta resolução (ZHAO *et al.*, 2018).

Entretanto, as limitações apresentadas podem ser compensadas pela boa velocidade e acurácia no processamento. Contudo, é importante destacar que resultados melhores são esperados quando o equipamento usado para capturar as imagens estiver a uma distância curta do objeto a ser detectado e quando a captura é realizada em alta resolução.

2.3 Geração de Energia Piezoelétrica

O efeito piezoelétrico é um fenômeno físico descoberto em meados dos anos 1880, em que determinados materiais em forma de cristais, quando são submetidos a tração ou à compressão, geram uma polarização elétrica (KUHN, 2014). Esses materiais foram descobertos no século XIX pelos irmãos *Currie*, porém suas aplicações para conversão de energia mecânica em elétrica só foram aprofundadas no final do século XX (SOUSA; COSTA, 2016).

O processo de produção de energia consiste basicamente na pressão mecânica ou vibração de um material que possua as características piezoelétricas como, por exemplo, o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT)¹ (FILHO, 2014). Essa pode gerar uma diferença de potencial por meio da conversão de energia mecânica em elétrica pelo princípio da piezoelectricidade (NAJINI; MUTHUKUMARASWAMY, 2016). No processo de coleta desse

¹A sigla PZT se deve à fórmula química do composto: $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$, com $0,1 < x < 0,9$ (LANZA, 2013).

potencial gerado por alguma fonte de energia mecânica existe a conversão em energia elétrica, sendo esta armazenada ou utilizada durante a sua produção.

Este material possui diversas formas, tamanhos e aplicações. A Figura 2.1 mostra um exemplo de um sensor PZT-5H, muito utilizado comercialmente.



Figura 2.1: Imagem de um sensor PZT-5H.

Fonte: (CHEN *et al.*, 2019)

Existem diversos materiais capazes de gerar o efeito piezoelétrico e estes podem ser divididos em quatro categorias, definidas de acordo com a resistência à mudança de temperatura e umidade (FILHO, 2014). São elas:

- *Monocristalinos*: Quartzo e Sal de Rochelle;
- *Policristalinos*: Titanato Zirconato de Chumbo (PZT);
- *Polímeros*: Polifluoreto de Vinilideno (PVDF);
- *Metais*: Metais à base de platina e nanoporos.

O PZT (policristalinos) é o mais encontrado no mercado e também o mais utilizado pelo seu custo benefício (MARQUI; OKI, 2015). Grande parte dos trabalhos de *Energy Harvesting*, apresentam o PZT como o material utilizado.

A Figura 2.2 ilustra um material piezoelétrico, que pode ser comprimido ou tracionado, e que durante algum esforço mecânico desse irá gerar no material uma polarização elétrica, causando assim uma diferença de potencial. O processo inverso em que uma corrente elétrica aplicada a um material que possua tal característica também é possível e isso fará com que o material tenha uma expansão mecânica.

A conversão de energia mecânica em elétrica no efeito piezoelétrico pode ser chamada de direto em que consiste na conversão de energia mecânica em energia elétrica. Deste modo, a força mecânica F aplicada ao material com tais características gera um

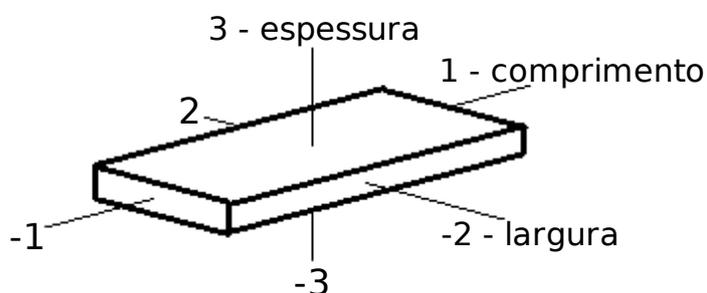


Figura 2.2: Direções de Polarização, nas três dimensões de uma placa piezoelétrica em casos de compressão e tração.

Fonte: (FILHO, 2014)

campo elétrico Q , que resulta numa diferença de potencial, conforme ilustrado na Figura 2.3(a) (CHEN *et al.*, 2019). Caso um potencial elétrico seja aplicado à cerâmica piezoelétrica, este resultará numa vibração de ordem mecânica, ou seja, converterá energia na forma elétrica em mecânica, conforme pode ser visto na Figura 2.3(b), também chamado de efeito piezoelétrico inverso.

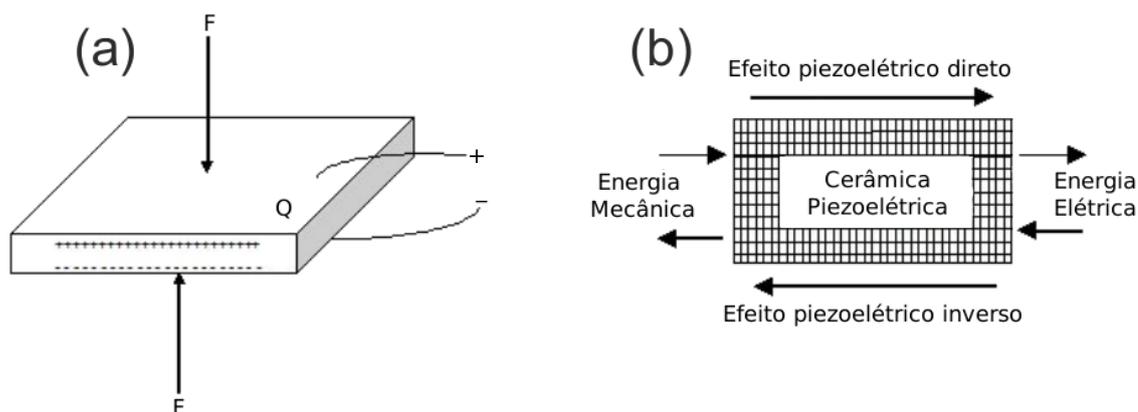


Figura 2.3: Efeito piezoelétrico direto e inverso.

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2019)

Avanços relacionados à geração de energia usando a piezoeletricidade em diversos setores reaproveitando a energia mecânica dissipada em máquinas e elementos vibracionais, como o de Rangel (2014), estão sendo fundamentais para o desenvolvimento das

pesquisas em *Energy Harvesting*.

Alguns trabalhos como os de Malmonge *et al.* (2009), Zhang *et al.* (2015) e Touhtouh *et al.* (2016) entre outros, estão relacionados ao desenvolvimento de uma tecnologia para melhorar a eficiência, resistência e produção de materiais piezoelétricos. De maneira complementar, diversos materiais ferroelétricos são estudados para o desenvolvimento de transdutores do tipo PZT (MALMONGE *et al.*, 2009) que obtenham melhor desempenho na conversão de energia mecânica em elétrica, sob a forma de pressão.

Esses transdutores também estão sendo produzidos em formas diversas e associadas a outros materiais. As formas dos transdutores PZT indicam também o potencial elétrico a ser gerado, como, por exemplo, formatos de PZT tubulares cilíndricos (RANGEL, 2014).

Além dos aspectos do tipo de material e formato, outro fator que influencia diretamente na geração de energia usando o tipo piezoelétrico é a vibração mecânica a qual este transdutor é submetido (COELHO, 2015). A multifrequência nas piezo-estruturas tem se tornado objeto de estudo para que se possa ampliar o leque de produção de energia para sistemas eletrônicos que produzem altas frequências vibracionais como, por exemplo, aeronaves não tripuladas (CAMARA, 2012).

2.3.1 Geração, distribuição e armazenamento usando piezoeletricidade em calçadas

Para a geração de energia em calçadas, as placas com os transdutores piezoelétricos deverão ser montados com algum tipo de proteção contra intempéries, com absorção mecânica de impacto e proteção à grande quantidade de chuva e outros tipos de umidade e calor excessivo.

O sistema de micro-geração de energia a ser implantado nestes ambientes podem ser divididos em cinco fases, dependendo da aplicação e do estudo prévio realizado para a implementação do projeto. Analisando o diagrama da Figura 2.4, constata-se que essa microunidade geradora pode ser dividido em produção e distribuição, ou ainda produção, armazenamento e distribuição.

Neste exemplo, uma unidade consumidora seria alimentada com a energia produzida pelas células instaladas. Como exemplo, a microunidade poderia ser instalada nas calçadas de uma avenida com grande fluxo de pedestres e a energia produzida seria usada para alimentar os semáforos daquela avenida.

Na primeira configuração, tem-se que a energia é produzida nas placas de células piezoelétricas. Logo em seguida tem-se a retificação do sinal elétrico que pode ser pulsado devido a frequência do caminhar de pessoas naquele local. E por último, essa corrente elétrica gerada seria injetada no sistema de controle.

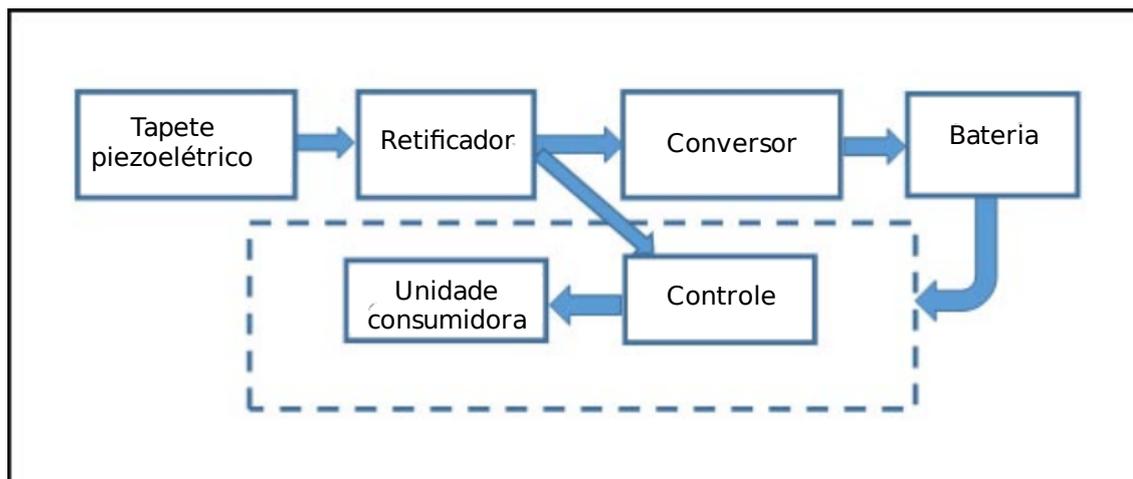


Figura 2.4: Esquema para a geração de energia usando a piezoelectricidade, com fornecimento e armazenamento da energia.

Fonte: Adaptado de (SOUSA; COSTA, 2016)

A seguir é apresentada uma discussão de cada um dos componentes da Figura 2.4.

2.3.1.1 Tapete Piezoelétrico

Um tapete piezoelétrico seria a placa geradora de energia composta por sensores PZT montados numa estrutura física com amortecedores para dirimir o impacto diretamente nos sensores. Esses estariam associados em paralelo ou em série, de forma a otimizar a geração de energia. O conjunto de células piezoelétricas, ao serem submetidas à uma pressão mecânica (pressão dos pés sobre a placa), geram um pequeno potencial elétrico.

Os circuitos em paralelo ou em série montados no tapete piezoelétrico, possuem potencialidade diferentes. Nas configurações em paralelo existe um maior potencial elétrico, segundo Marqui e Oki (2015), visto que em todas as configurações em que se coloque em paralelo os PZTs acontecem uma ampliação da diferença de potencial.

2.3.1.2 Retificador

A corrente produzida no tapete piezoelétrico é passada em um retificador de onda completa para que esse sinal tenha um comportamento contínuo. Isso é necessário tanto na parte de armazenamento quanto na injeção da energia em sistemas eletrônicos diretamente.

O retificador é o elemento que faz com que a energia seja convertida da forma alternada (pulsos produzidos pela pressão mecânica) para forma contínua, de forma que possa ser utilizada posteriormente em um conversor que estabiliza a energia fazendo com que a bateria armazene o máximo possível de energia, dissipando poucas perdas (KUHN,

2014). Este é acoplado diretamente na saída do gerador piezoelétrico, uma vez que a frequência não será elevada, para que o sinal elétrico obtido seja retificado e mantenha um padrão contínuo.

A Figura 2.5 mostra o funcionamento de tal sistema retificado, onde a tensão produzida é feita de forma pulsada ou senoidal. A figura também mostra como fica a saída da tensão após a entrada desta no retificador. É apresentada uma retificação de onda completa, em que o sinal alternado é convertido em um sinal contínuo. Este sinal de saída possui um pequeno *ripple* (ondulação em inglês), em que esta possui uma diferença entre o potencial elétrico no pico de uma onda até o início da próxima, mostrado por $V_p - \rho$ (V_p = tensão de pico, ρ = sinal retificado). Este *ripple* pode ser diminuído com o uso de capacitores de maior capacitância. O período total de um ciclo de onda é representado por T , onde uma onda produzida gera um semi-ciclo negativo e outro positivo. Portanto, $T/2$ representa o período de um semiciclo. Ademais, o tempo de um *ripple* pode ser representado por t_1 e t_2 , de forma que se inicie a subida dessa onda em t_1 e atinja o pico em t_2 .

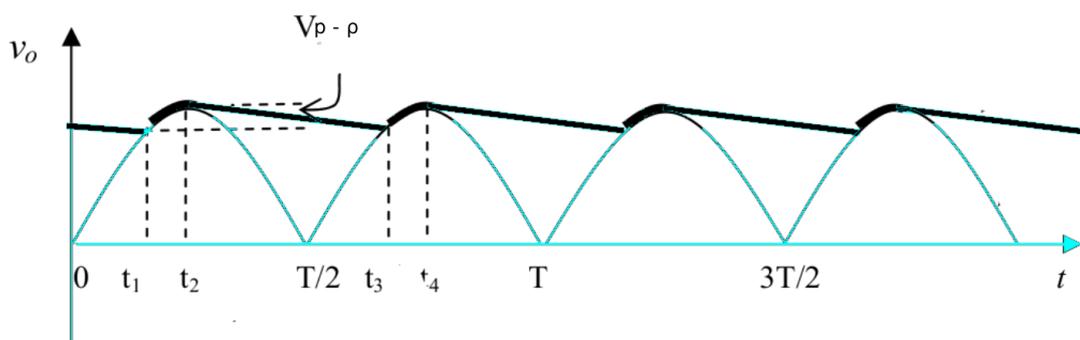


Figura 2.5: Funcionamento de um retificador, utilizado para transformar um sinal elétrico pulsado ou oscilado em um sinal contínuo.

Fonte: Adaptado de (TAVARES, 2017)

2.3.1.3 Conversor

Uma vez retificado o sinal elétrico, o sistema funcionará como um gerador contínuo, podendo ser utilizado diretamente em dispositivos eletrônicos, ou ainda ser armazenado de forma capacitiva (MARQUI; OKI, 2015), utilizando conversores e enviando os sinais para os bancos de capacitores.

Um conversor é um dispositivo que faz a integração da energia já retificada para o sistema de armazenamento. Este elemento será necessário para converter o sinal de forma que não haja perdas de corrente e que o sinal chegue intacto ao banco de baterias. Nos sistemas híbridos, onde haja a produção e utilização de energia, bem como

o armazenamento de parte desta, é uma peça fundamental para que a finalidade seja alcançada.

2.3.1.4 Bateria

O armazenamento da energia produzida pelas microusinas piezoelétricas pode ser implementado através de um banco de capacitores ou até mesmo com baterias estacionárias ou baterias seladas. Este procedimento é semelhante ao realizado com sistemas fotovoltaicos (EMAP-SOLAR, 2019).

2.3.1.5 Sistema de controle da unidade consumidora

A energia gerada por uma microusina pode ser utilizada para alimentar o sistema de controle e, conseqüentemente, a unidade consumidora, após a retificação e também o armazenamento dessas em baterias (SOUSA; COSTA, 2016).

Um exemplo de unidade consumidora poderia ser os semáforos da região onde a microusina está localizada. Dessa forma, a unidade de controle e as lâmpadas dos semáforos utilizariam a energia produzida nas calçadas. Entretanto, outras unidades também poderiam ser utilizadas como, por exemplo, postes de iluminação, painéis luminosos e outros dispositivos eletrônicos na região.

2.4 Análise de Viabilidade Econômica

A análise da viabilidade econômica de um projeto se dá pela avaliação de variáveis que afetam diretamente o fluxo de caixa. Esse preceito é definido a partir da observação do comportamento das entradas e retiradas de capitais no projeto.

O intuito de se estabelecer uma análise da viabilidade econômica em microusinas de geração de energia é o de avaliar os custos de implantação desse sistema, o tempo de retorno e a vida útil do projeto. Isso é possível, segundo Almeida *et al.* (2017), fazendo a estimativa do investimento inicial e considerando os gastos com a manutenção e operação do sistema, bem como as receitas e despesas esperadas num determinado período de tempo.

Os principais indicadores utilizados em tais tipos de estudo são o Valor Presente Líquido (VPL), o *Payback* Descontado e a Taxa Interna de Retorno (TIR). Ademais, para realização destas análises é necessário definir uma taxa de desconto/retorno, como por exemplo, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Esta taxa é definida pelo investidor com base em taxas de retorno de investimentos do mercado e em seu grau de aversão ao risco.

A análise de sensibilidade traz o refinamento da escolha da melhor configuração do sistema, baseado nas métricas avaliadas. Nela se faz um comparativo das principais

variáveis utilizadas no sistema, de modo a indicar a configuração mínima paramétrica para que o projeto indique um retorno viável ao investimento.

2.4.1 TMA

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) é uma taxa de desconto utilizada no cálculo de alguns indicadores de análise de viabilidade econômica, como por exemplo, o VPL e o *Payback* descontado. Para definir o seu valor em alguns projetos pode-se utilizar indicadores conhecidos como, a taxa Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC) (GITMAN, 2010) ou outra taxa de juros fixada como referência. É importante observar, porém, que devido às perdas acumuladas na média dos últimos anos (BCB, 2020) a SELIC não está sendo um bom indicador para a TMA.

Uma taxa de atratividade que dê um retorno mínimo pode ser indexada baseada no perfil do investimento. De maneira complementar, uma análise da economia avaliando os indicadores pode ser um método para se encontrar uma TMA adequada para o projeto.

2.4.2 VPL

Um dos parâmetros mais utilizados pela Engenharia Econômica para se avaliar a viabilidade de um projeto é o Valor Presente Líquido (VPL). Esse indicador mostra o valor do dinheiro no tempo, descontando-se o fluxo de caixa numa determinada taxa de desconto (RABUSKE; FRIEDRICH; FONTOURA, 2018).

O VPL é calculado levando em consideração o tempo de vida útil do projeto, trazendo-se valores futuros do fluxo de caixa para o seu valor presente utilizando determinada taxa de desconto. Assim, trata-se de uma técnica de deslocamento do dinheiro no tempo.

O cálculo do VPL pode ser realizado utilizando a Equação 2-1,

$$VPL = -FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (2-1)$$

onde:

VPL = Valor Presente Líquido;

FC_t = Fluxo de caixa no tempo;

FC_0 = Investimento inicial;

t = Momento em que o fluxo de caixa ocorreu;

TMA = taxa mínima de atratividade;

n = Período considerado para o projeto.

A análise do VPL como indicador de viabilidade é realizado da seguinte forma:

- Se o $VPL > 0$, então o investimento é viável;
- Se o $VPL = 0$, então o investimento traz um retorno igual a qualquer outro realizado, que se tenha a TMA como taxa de retorno;
- Se o $VPL < 0$, então o investimento não é viável.

2.4.3 *Payback* descontado

Para que se tenha uma análise substancial é aconselhável também que se calcule o *Payback* descontado, o qual indica o tempo mínimo necessário para que se recupere o capital investido no projeto. Desta forma, o investidor poderá analisar se o tempo de retorno é aceitável ou não, e assim poder decidir se realizará o investimento (RABUSKE; FRIEDRICH; FONTOURA, 2018).

No *Payback* descontado, esse tempo de retorno inclui o desconto do fluxo de caixa com a taxa de juros da correção anual, a TMA. A Equação 2-2 descreve o método para o cálculo do *Payback* descontado,

$$0 = -FC_0 + \sum_{t=1}^{PD} \frac{FC_t}{(1 + TMA)^t} \quad (2-2)$$

onde:

FC_t = Fluxo de caixa no instante t ;

FC_0 = Investimento inicial;

t = Momento em que o fluxo de caixa ocorreu;

TMA = Taxa mínima de atratividade do projeto;

PD = *Payback* descontado.

2.4.4 TIR

A Taxa Interna de Retorno (TIR) indica a taxa de retorno para o qual o valor do VPL é nulo, sendo o projeto viável quando essa taxa é maior ou igual à TMA (RABUSKE; FRIEDRICH; FONTOURA, 2018).

A TIR representa a análise de um investimento para verificar a sua rentabilidade. Saber se é rentável é na prática igualar as receitas e despesas do fluxo de caixa (BATISTA; MUSSOLINI; GAUDENCIO, 2019). Quando se faz o VPL igual a zero pode se encontrar a TIR.

O cálculo da TIR é realizado conforme a Equação 2-3,

$$0 = -FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (2-3)$$

onde:

FC_t = Fluxo de caixa no instante t ;
 TIR = Taxa interna de retorno;
 FC_0 = Investimento inicial;
 t = Momento em que o fluxo de caixa ocorre;
 n = tempo total do projeto.

2.4.5 Análise de sensibilidade

Uma das fases mais importantes da avaliação da viabilidade econômica é a análise de sensibilidade. É neste ponto em que é realizada a análise das alterações nos parâmetros, e o quanto isso poderá influenciar nos resultados (COSTA; LIMA, 2020).

A sensibilidade no estudo da viabilidade econômica advém do resultado produzido por uma entrada. Essa análise consiste em verificar o quão sensível é uma saída, nas modificações de variáveis no sistema analisado (COSTA; LIMA, 2020).

A Figura 2.6 ilustra o funcionamento da análise de sensibilidade. Nessa, a entrada é composta por um conjunto de variáveis, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, de modo que se altera em cada ciclo apenas uma variável (x_i , com $(1 \leq i \leq n)$), representado pela seta vermelha). As demais permanecem fixas, representadas pelas constantes, $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, que constituem valores referenciais na análise. Desta forma, cada resposta do sistema, saída, é representado por uma variável $y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)}$ e verifica-se o quão sensível é o sistema analisado com relação à variável considerada.

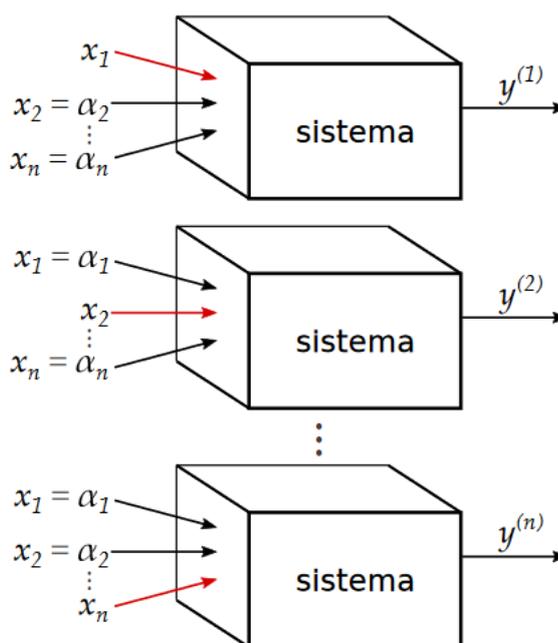


Figura 2.6: Metodologia da análise de sensibilidade univariada.

Fonte: (GOMES, 2020)

Essa variação nos resultados, modificando apenas um parâmetro do sistema por vez, é chamada de análise univariada. Entretanto existe uma forma de se verificar a saída do sistema baseada num conjunto de alterações, em que esta resposta pode ser vista do aspecto global, chamada de análise multivariada. Esta última requer um maior processamento dos dados, diferentemente da univariada, que pode ser feita com um custo computacional menor (GOMES, 2020).

A análise de sensibilidade é realizada a partir da observação do comportamento dos indicadores econômicos, como VPL, *Payback* descontado e TIR, a partir da variação de valores para alguns parâmetros considerados incertos. Dessa forma pode-se identificar, por exemplo, quais parâmetros são essenciais para o sucesso do investimento.

3 FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA EM SISTEMAS PIEZOELÉTRICOS

Este capítulo discute a principal contribuição deste trabalho que é propor um arcabouço computacional para realizar a análise técnica e econômica em possíveis cenários para a produção de energia elétrica usando células piezoelétricas. Esta proposta possui caráter multidisciplinar, envolvendo as áreas de Computação, Engenharia Econômica, Sustentabilidade e Produção de Energia. Contudo, antes de discutir o projeto e a implementação da ferramenta é apresentada a metodologia adotada no seu desenvolvimento.

3.1 Metodologia utilizada para o desenvolvimento da ferramenta computacional proposta

A metodologia adotada neste trabalho se pautou na proposta de dividir o desenvolvimento da pesquisa em um conjunto de etapas. A Figura 3.1, demonstra toda a sequência de passos utilizados para análise de viabilidade técnica e econômica da implantação de sistemas microgeradores de energia elétrica baseado no efeito piezoelétrico, em espaços onde há fluxo de pedestres. Contudo, como forma de se verificar o estado da arte e, assim, estabelecer uma base acadêmica para o trabalho, inicialmente foi realizada uma revisão da literatura na área.

Conforme evidenciado através da revisão bibliográfica, pesquisas que exploram o potencial de geração de energia elétrica através do efeito piezoelétrico em locais com movimentação de pedestres ainda são incipientes. Este fato corroborou com a motivação do trabalho. Além disso, os trabalhos relacionados identificados serviram de base para definição da metodologia, cuja primeira etapa foi a obtenção de dados que seriam utilizados no desenvolvimento da ferramenta de contagem automática de pedestres. Estes dados consistem em imagens de câmeras de segurança em um cenário típico do escopo do trabalho, assim como dimensões dos possíveis espaços de instalação das microusinas.

As coletas de imagens para a validação do sistema foram realizadas em 3 (três) momentos distintos do dia, visando analisar possíveis fluxos diferentes de pedestres. Inicialmente estavam previstas a realização dessas coletas com uma frequência e períodos



Figura 3.1: Organograma relativo à metodologia do trabalho.

Fonte: Elaborado pelo autor

suficientemente extensos para identificar possíveis padrões de sazonalidade no fluxo de pedestres ao realizar a análise técnica e econômica.

A próxima etapa da metodologia, consiste no desenvolvimento do componente de contagem de pedestres através de técnicas de visão computacional. A implementação será descrita adiante neste capítulo.

Na implementação da contagem de pedestres, como forma de verificar a acurácia foi analisado o *Root Mean Squared Error* (RMSE). A escolha desta métrica se deu por esta ser um dos métodos mais relevantes na modelagem estatística (HYNDMAN; KOEHLER, 2006) e ele foi preferido em relação ao consagrado *Mean Absolut Error* (MAE) para encontrar o erro na contagem, pois a métrica utilizada está na mesma escala que os dados avaliados (HYNDMAN; KOEHLER, 2006). Essa é uma técnica bastante utilizada para medir

diferenças entre valores da amostra que estejam previstos por uma estimativa. A Equação 3-1 demonstra como realizar o cálculo dessa métrica no cenário considerado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{c=1}^N (d_c - f_c)^2} \quad (3-1)$$

Onde:

RMSE = Raiz Quadrática Média;

N = Tamanho do conjunto de amostras;

c = Índice do conjunto de amostras;

d_c = Contagem manual por vídeo da amostra;

f_c = Contagem automática por vídeo da amostra.

Paralelo à implementação da ferramenta de contagem de pedestres, outro aspecto avaliado foi a análise de viabilidade técnica através da simulação de circuitos piezoelétricos. Essa simulação serviu de base para demonstrar a potência gerada por circuitos de tal natureza, de modo a estimar a quantidade de energia gerada total por uma placa.

A simulação do funcionamento das placas com células piezoelétricas foi baseada nos trabalhos de Farias e Sallum (2013) e Silva (2017), nos quais foram propostos projetos semelhantes ao aqui considerado.

A opção por uma simulação computacional ao invés de um protótipo da placa se deu por um conjunto de fatores. O primeiro fator, é o custo financeiro uma vez que a simulação não requer qualquer gasto. Outro motivo foi o menor tempo para obtenção da estimativa ao adotar esta opção. Por fim, o uso de um protótipo requereria implantação e monitoramento no local de instalação da microunidade (que deveria ser realizado em horários distintos). A execução desta atividade foi impossibilitada em virtude do tempo disponível para realização da pesquisa.

Pôde-se projetar com essa simulação, baseada nos componentes eletrônicos usados, a estimativa do custo de implantação de uma placa. Ação na qual serve de parâmetro para as despesas e receitas do projeto, fornecendo subsídios para a próxima fase que foi a análise de viabilidade econômica. Outro intuito de simular uma placa geradora de energia piezoelétrica foi de mostrar a potência gerada e com isso fazer um paralelo para estimar a geração de energia.

Após concluídas as fases de simulação da quantidade de energia gerada por um circuito piezoelétrico, bem como o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a contagem de pedestres de forma automatizada, iniciou-se o processo de implementação da parte de viabilidade técnica e econômica, que mostra a potencialidade de uma microunidade geradora, assim como a análise econômica. Essa, por sua vez, tem como ob-

jetivo mostrar a viabilidade econômica desse projeto, bem como a expectativa de ganhos financeiros que a mesmo poderá gerar, usando parâmetros da Engenharia Econômica.

As métricas da Engenharia Econômica utilizadas são: o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *Payback* descontado. A escolha dessas métricas se deu pelo fato de serem os principais indicadores em análise de viabilidade econômica, sendo comumente utilizadas em diversos trabalhos de Engenharia Econômica aplicada. Outra justificativa do uso de tais métricas é que elas utilizam como base para a análise o fluxo de caixa baseado nas receitas (energia produzida) e nas despesas (implantação da microusinina e manutenção desta), sendo que a prospecção da estimativa de produção de energia baseada nas fases de simulação do circuito, aliada aos resultados da contagem de pessoas, foram utilizadas como parâmetros para analisar a viabilidade econômica.

Como forma de demonstrar a ferramenta computacional proposta e também validar sua implementação, foi proposto um estudo de caso. Como estratégia de seleção do ambiente considerado foi adotada a premissa de ser um local com grande fluxo de pedestres, o que motivaria a instalação de microusinas usando piezoelectricidade. Além disso, foi adotada amostragem por conveniência, usando critérios como facilidade de acesso e de obtenção de dados como parâmetros.

Após o estudo de caso, iniciou-se a última fase do projeto, que foi a da análise de sensibilidade. Essa, por sua vez, teve como característica ser univariada. Assim, pode-se fazer um estudo do impacto econômico de cada parâmetro do projeto, descrevendo assim o quão sensível o projeto pode ser em relação as alterações de cada variável envolvidas no processo.

3.2 Simulação de um circuito piezoelétrico

O modelo de circuito gerador de energia usando células piezoelétricas adotado como referência, extraído do trabalho de Farias e Sallum (2013), foi simulado computacionalmente usando a ferramenta *Quit Universal Circuit Simulator* (QUCS) (BRINSON; JAHN, 2009), versão 0.0.18, sistema *open source* na plataforma Linux. Através deste simulador foi possível ter uma estimativa de quanto se produz de energia usando os parâmetros obtidos pelo fabricante dos componentes.

O simulador em questão é um software avançado na aquisição de resultados em diversos tipos de diagramas (LIMA, 2015), pois além da simulação simples da resposta, faz uma análise de sensibilidade de alguns tipos de componentes eletrônicos. Este software também pode ser utilizado para importar modelos do *Simulation Program Integrated Circuit Emphasis* (SPICE) (NAGEL, 1973), ferramenta computacional amplamente difundida no meio acadêmico para a simulação de circuitos elétrico-eletrônicos. Outro aspecto que

levou à escolha de tal software é que o mesmo possui uma interface gráfica, facilitando assim a sua utilização.

O QUCS possui diversos pacotes de componentes eletrônicos, sendo composto por quatro módulos:

- o editor esquemático de circuitos elétricos;
- o simulador propriamente dito;
- a biblioteca de componentes elétricos;
- as ferramentas de síntese e análise da simulação.

Todos os módulos trabalham integrados ao mesmo ambiente computacional (SILVA; MARTINS; COSTA, 2012), o que favorece a simulação de um sistema elétrico, pois gera os resultados esperados sem a necessidade de outro software.

Outra vantagem que o simulador apresenta é oferecer interface para o uso com linguagens de programação, como Python. Contudo, a integração entre o simulador em questão e a ferramenta computacional proposta não foi implementada pois apenas os resultados da simulação foram incorporados na ferramenta. Dessa forma, como será discutido adiante neste capítulo, os dados inseridos pelo operador da ferramenta computacional são informações pertinentes a valores e dimensões físicas dos sensores e placas. Com isso, embora o usuário tenha que inserir características físicas de componentes eletrônicos e/ou similares, a ferramenta de análise técnica e econômica já estima a quantidade de energia produzida pelo sistema, com base em resultados de simulações prévias e usando os parâmetros necessários para tal fim.

3.2.1 Modelo simulado no QUCS

Nesta seção são apresentada a simulação de um circuito semelhante ao de uma placa contendo circuitos PZT. Para essa foi adotado empiricamente o esquema apresentado na Figura 3.2, onde a placa possui 9 (nove) sensores PZT. A quantidade de sensores foi estabelecida tendo como base o layout do circuito. A inserção de mais sensores apenas aumenta a magnitude das correntes e potência. Dessa forma, em um circuito real, utilizando o modelo em questão, com dimensões de $2m$ de largura por $1m$ de comprimento (gerando uma placa de $2m^2$) seria possível inserir até 1.632 conversores piezoelétricos (células) por placa.

O modelo adotado (FARIAS; SALLUM, 2013), e adaptado às condições do projeto, foi escolhido pois condiz com o que se deseja propor como norteador para a criação desse sistema integrado. Outros projetos semelhantes também foram analisados para se entender o funcionamento dessa tecnologia. Esse modelo é relativamente simples e objetivo para o que se deseja alcançar. Desse modo, pode-se modelar na ferramenta computacional,

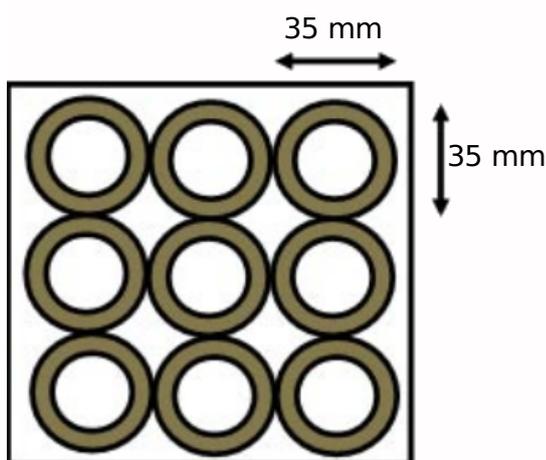


Figura 3.2: Disposição dos sensores PZT em uma placa de células piezoelétricas.

Fonte: Imagem produzida pelo autor

a partir dos parâmetros utilizados na simulação, cenários mais complexos e diversos do analisado.

Para efeitos de desempenho do material piezoelétrico, dadas as condições de utilização do mesmo, o indicado para este tipo de aplicação é PZT-5H. Esses sensores apresentam melhores propriedades do material piezoelétrico para condições onde não há mudanças bruscas de temperatura, como é o caso de ambientes ao ar livre (CARTER; MATHEWS; BARNES, 2020). Dessa forma, este sensor não é adequado para ambientes com condições extremas, como os industriais que podem apresentar temperaturas muito elevadas.

O modelo dessa placa usando sensores PZT é muito utilizado comercialmente devido a sua facilidade de implantação e de alta eficiência na conversão de energia mecânica em elétrica (MALMONGE *et al.*, 2009). A Figura 3.3 mostra um exemplo de PZT sendo usado para tal finalidade. Na imagem, o fio vermelho está soldado no positivo do transdutor e o preto no negativo.

A estimativa de geração de energia foi obtida através do modelo apresentado na Figura 3.4. Neste modelo, as células piezoelétricas foram substituídas por fontes de corrente alternada. Essa alternativa se justifica pela capacidade desse tipo de transdutor em produzir uma corrente elétrica quando pressionado.

No circuito simulado, colocou-se um retificador de onda completa para gerar apenas sinais contínuos na saída. Assim, a corrente gerada poderá ser utilizada em dispositivos eletrônicos de baixa potência ou para que sejam armazenados em banco de capacitores.

A simulação pode ser realizada modelando um circuito contendo os sensores PZT representados por fontes de corrente usando o ambiente de desenvolvimento do



Figura 3.3: Exemplo de transdutor PZT.

Fonte: (JINGDEZHEN, 2020)

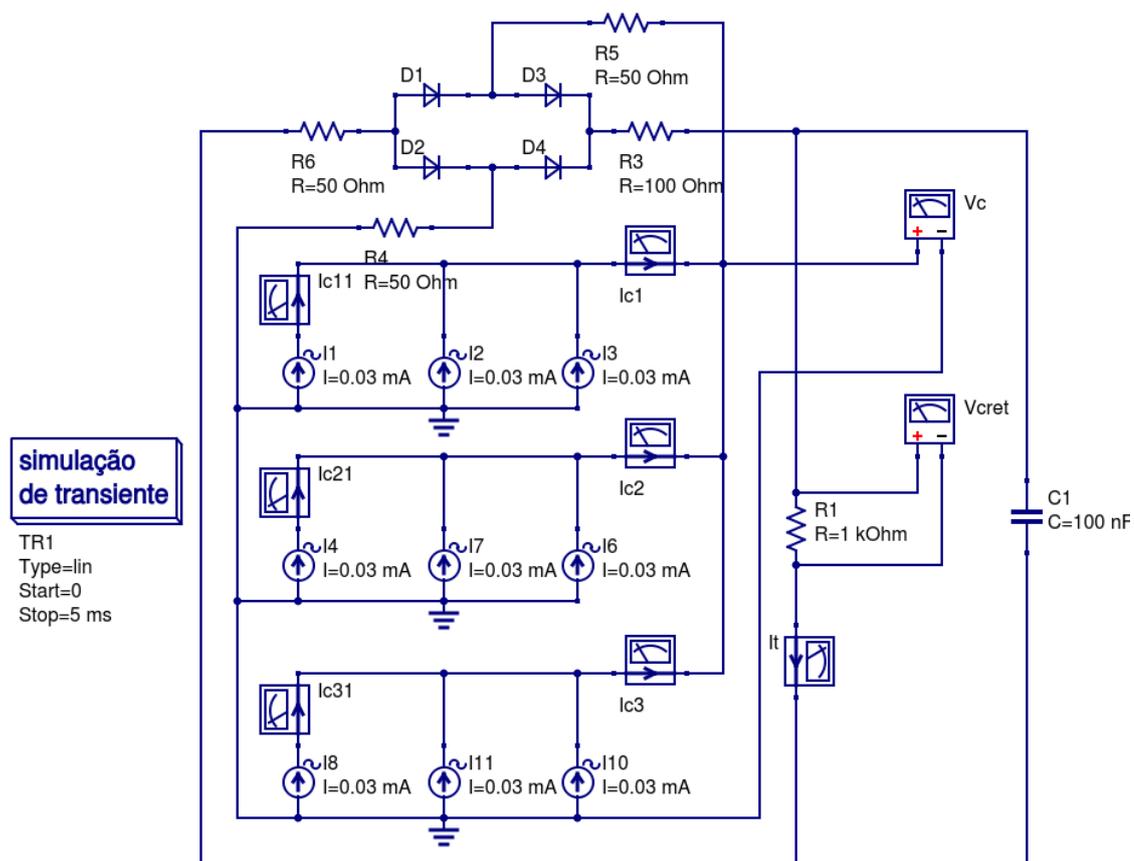


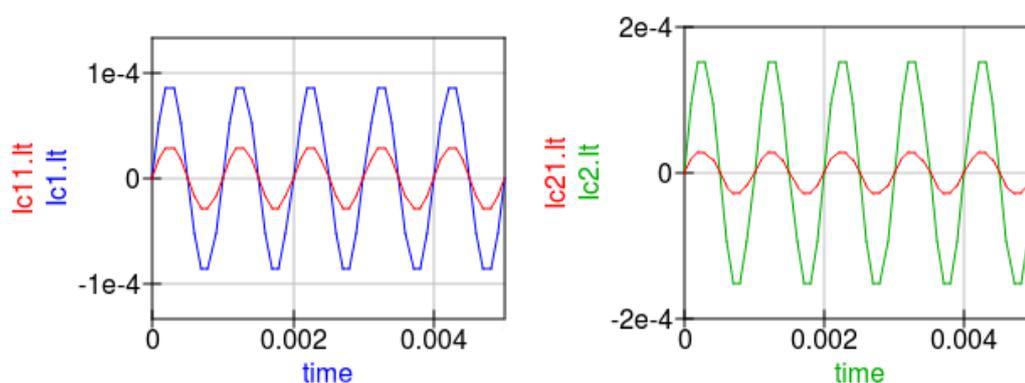
Figura 3.4: Circuito modelado para simular nove sensores PZT.

Fonte: Elaborada pelo autor

QUCS, como pode ser visto na Figura 3.4. A simulação consiste em mostrar o quanto poderá ser produzido de energia levando em consideração que todos os sensores sejam

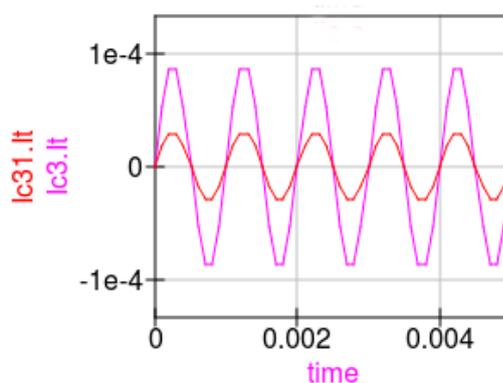
pressionados simultaneamente. Como resultado, seria possível produzir algo em torno de $0,27mA$, num espaço de aproximadamente $110,25cm^2 = (9 \cdot (3,5^2))$.

As respostas usando o modelo são apresentados na Figura 3.5. Além da análise de tensão, os gráficos apresentados nesta figura mostram as correntes aferidas nos amperímetros $I_{c11} \cdot I_{c1}$, $I_{c21} \cdot I_{c2}$, $I_{c31} \cdot I_{c3}$. Esses demonstram os valores das correntes em apenas um sensor em relação à associação em paralelo de três sensores. Assim, quando associados em paralelo, se tem a magnitude dessas correntes ampliada três vezes, ou seja, quando associados em paralelo os PZT têm suas correntes somadas.



(a) Gráfico de I_{c11} em relação ao I_{c1} .

(b) Gráfico de I_{c21} em relação ao I_{c2} .



(c) Gráfico de I_{c31} em relação ao I_{c3} .

Figura 3.5: Respostas dos circuitos das correntes internas I_c .

Fonte: Elaborada pelo autor

O gráfico $I_{c11} \cdot I_{c1}$, Figura 3.5(a), mostra as correntes internas quando pressionado apenas um sensor, e quando todos os sensores da mesma linha estiverem pressionados, fazendo com que as correntes sejam somadas. Da mesma forma, são os gráficos da $I_{c21} \cdot I_{c2}$, Figura 3.5(b), e $I_{c31} \cdot I_{c3}$, Figura 3.5(c), o que demonstra a soma total destas correntes. De um modo geral, as correntes individuais podem ser obtidas pela Equação

3-2,

$$f(x) = \sum_{j=1}^z I_c(j) \quad (3-2)$$

onde z seria a quantidade de sensores PZT.

Na estimativa de geração de energia foi considerado o cálculo para perdas inerentes a materiais e geração, que influem diretamente no fluxo de caixa e, conseqüentemente, na viabilidade econômica. O método usado para isso foi estimar a média das perdas analisadas por Neto (2012) e Queiroz (2010). Estes trabalhos estimam as perdas pelo material piezoelétrico e na geração de energia usando a piezoeletricidade. A Equação 3-3 demonstra essas perdas,

$$p = mt + g \quad (3-3)$$

onde:

p = perdas com materiais e geração;

mt = Perdas com materiais PZT, conforme Neto (2012);

g = Perdas com a geração de energia conforme Queiroz (2010).

A média da área do pé de um adulto é de $27\text{cm} \times 9\text{cm}$ (JOKURA, 2008), o que representa uma área em torno de 243cm^2 . Dividindo este valor pela área de um sensor (aproximadamente $A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (\frac{3,5}{2})^2 = 9,62\text{cm}^2$), chega-se à conclusão que um pé poderia atingir até 25 sensores piezoelétricos por vez, sem considerar o espaço entre sensores. Aplicando esse valor na Equação 3-2 tem-se que a corrente gerada por um pé pode ser de até 0,75 A, caso seja utilizado um sensor PZT-5, gerando 0,03mA por pressão.

Como pode ser observado na Figura 3.6(a), a corrente total, apresentada como I_t , definida como o somatório de todas as correntes produzidas pelos sensores, após passar pelo retificador de onda completa, praticamente ficou contínua, tendo um pouco de *ripple* (pequena ondulação gerada pela perturbação do próprio dispositivo eletrônico). Além disso, percebe-se o somatório de todas as correntes geradas pelos supostos sensores PZT, ali medidos pelos amperímetros virtuais I_{c11} , I_{c1} , I_{c21} , I_{c2} , I_{c31} e I_{c3} .

A tensão produzida V_c simulando uma carga de $1\text{k}\Omega$ ficou na magnitude de 1,65V para cada pico, tendo sido retificada gerando uma tensão de saída V_{cret} entre 0,2V e 0,3V, como pode ser observado na Figura 3.6(b). Esse gráfico mostra uma queda de tensão proporcional à produzida pelas células piezoelétricas, tal fato se dá pela queda de tensão nos diodos da ponte retificadora, que ficam em torno de 0,7V.

Outra análise que se fez nessa simulação, demonstrada na Figura 3.6(a), foi a da I_t , corrente total do circuito. Essa foi analisada em cada ciclo de onda de 8 (oito) mili-

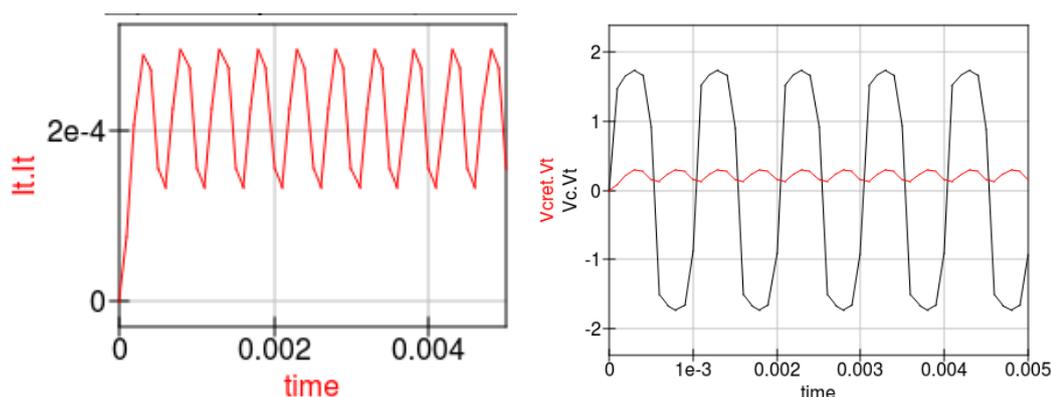
(a) Resposta do I_t .(b) Resposta do V_c .

Figura 3.6: Respostas dos circuitos das correntes total I_t e a tensão de saída V_c

Fonte: Elaborada pelo autor

segundos cada. Nessa análise, ficou constatado que após o sinal das correntes elétricas produzidas pelos sensores em paralelo e retificadas, a corrente total teve uma magnitude de pico de $0,285mA$, o que corresponde à soma das correntes de todos os 9 (nove) sensores após pressionados.

A partir da determinação deste transdutor piezoelétrico, pode-se determinar um tamanho médio da placa (FARIAS; SALLUM, 2013) pela dimensão da largura da calçada. A partir desta medida é possível projetar uma rede de transdutores em paralelo (MARQUI; OKI, 2015) e determinar a quantidade de sensores por placa. Como resultado, é determinada a potência gerada pelo fluxo de pessoas que ali trafegam.

As placas podem ter dimensões de $9600cm^2$, nas quais as calçadas possuem, por norma geral pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), $120cm$ de largura. Usou-se para efeito de cálculo $80cm$ comprimento, desta forma $120cm \cdot 80cm = 9600cm^2$. Assim com os sensores PZT de $35mm$, ou $3,5cm$, de diâmetro cada (MURATA, 2020), pode-se ter até 783 sensores num tapete com esta configuração, considerando que um sensor esteja disposto paralelamente a outro sem lacuna espacial entre os mesmos.

3.3 Implementação de um componente para contagem de pedestres

Para a contagem de pessoas que caminham em um determinado local foram utilizadas técnicas de visão computacional através da linguagem *Python*. A implementação realizada permite determinar humanos caminhando em imagens coletadas de câmeras de segurança e, conseqüentemente, fazer a contagem destas.

O *Integrated Development Environment* (IDE) utilizado para o desenvolvimento dessa aplicação computacional foi o *Pycharm* (JETBRAINS, 2021), devido à sua boa usabilidade. A implantação foi baseada na biblioteca *OpenCV* (OPENCV, 2021), que oferece um conjunto de algoritmos baseados em Inteligência Artificial nas linguagens *Python* e *C*.

A detecção de objetos é realizada usando como base o algoritmo SSD (ROSENBROCK, 2018). O algoritmo anterior foi aplicado à arquitetura de rede neural *MobileNet* (ROSENBROCK, 2018), de modo que foi usada a técnica de rastreamento por centroides, para realizar o rastreamento desses objetos, no caso específico dessa aplicação, pedestres caminhando sobre calçadas.

A arquitetura de rede neural *MobileNet*, possui a característica de ter uma alta detecção de pessoas, mais de 99% de acertos, em ambientes sem oclusão e outras adversidades. A vantagem dessa rede é que devido ao seu pre-treinamento ter sido realizado com mais de 1 (um) milhão de imagens, a detecção pode se dar em tempo real (ZHANG *et al.*, 2015). Outro fator que culminou na escolha desta rede é o fato dela não requerer alto poder de processamento, podendo ser utilizada em máquinas convencionais.

Após a detecção do objeto se atribui um ID (uma identificação, um número relativo àquele ser humano). Esse ID será computado e incrementado à medida que o sistema reconheça e comece a rastrear esse objeto. Conforme vão surgindo objetos (seres humanos caminhando), uma variável incrementa o valor que tinha anteriormente do último ID com esse próximo, e assim é feita a contagem.

Os arquivos treinados dessa rede neural se encontram na plataforma *Caffe* (JIA *et al.*, 2014), um *framework* em *Python* para aprendizagem de máquina (ROSENBROCK, 2018), na qual há um disparo de objetos e, a partir dessa detecção, se começa o rastreio, ao ser utilizado o centroide do objeto. Portanto, primeiro detecta-se o objeto para logo em seguida rastreá-lo. As Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10 mostram a sequência de passos do algoritmo para o reconhecimento utilizando centroides.

Na Figura 3.7 percebe-se que após a detecção do objeto, delimita-se o espaço destes e calcula o centroide (centro de massa deste objeto que será rastreado).

Na Figura 3.8 é mostrado o cálculo da distância euclidiana entre cada par de centroides (originais e novos). Como neste caso trata-se de pontos bidimensionais, $P = (p_x, p_y)$ e $Q = (q_x, q_y)$, a distância para cada par é computada pela Equação 3-4,

$$dpq = \sqrt{(p_x - q_x)^2 + (p_y - q_y)^2} \quad (3-4)$$

onde:

dpq = Distância mínima entre dois pontos;

p_x e q_x = Abscissas dos pontos;

p_y e q_y = Ordenadas dos pontos.

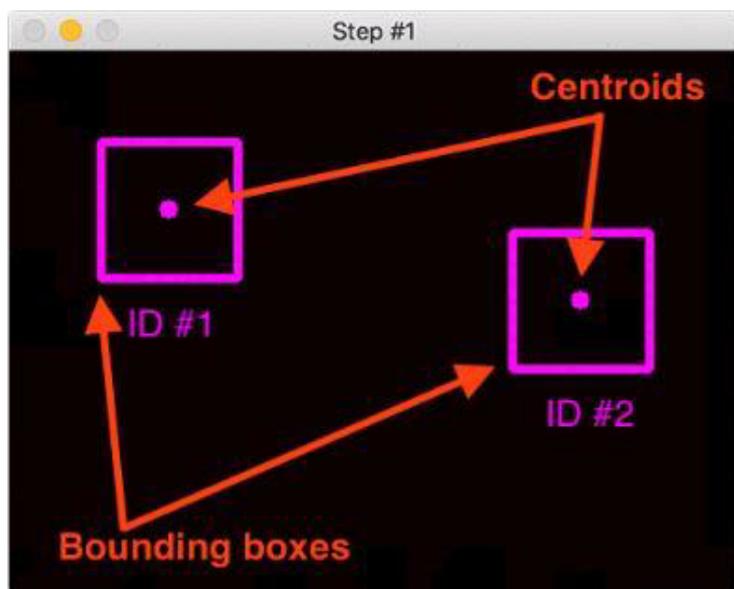


Figura 3.7: Criação da delimitação e cálculo do centroide de cada objeto.

Fonte: (ROSENBROCK, 2018)

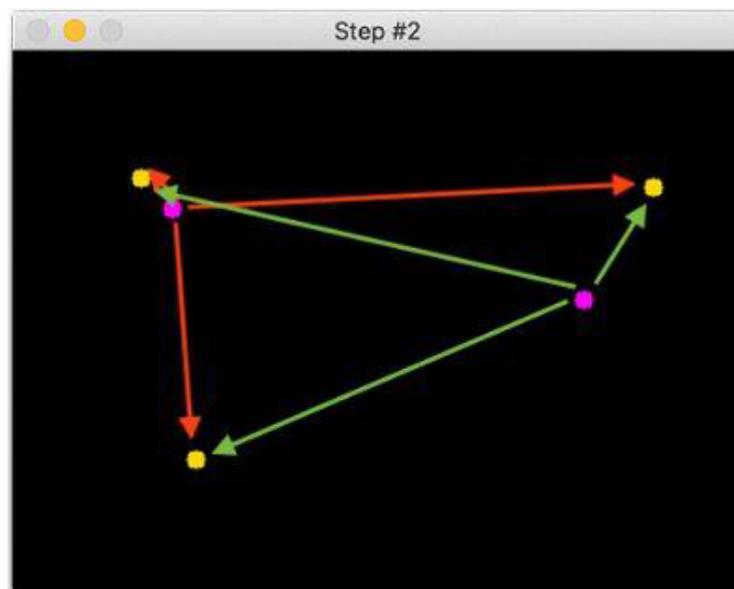


Figura 3.8: Cálculo da distância euclidiana entre cada par de centroides originais e novos centroides.

Fonte: (ROSENBROCK, 2018)

Através da distância calculada, é determinada a distância mínima entre os centroides, fazendo assim o rastreamento de cada objeto, conforme ilustrado na Figura 3.9. As interrogações nesta figura indicam que não houve emparelhamento deste centroide com outro, indicando possivelmente que exista um novo objeto.

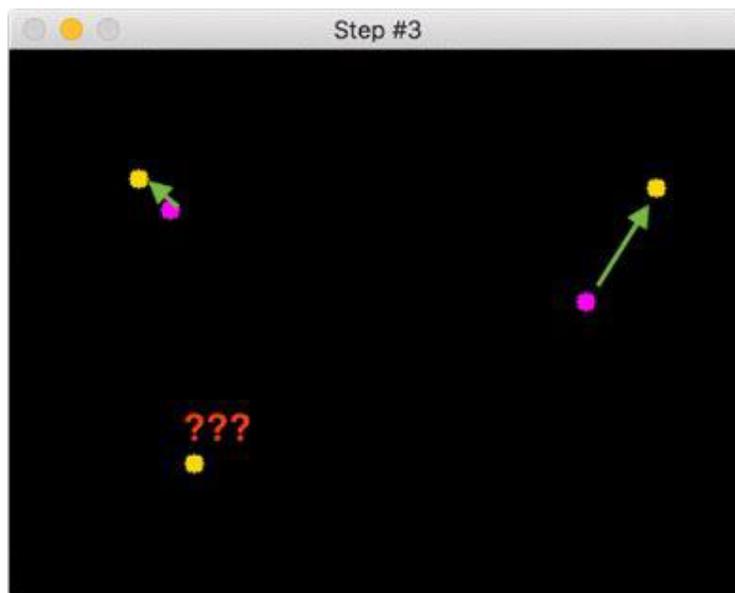


Figura 3.9: Método simples de Object Tracking com centroides associando as distâncias minimizadas.

Fonte: (ROSENBROCK, 2018)

A Figura 3.10 mostra os objetos identificados por esse algoritmo. Esses são supostamente humanos caminhando na região delimitada do vídeo. Cada um é identificado com um número, ID, que é enviado a uma variável para acumular e fazer a contagem de pessoas detectadas e que caminharam naquela região monitorada pelo vídeo.

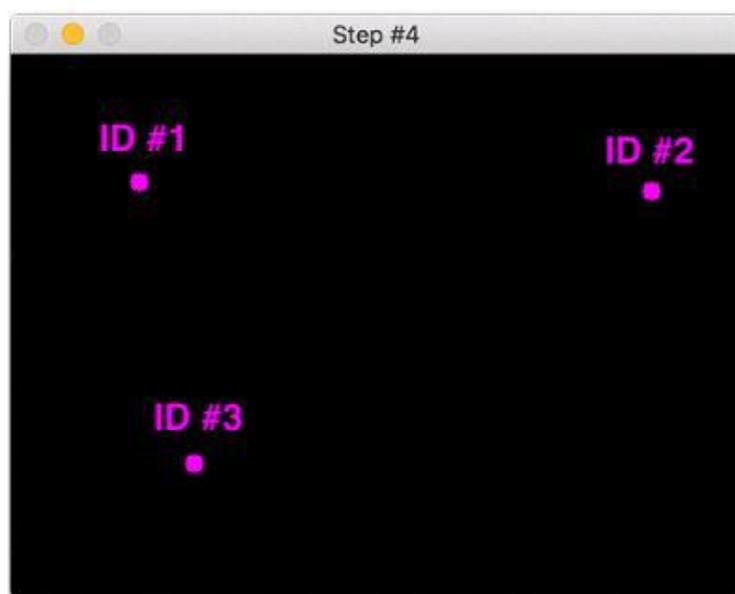


Figura 3.10: Identificadores associados aos objetos detectados.

Fonte: (ROSENBROCK, 2018)

Por simplicidade, a implementação realizada não considera o tratamento de oclusão e sombras. Isso se deve ao fato de ter sido adotada uma abordagem pessimista,

visto que o não tratamento destes aspectos faz com que a contagem possa estar divergente da contagem real. Contudo, é evidente a necessidade de oferecer estimativas precisas em todos casos, o que é tido como um trabalho futuro.

Conforme será discutido na próxima seção, o usuário deve especificar no vídeo a suposta região de instalação da placa. A contagem de pedestres é então realizada utilizando a técnica discutida e tendo como base a região especificada. A Figura 3.11 mostra uma imagem do componente em execução contando pessoas que estão passando por uma área delimitada na calçada andando nos dois sentidos. A detecção de pedestres é realizada no espaço predeterminado pelo usuário, que representará a possível área de implantação das placas geradoras de energia. Assim, pedestres que não ultrapassarem completamente ou que estejam próximos à linha representando a área não serão contabilizados, bem como os que esteja transitando na rua adjacente à calçada. Portanto, apenas pedestres que cruzarem a linha amarela, serão contabilizados pelo sistema.



Figura 3.11: Exemplo de execução do componente de contagem de pedestres.

Fonte: Imagem produzida pelo autor

O processo de monitoramento é iniciado após a identificação do pedestre e o incremento da variável que armazena a quantidade de pessoas que trafegaram pela linha amarela é atualizado sempre que há este monitoramento. No canto inferior esquerdo da Figura 3.11 verifica-se o controle de pessoas que cruzarem a linha subindo ou descendo. Outro detalhe na imagem é o *status* da execução do algoritmo, que na figura em questão, está em "*Detecting*". Isso implica que o sistema computacional está detectando um novo pedestre e delimitando os seus centroides.

A entrada para o componente constitui um ou mais vídeos nos quais será realizada a contagem de pedestres. Caso seja especificado um diretório, todos os vídeos

ali localizados serão examinados usando as mesmas coordenadas.

3.3.1 Fluxo da contagem

A ferramenta realiza a comparação de diferentes cenários, e para isso é estabelecido como padrão que cada diretório da entrada equivale a um cenário. Dessa forma, espera-se que todos os vídeos passados como entrada em um mesmo diretório digam respeito a uma mesma localização. Tendo isso como premissa, a contagem de pedestres pelo componente implementado segue um conjunto de etapas que serão discutidas a seguir.

3.3.1.1 Início da configuração

A execução inicia-se com a escolha do ponto inicial para traçar a reta que delimitará a região de contagem. A Figura 3.12 mostra essa etapa de execução.



Figura 3.12: Início da execução do sistema de contagem de pedestres, escolha do ponto inicial para traçar a reta.

Fonte: Elaborada pelo autor

Na saída padrão, é exibido a coordenada do ponto inicial escolhido. Neste caso, como exemplo, o usuário clicou no ponto [183,269], que seriam as coordenadas 'X = 183' e 'Y = 269' na imagem.

No caso do eixo 'Y', o ponto zero seria na extremidade superior e o mesmo aumenta no sentido inferior da imagem. Já o eixo 'X' começaria à esquerda como o ponto 0 (zero) e aumenta positivamente à medida que progride à direita na imagem.

3.3.1.2 Delimitação da reta

Nesta fase de execução, o usuário clica no outro ponto na extremidade oposta ao ponto inicial, de modo que uma reta seja traçada. A Figura 3.13 mostra a reta traçada após a escolha dos dois pontos na imagem pelo usuário.



Figura 3.13: Escolha do segundo ponto na imagem, de modo que se possa traçar uma reta para a delimitação da área de contagem.

Fonte: Elaborada pelo autor

Após a execução deste passo, os pontos de interesse inicial e final ([183,269] e [331,268], respectivamente neste caso) formam uma reta. Pode ser observado, também por meio da Figura 3.13, o início da contagem de pessoas que ultrapassam a linha “subindo” (*up*) ou “descendo” (*down*), além do status de execução do algoritmo. Conforme destacado, é assumido que todos os arquivos de um mesmo diretório são relativos a uma mesma localização. Em virtude disso, a delimitação da reta através desta etapa e da anterior é realizada uma única vez para cada diretório, sendo as coordenadas estabelecidas usadas para todos os vídeos deste diretório.

3.3.1.3 Término da execução do vídeo

Após a análise de cada vídeo, o sistema gera um pequeno relatório que mostra:

1. Tempo do vídeo (horas, minutos e segundos).
2. Duração do vídeo em segundos.
3. O processamento do algoritmo em FPS (*frames* por segundo).
4. Pedestres contados no tempo total do vídeo.
5. A estimativa por hora de pedestres, baseada no tamanho total do vídeo.

6. A média de pessoas por hora.

O item 6, mostra a possibilidade de se gerar uma média da contagem de pedestres com um ou múltiplos vídeos. Isso é possível no momento em que o usuário escolhe a opção de inserir apenas um vídeo, ou um diretório contendo diversos vídeos para que se realize a contagem de pedestres. Portanto, caso o usuário insira apenas um vídeo, a média será numericamente o mesmo valor do item de estimativa de pedestres por hora. Caso seja inserido múltiplos vídeos, a saída será uma média aritmética da estimativa por hora de pedestres considerando os diferentes vídeos analisados.

A Figura 3.14 mostra esse relatório após a conclusão da contagem de pessoas no vídeo. É importante ressaltar que nesta figura a imagem da câmera exibida é referente ao próximo vídeo de entrada, uma vez que o relatório só é exibido após o processamento e fechamento do vídeo relacionado. Por essa razão, a contagem exibida (4 no total) não equivale à quantidade exibida no relatório (25 neste exemplo).

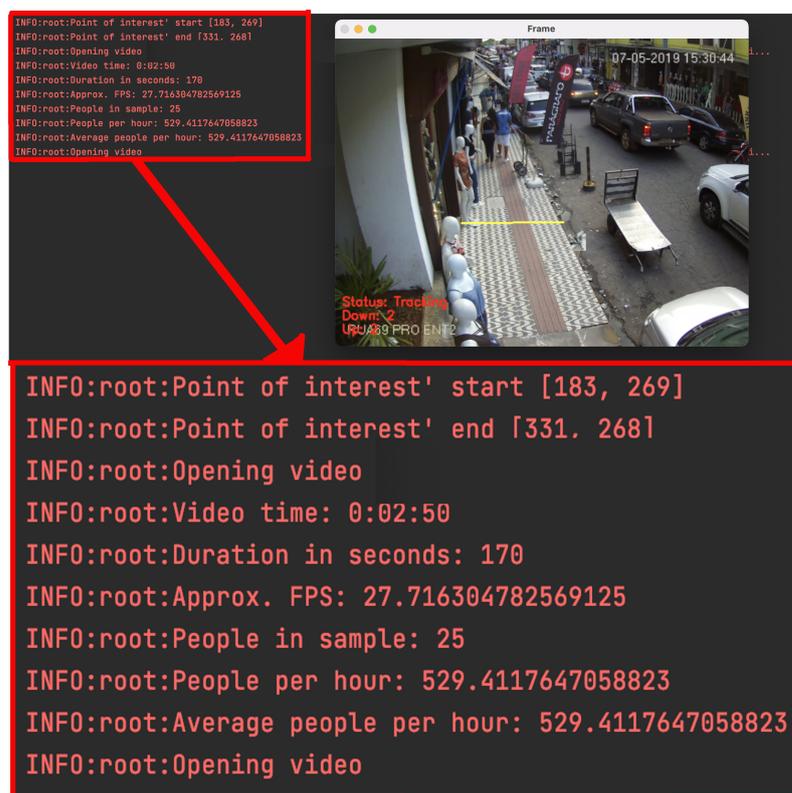


Figura 3.14: Término da execução do vídeo, com o relatório produzido após o processamento deste pelo sistema de contagem de pedestres.

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.1.4 Relatório Final de execução

Após o término do processamento de todos os vídeos de entrada é gerado um relatório que é baseado na quantidade de vídeos inseridos no sistema. Essa informação varia conforme a entrada que o usuário pretenda analisar. Portanto, se o usuário quiser analisar a contagem de pedestres durante uma semana, de uma determinada câmera, o mesmo deverá inserir na pasta todas as imagens referentes a esse período.

Consequente a execução de todos os vídeos inseridos como parâmetro pelo usuário, é mostrado um relatório com todos os dados relativos ao processamento de cada vídeo conforme descrito na etapa anterior. Além disso, nesta etapa é calculada a média de pedestres por hora para cada cenário.

Com os dados obtidos da contagem manual analisa-se a confiança entre a contagem manual e automática. O índice de confiança proposto por Neyman (1937) indica a confiabilidade da estimativa. O intervalo com nível de confiança de 95% significa que o resultado está dentro do intervalo de confiança em 95 das 100 amostras realizadas. Esses são realizados a partir da diferença entre a contagem manual e a automatizada.

3.4 Análise da viabilidade econômica

A partir dos resultados da simulação do funcionamento dos sensores piezoelétricos e da estimativa de contagem de pedestres é possível analisar a viabilidade de implantação de microusinas, tendo como base princípios da Engenharia Econômica.

O fluxo de tarefas implementadas por este componente da ferramenta computacional está descrita na Figura 3.15. Os detalhes de cada processo, serão demonstrados no decorrer desta seção.

3.4.1 Parâmetros de entrada e configuração

A primeira etapa é a entrada de dados, pelo usuário:

- qte_placas: Quantidade de placas que o usuário deseja instalar naquele passeio público;
- tma: Taxa mínima de atratividade escolhida para o projeto;
- anos_projeto: Quantidade de anos em que o projeto está sendo analisado.

Também são considerados dados derivados do processamento dos vídeos, gerados pelo componente de contagem de pedestres. A variável qte_pedestres_hora é a estimativa da quantidade de pedestres que caminham por hora em cada um dos cenários considerados.

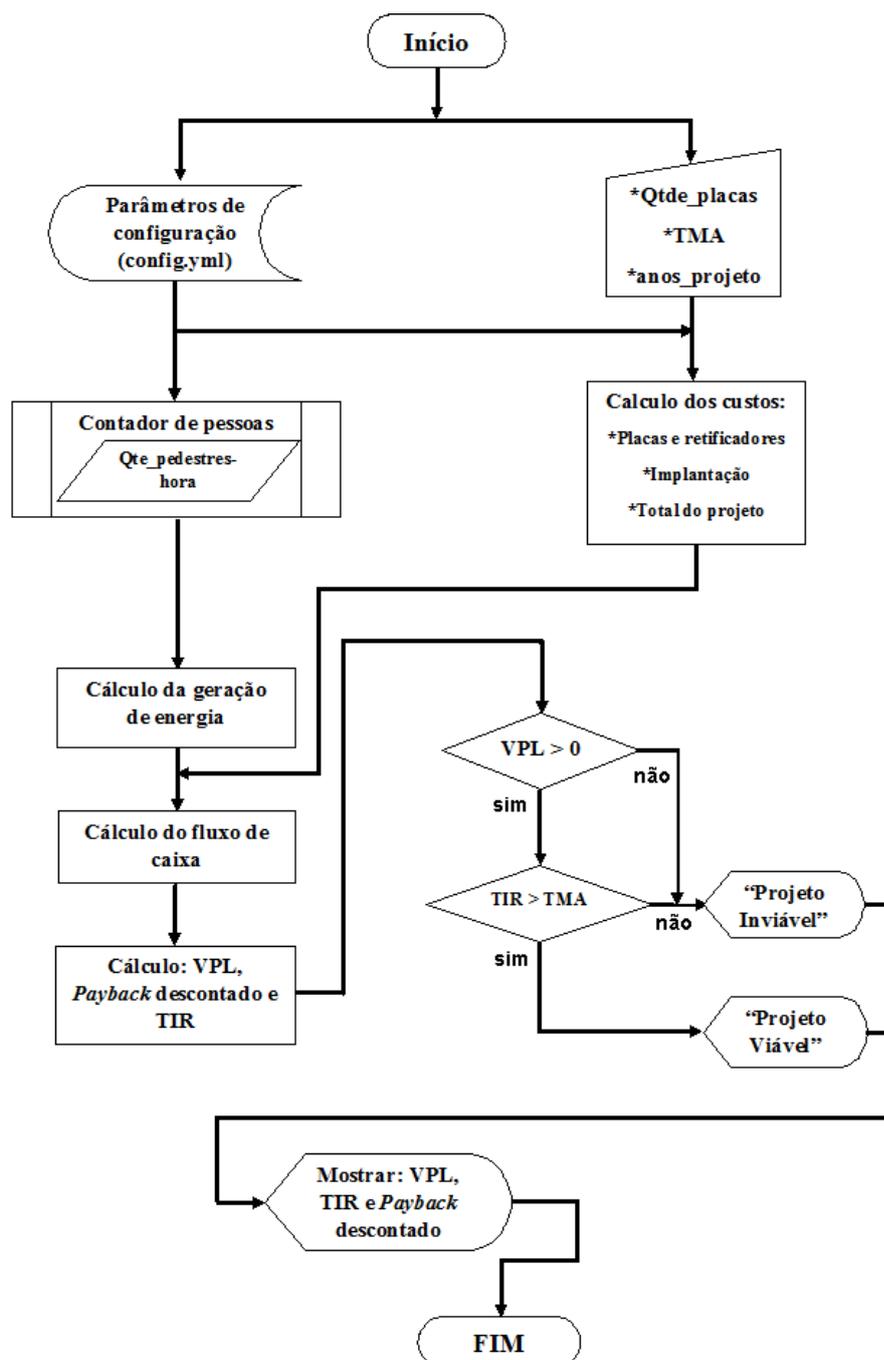


Figura 3.15: Fluxograma com a descrição geral da ferramenta de análise econômica.

Fonte: Elaborada pelo autor

Outro componente da entrada são os parâmetros de configuração especificados no arquivo *config.yml*. O Código 3.1 apresenta um exemplo de especificação deste arquivo, sendo que o mesmo é dividido em duas partes (contagem de pessoas e usina), cujos elementos são explicados a seguir.

Código 3.1 Arquivo de configuração da ferramenta computacional.

```
1 # Parâmetros da contagem
2 contagem_pessoas:
3     cenarios:
4         # Um ou mais arquivo ou diretório e dimensão da calçada
5         - cenario:
6             media: # vídeo ou diretório
7             largura: # largura da calçada analisada em metros
8             tamanho_video: # tamanho em pixel dos vídeos
9     frames_ignorados : # quantidade de frames ignorados na detecç
10         ão
11     confianca : # índice de confiança
12 # Parâmetros do projeto da microusina
13 usina:
14     custo_materiais: # Valores em reais
15     diodo: # valor do diodo
16     PZT: # valor do sensor PZT
17     resistor: # valor do reistor
18     capacitor: # valor do capacitor
19     conexao: # valor da conexão dos fios com a placa
20     placa: # valor da placa de fenolite
21     mao_de_obra_tecnica: # valor da hora de trabalho
22     gestor_projeto: # valor empenhado ao responsável pela
23         obra (Engenheiro)
24     cabos: # valor do metro do fio
25     kWh: # valor do kWh
26     estrutura_mecanica: # valor da base de sustentação
27
28     parametros_piezeletricos:
29         corrente: # corrente elétrica gerada por um PZT
30         potencia: # potência gerada por um PZT
31         sensores: # fator de divisão do tamanho da placa
32         pe: # quantidade sensores aplicados atingidos por um pé
33         tempo_instalacao_placas: # tempo em horas para instalação
34         de uma placa
35         tempo_instalacao_retificadores: # tempo em horas para
36         instalação dos retificadores
37         perdas_geracao: # percentual de perdas na geração
38         perdas_do_material: #percentual de perdas na produção
```

A utilização de um arquivo de configuração em vez de fornecer todos os dados necessários diretamente na entrada deve-se ao fato dos parâmetros estabelecidos no arquivo em questão serem atributos para os quais não há alterações significativas ao se considerar o escopo de utilização da ferramenta desenvolvida. Já aqueles que são fornecidos diretamente como entrada possuem maior variação, não fazendo sentido serem tratados como parâmetros de configuração.

O arquivo de configuração definido no formato YAML (YAML, 2021), cuja estrutura é mostrada no Código 3.1, possui os seguintes parâmetros que são inseridos pelo usuário do sistema antes da execução:

- **Contagem de pessoas:**

- **cenario:**

- * **midia:** O vídeo ou conjunto de vídeos relativos a um determinado cenário de instalação da microusina;
- * **largura:** Parâmetro relativo à largura da calçada do cenário em questão;
- * **tamanho_video:** Parâmetro que indica o tamanho do vídeo em *pixels*, relativo à qualidade da resolução dele. A delimitação do vídeo é um parâmetro crucial para determinar a precisão de contagem do sistema. No reconhecimento dos padrões do vídeo, a aplicação utiliza uma área retangular (com as coordenadas ao redor da linha delimitada pelo usuário).

- **frames_ignorados:** Parâmetro de configuração do vídeo da quantidade de *frames* que podem ser ignorados na contagem, ou seja, a tolerância do *tracking*;

- **confianca:** índice de confiança para que um objeto seja considerado como pedestre;

- **Usina:**

- **custo_materiais:**

- * **diodo:** Valor médio de mercado do diodo;
- * **PZT:** Valor médio de mercado do sensor piezoelétrico;
- * **resistor:** Valor médio de mercado do resistor;
- * **capacitor:** Valor médio de mercado do capacitor;
- * **conexão:** Valor médio do elemento de conexão dos dispositivos eletrônicos (conector das placas);
- * **placa:** Valor médio de uma placa para montagem do circuito retificador;
- * **mao_de_obra_tecnica:** Valor médio da hora de trabalho de um técnico em eletrônica;

- * **gestor_projeto**: Valor médio para a criação do projeto por um profissional;
- * **cabos**: Valor médio do metro das conexões (fios) usadas nos circuitos eletrônicos;
- * **kWh**: Valor médio do kWh cobrado pela concessionária;
- * **estrutura_mecanica**: Estimativa do valor da estrutura mecânica média que servirá de suporte para os PZTs (placa de coleta de energia da microusinina).

– **parametros_piezeletricos**:

- * **corrente**: Valor da corrente elétrica gerada pela pressão sobre um sensor PZT;
- * **potencia**: Valor da potência gerada pelo PZT após ser pressionado;
- * **sensores**: Fator de divisão do tamanho da placa, ou seja, o tamanho do sensor em relação ao tamanho da placa;
- * **pe**: Quantidade de sensores atingidos por um pé médio adulto;
- * **tempo_instalacao_placas**: Tempo médio para montagem e instalação de uma placa coletora de energia;
- * **tempo_instalacao_retificadores**: Tempo médio de montagem e instalação das placas retificadoras do sinal elétrico produzido;
- * **perdas_geracao**: Percentual de perdas na geração de energia, de outros fatores que não sejam advindos de elementos materiais;
- * **perdas_do_material**: Percentual de perdas na geração de energia devido a componentes físicos.

3.4.2 Cálculo dos custos e capital inicial

Após o fornecimento dos parâmetros de entrada e configuração, o próximo passo no fluxo de processamento é o cálculo do custo das placas. Esse procedimento necessita das variáveis citadas anteriormente. As peças e componentes eletrônicos variam o preço conforme o custo do dólar, tendo em conta que são produzidos em outros países. Já as características de especificações técnicas, como potência, faixa de operação e características físicas limitantes são encontradas nos *Datasheets* (folha de dados do fabricante).

Nessa análise, o cálculo se baseia nas simulações feitas anteriormente, na quantidade de componentes eletrônicos e nos tipos destes. Para isso, leva-se em consideração a quantidade de materiais necessários para que seja modelada uma placa com a dimensão da calçada especificada no arquivo de configuração.

O custo de implantação das placas é um cálculo que envolve o custo da mão de obra, que depende do valor hora de trabalho daquele profissional. Outra variável indispensável é a quantidade de placas geradoras instaladas no projeto, o que aumentaria a quantidade de recursos materiais e humanos (mão de obra) além do responsável técnico, chamado na ferramenta de “gestor do projeto”.

O primeiro dado que a ferramenta traz é a média de pedestres por hora: obtida por intermédio dos dados enviados pelo componente de contagem de pedestres. Subsequente à média de pedestres é dada como resposta ao usuário o custo por placa, onde este é calculado com os parâmetros do custo dos dispositivos que estejam contidos nesta.

Além do custo material da placa, existe um custo agregado que consta no sistema que é a mão de obra. Essa por sua vez depende da complexidade do sistema, mas por via de regra, baseia-se na implantação de um sistema fotovoltaico em pequenas empresas ou residências, devido às características semelhantes, por serem microusinas geradoras de energia (ENERGIA, 2020).

Desta forma, obtém-se o valor do custo total, dado pela Equação 3-5, de modo que as variáveis estão diretamente relacionadas aos custos materiais das placas e da implantação destas.

$$C_t = (C_p + C_r + C_{ti}) \times Q_p \quad (3-5)$$

Onde:

C_t = Custo total do projeto em reais

C_p = Custo de produção por placa em reais

C_r = Custo do retificador em reais

C_{ti} = Custo total de implantação da placa em reais

Q_p = Quantidade de placas

3.4.3 Geração de energia

Na continuidade do fluxo de processamento da ferramenta, inicia-se o cálculo da geração de energia, baseado na quantidade e dimensão das placas geradoras. Nesta fase é realizado o processamento de dados cujo objetivo é estimar por intermédio da quantidade de pessoas que caminham ali, o quanto de energia poderia ser produzida, já descontando possíveis perdas na geração.

Segundo Jokura (2008), o pé do brasileiro no tamanho 35 equivale a uma dimensão de 25cm de comprimento e 6,22cm aproximadamente de largura, sendo que o comprimento aumenta 0,66cm a cada número do padrão de calçados brasileiros. Além disso, tem-se que a média de numeração de um adulto é em torno de 38 a 44 para homens e de 34 a 40 para mulheres. Assim, segundo pesquisa do IBGE (IBGE, 2021), a população

brasileira é composta de aproximadamente 108 milhões de mulheres e 103 milhões de homens (total de 211 milhões). Com base nisso, têm-se que o tamanho médio do pé masculino adulto e do feminino são respectivamente:

$$M_{pm} = \frac{38 + 44}{2} = 41 \quad (3-6)$$

$$M_{pf} = \frac{34 + 40}{2} = 37 \quad (3-7)$$

onde:

M_{pm} = média do pé adulto masculino em pontos parisienses

M_{pf} = média do pé adulto feminino em pontos parisienses

Fazendo uma média ponderada em relação aos tamanhos médios dos pés de homens e mulheres em relação à proporção da população adulta brasileira, tem-se que:

$$M_{pe} = \frac{(M_{pm} \cdot P_m) + (M_{pf} \cdot P_f)}{P_b} \quad (3-8)$$

onde:

M_{pe} = média do pé adulto brasileiro em pontos parisienses

P_m = população masculina brasileira em números absolutos

P_f = população feminina brasileiro em números absolutos

P_b = população total brasileira em números absolutos

Substituindo os valores das Equações 3-6 e 3-7 na Equação 3-8 tem-se que:

$$M_{pe} = \frac{(41 \cdot 103 \cdot 10^6) + (37 \cdot 108 \cdot 10^6)}{211 \cdot 10^6} = 38,95$$

Podemos inferir que a média do pé adulto brasileiro M_{pe} é de 38,95 pontos parisienses (unidade de medida de calçado) (JOKURA, 2008). Multiplicando este valor por 0,66cm (comprimento relativo a cada número de calçado) tem-se que a média de comprimento do pé adulto brasileiro é 26,1cm de comprimento. Assim, a área média de um pé adulto é de:

$$A_{pe} = 26,1cm \cdot 6,22cm = 162,34cm^2 \quad (3-9)$$

Desse modo tem-se que a quantidade de sensores atingidos por pé é em média,

$$Q_s = \frac{A_{pe}}{A_s} \quad (3-10)$$

onde:

Q_s = Quantidade de sensores atingidos por um pé;

A_{pe} = Área média de um pé adulto (em cm^2);

A_s = Área aproximada de um sensor PZT-5H (em cm^2);

Isso implica que cada passada pode atingir até 14 sensores dispostos em média, se for levado como aspecto construtivo o PZT-5H ou semelhante (3,5cm de diâmetro).

A quantidade de passadas atingidas no conjunto de células piezoelétricas vai variar de acordo com o tamanho das placas fornecidas pelo usuário. A quantidade está diretamente ligada ao comprimento destas, em que placas com comprimento superior a 0,80m ou 80cm, valor médio de uma passada de um adulto (STUDENSKI *et al.*, 2011), terão mais de uma pisada sobre a placa, produzindo uma quantidade maior de energia.

A Equação 3-11 mostra a relação da quantidade de sensores relativos à área da placa por uma passada média humana adulta.

$$Q_{pas} = \frac{l}{0,80} \quad (3-11)$$

onde:

Q_{pas} = Quantidade de passadas em relação ao comprimento da placa;

l = Comprimento da placa.

Assim, a geração de energia está diretamente ligada aos seguintes fatores:

- Quantidade de pedestres caminhando naquele local por hora, Q_{ph} ;
- Quantidade de passadas de um pedestre sobre uma placa, Q_{pas} ;
- Quantidade de sensores atingidos pelo pé, Q_s ;
- Quantidade de placas, Q_p ;
- Potência de cada Sensor τ ;
- Perdas na produção de energia p (em porcentagem relativos aos elementos físicos);
- Quantidade de potência produzida em *Watt*.

A Equação 3.4.3, por sua vez, mostra como foi modelado o cálculo da geração de energia na ferramenta computacional, de modo que a quantidade de placas, de sensores

atingidos por um pé e a potência estão diretamente ligados à quantidade de energia (E dada em kWh).

$$E = [(Q_{ph} \cdot Q_{pas} \cdot Q_s \cdot \tau) \cdot Q_p] \cdot (1 - p) \quad (3-12)$$

Por exemplo, seja um ambiente que tenha em média 750 pessoas caminhando por hora, e que tenha uma placa com 1 metro de comprimento (equivalente 1,25 passadas por pedestre com 10 sensores sendo atingidos por cada passada, em média). Caso seja utilizado sensores PZT (com potência de 0,1W), considerando uma média de perdas de 21% na geração, seria produzido:

$$E = [(750 \cdot 1,25 \cdot 10 \cdot 0,1) \cdot 1] \cdot (1 - 0,21) = 834,375Wh \approx 0,83kWh$$

3.4.4 Cálculo do fluxo de caixa

Um fator observado nesta parte da ferramenta é o fluxo de caixa estimado. Essa análise depende dos fatores construtivos citados anteriormente. Neste cálculo é levado em consideração a produção diária de energia, pela quantidade de horas de grande fluxo de pedestres nas microusinas. Desta maneira, a energia que está sendo produzida nestas é a receita do fluxo de caixa.

Destarte no fluxo de caixa, é considerado despesa do projeto as manutenções periódicas mensais, realizadas de forma preventiva e corretiva dos equipamentos da microusina. Assim, elas se acumulam, bem como as receitas mensalmente até fecharem o fluxo de caixa anual.

O método de implementação do cálculo do fluxo de caixa é do tipo recursivo, onde o F_{c0} a cada ciclo de um ano assume o valor do F_c , ou seja para cada ano subsequente o investimento inicial seria o fluxo de caixa do ano anterior e assim sucessivamente.

Esse método de cálculo é aplicado ao período de funcionamento da microusina dentro do prazo de manutenção. Este tempo é intrínseco à definição periódica de manutenção preestabelecida, conforme o movimento de pedestres e desgastes dos equipamentos que compõem a microusina geradora.

Outro fator pertencente ao fluxo de caixa é a periodicidade na qual o sistema produtor de energia gera resultados. Esse fator é o que demonstra a capacidade de geração de energia. Dessa forma, o elemento de energia (E) da Equação 3.4.3 é tratado como 0 (zero) para as horas em que espera-se um fluxo insignificante de pedestres.

Os fluxos de caixa anuais são utilizados no cálculo da VPL e da TIR, como também darão suporte ao estudo econômico do *Payback* descontado.

3.4.5 Cálculo dos indicadores de viabilidade econômica

A principal parte da ferramenta proposta é a implementação das métricas de Engenharia Econômica, consideradas, a saber: o VPL, a TIR e o *Payback* descontado.

Para se calcular a TIR usou-se um algoritmo iterativo a partir da Equação 2-3, em que se faz uma chamada à função do VPL (LUSTOSA, 2019), conforme apresentado na Equação 2-1 (RABUSKE; FRIEDRICH; FONTOURA, 2018).

A saída do cálculo realizada na função é a taxa interna de retorno, baseada nos fluxos de caixa de todo o período analisado.

Após calcular os três principais indicadores econômicos para realizar a análise de viabilidade, foi implementada uma função para mostrá-los ao usuário da ferramenta computacional.

Essa parte da ferramenta faz comparações da TMA com a TIR para saber qual é a taxa mais rentável. Outro fator analisado neste trecho do código é o que indica se o VPL garante que o investimento é viável, além de mostrar o *Payback* do investimento inicial.

O Algoritmo 3.1 mostra a análise feita pelos três indicadores, onde são passados para essa função como parâmetros:

- o VPL;
- o capital inicial investido no projeto;
- o tempo em anos e meses calculado pela função *payback*, esses são inferidos através das variáveis *pm* (ano que aconteceu o *payback*) e *pa* (a quantidade de meses que houve o *payback*);
- o tempo total do investimento;
- a TMA fornecida pelo usuário;
- a TIR calculada.

Algoritmo 3.1: viabilidade_economica

Entrada: vpl, c_inicial, pm, pa, t, tma, tir

```

1 início
2   vpl ← vpl - c_inicial
3   se vpl > 0 então
4     Saída: O VPL foi Positivo e é viável
5     payback(pm, pa)
6     se tir > tma então
7       | Saída: TIR mais atrativa que a TMA
8     senão
9       | Saída: TMA mais atrativa que a TIR
10    fim
11  senão
12    se v=0 então
13      | Saída: O VPL teve mesmo resultado que outro investimento com a TMA
14      payback(pm, pa)
15    senão
16      | Saída: VPL negativo, projeto NÃO viável
17    fim
18  fim
19 fim

```

A principal função da ferramenta (demonstrada no Algoritmo 3.1), é a de gerar um relatório mostrando as variáveis econômicas para cada região analisada. Essa análise demonstra se o investimento é viável ou não, cumprindo assim com o objetivo principal que é o de construir uma ferramenta computacional proposta na pesquisa.

Com a ferramenta implementada, o próximo passo da pesquisa é avaliar o sistema computacional, inserindo valores baseados na obtenção de dados de um cenário propício. No Capítulo 4 será explanada a execução da ferramenta, usando como cenário a região comercial de shoppings do centro de Goiânia, próximo à rodoviária desta cidade.

4 ESTUDO DE CASO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA PROPOSTA

Este capítulo objetiva realizar um estudo de caso usando a ferramenta computacional proposta no trabalho, afim de demonstrar a aplicação da mesma e permitir sua validação. O cenário selecionado é a região da Rua 44 em Goiânia e a adjacência, mais precisamente os passeios que dão acesso ao shopping Mega Moda ¹. A Figura 4.1 mostra uma imagem aérea do local analisado no estudo de caso.



Figura 4.1: Imagem de Satélite que mostra a região do estudo de caso.

Fonte: (MAPS, 2021b)

A região de shoppings populares de Goiânia possui uma grande movimentação de pessoas diariamente, motivo pelo qual foi escolhida como cenário. Comerciantes de outras cidades procuram esse local para levarem mercadorias para suas origens com a finalidade de comercializarem as mesmas. Segundo dados da Associação Empresarial da Região da 44 (AER44) os comerciantes se dividem em cerca de 12 mil comércio, dentro das galerias e shopping, além das 8 mil barracas da chamada Feira Hippie que funciona nas proximidades da rodoviária de Goiânia aos finais de semana. Isso o torna o segundo

¹<https://www.megamoda.com.br>

maior centro comercial do Brasil, atrás apenas da região do Brás em São Paulo (FREITAS, 2017).

Por ser um local de muita movimentação de pessoas, possui grande potencial de aplicação de microusinas piezoelétricas, sendo assim um ambiente de muita relevância para o objeto de estudo. O grande movimento de pessoas nessa região se dá em um perímetro de aproximadamente 1,5km, em que a AER44 estima que aproximadamente 700 mil pessoas trafeguem por ali mensalmente, e que no fim de ano esse número ultrapassa a marca de 1 milhão de pessoas (MARZANO, 2018). A Figura 4.2 mostra uma imagem de satélite desse local, onde as ruas 67 e 69, destacadas na figura, foram utilizadas para a coleta de dados.

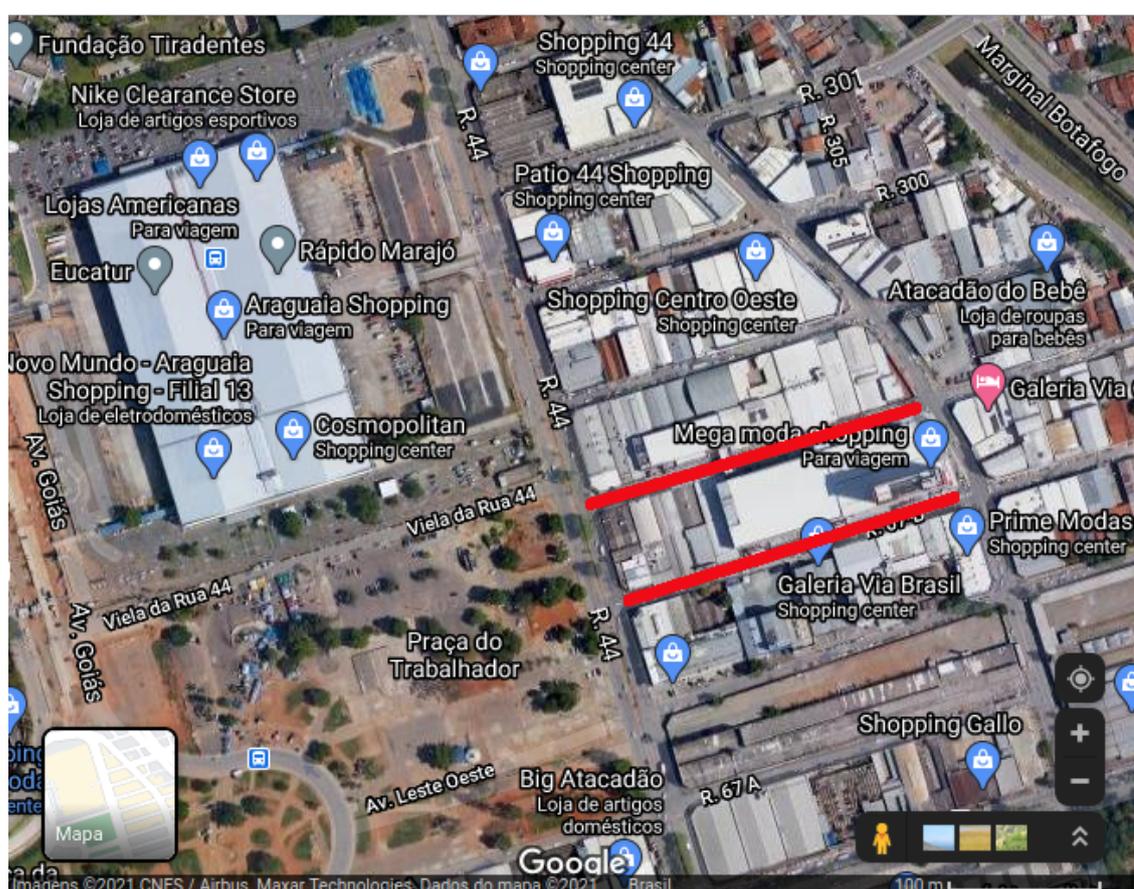


Figura 4.2: Imagem de satélite destacando o cenário do estudo de caso.

Fonte: (MAPS, 2021a)

4.1 Coleta de dados e contagem de pedestres

Para a contagem de pedestres, a princípio o objetivo era analisar imagens de um período de 1 (um) ano visando capturar possíveis padrões de sazonalidade. Isso se dá

porque durante esse período o movimento no comércio local possui variações conforme as demandas de festividades do calendário nacional e regional. No entanto, isso foi inviabilizado por problemas técnicos na coleta dos dados junto ao shopping, e no ano seguinte veio a pandemia devido ao vírus COVID-19. Com isso, o comércio no local ficou fechado por quase 4 (quatro) meses.

Além dos problemas citados, a análise ficou limitada a imagens referentes ao mês de maio de 2019, devido à problemas técnicos na obtenção de imagens. Apesar dos problemas adversos, o estudo ainda é viável devido à quantidade de vídeos coletados e às diversas simulações. Entretanto é evidente que para uma precisão maior do potencial de geração de energia, seria interessante uma maior quantidade de vídeos analisados.

As imagens obtidas das câmeras de segurança foram coletadas periodicamente durante uma semana, em três momentos distintos do dia. As imagens obtidas foram provenientes de quatro câmeras, posicionadas em locais distintos. No período da manhã foram captadas imagens de pessoas transitando entre 10h30min da manhã, no início da tarde por volta de 12h45min e no meio da tarde por volta das 15h30min. Esses horários estavam sincronizados com o padrão UTC-3, horário oficial de Brasília. Os vídeos tiveram duração média de 02 min 50 seg.

A alternância de horários para a coleta de dados se dá pelo fato de que o shopping funciona das 08h às 18h. A análise de todo o período não foi possível em virtude do volume de dados que deveria ser fornecido pela administração do shopping. Diante disso, foi solicitado apenas amostras representativas do objeto em estudo. Portanto, existem três momentos diferentes de movimento, no período da manhã (imagens coletadas às 10h30min), no período do almoço (imagens coletadas às 12h45min) e no período da tarde (às 15h30min). Com isso espera-se uma diferença no fluxo de pedestres, o que poderia influenciar até mesmo no horário de manutenção caso fosse necessário realizá-la num dia comercial. Essa alternância também é importante no momento de gerar a média de pedestres, para dar uma maior variabilidade na coleta de dados, o que geraria uma maior confiabilidade. Além do mais, nos períodos fora do horário comercial, o fluxo de pessoas naquele local é mínimo, pois aquela região é na sua grande maioria comercial, o que corrobora para a exclusão desses horários na potencial produção energética. Dessa forma, foi considerado que após as 18h até 8h do dia seguinte a produção é inexistente.

As Figuras 4.3(a), 4.3(b), 4.3(c) e 4.3(d) mostram as imagens das 4 câmeras utilizadas. Cada uma dessas câmeras e, conseqüentemente, o local capturado foi considerado como um cenário distinto para aplicação da microusinha piezoelétrica. A primeira delas, câmera 14, localiza-se na Rua 69, próxima à entrada 2 do shopping em análise. A outra câmera usada na contagem, a 17, é situada na Rua 67 próxima à entrada 8. As outras câmeras, 19 e 23, estão localizadas respectivamente nas ruas 67 e 69. A linha amarela traçada pelo usuário delimita a região que representa onde supostamente a microusinha seria

instalada. Portanto a contagem de pedestres acontece na região indicada no vídeo.



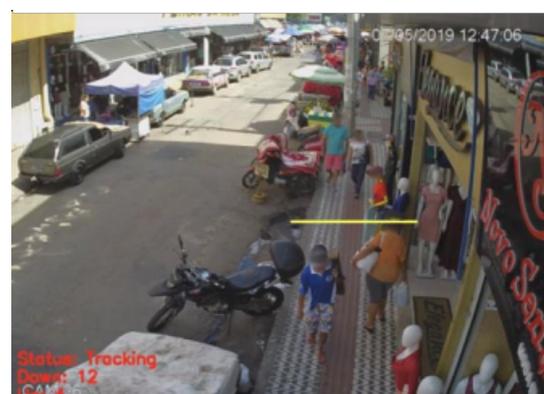
(a) Imagem da câmera 14.



(b) Imagem da câmera 17.



(c) Imagem da câmera 19.



(d) Imagem da câmera 23.

Figura 4.3: Imagens coletadas na região do shopping Mega Moda, usadas para a contagem de pedestres.

Fonte: Elaborada pelo autor

Um vez que a contabilização de pedestres de forma automática varia conforme a área delimitada, a posição desta no vídeo, a precisão da identificação e a quantidade de quadros eliminados no vídeo, o valor estimado foi comparado com a contagem manual realizada através de repetidas visualizações de cada vídeo. Essa comparação foi realizada adotando diferentes execuções da contagem automática (considerando variação na posição e na área delimitada). Os resultados são apresentados na Tabela 4.1 que possui 6 (seis) campos, organizados em:

- **Dia:** o dia em que o vídeo foi coletado;
- **Câmera:** a câmera de segurança usada na coleta;
- **Horário:** o horário da gravação do vídeo;
- **Manual:** a quantidade de pedestres dada pela contagem manual;
- **Automático:** a média das contagens dada por repetidas execuções da ferramenta da contagem automática;

- **I.C. (95%):** intervalo de confiança (95%), usado para analisar as médias estatísticas entre a contagem manual e a automática.

Tabela 4.1: Comparação da contagem de pessoas manual e automática usando o sistema de contagem de pedestres.

Dia	Câmera	Horário	Manual	Automático	I.C.(95%)
04/05/2019	14	10h30m	40	43	2,8
	17	10h30m	63	56	2,39
	19	12h25m	73	78	2,04
	23	15h30m	69	60	3,06
07/05/2019	14	10h30m	13	18	1,62
	17	12h30m	17	29	2,85
	19	12h45m	19	24	3,18
	23	15h30m	23	24	2,22
08/05/2019	14	10h30m	12	13	2,36
	17	12h45m	40	46	3,35
	19	15h30m	29	33	3,37
	23	15h30m	32	38	2,68
09/05/2019	14	10h30m	17	20	2,67
	17	10h30m	25	28	3,49
	19	12h45m	32	39	2,79
	23	15h30m	32	35	3,09
10/05/2019	14	10h30m	27	37	2,27
	17	12h45m	39	39	3,18
	19	12h45m	33	40	2,77
	23	15h45m	40	47	3,05
11/05/2019	14	10h30m	41	41	2,89
	17	12h45m	56	56	3,21
	19	15h30m	48	48	3,34
	23	15h30m	51	56	3,12

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados obtidos das contagens foi calculado o RMSE do sistema, obtendo-se um erro médio absoluto de aproximadamente 5,55 pessoas. Esse erro máximo não inviabilizaria a projeção de produção de energia, algo que poderia influenciar no aspecto construtivo da ferramenta computacional uma vez que este erro está representado através das variáveis de perdas inseridas no sistema.

Como forma de visualizar a comparação, a Figura 4.4 mostra os dados da contagem manual comparadas com a contagem automatizada. No gráfico, fica visível que essas contagens geraram valores próximos uma da outra, corroborando desta maneira para a utilização do algoritmo de contagem de pessoas na ferramenta computacional proposta.

Através da análise realizada, pode-se concluir que o desvio da quantidade contada manualmente pela automatizada não impactará significativamente na produção de geração de energia.

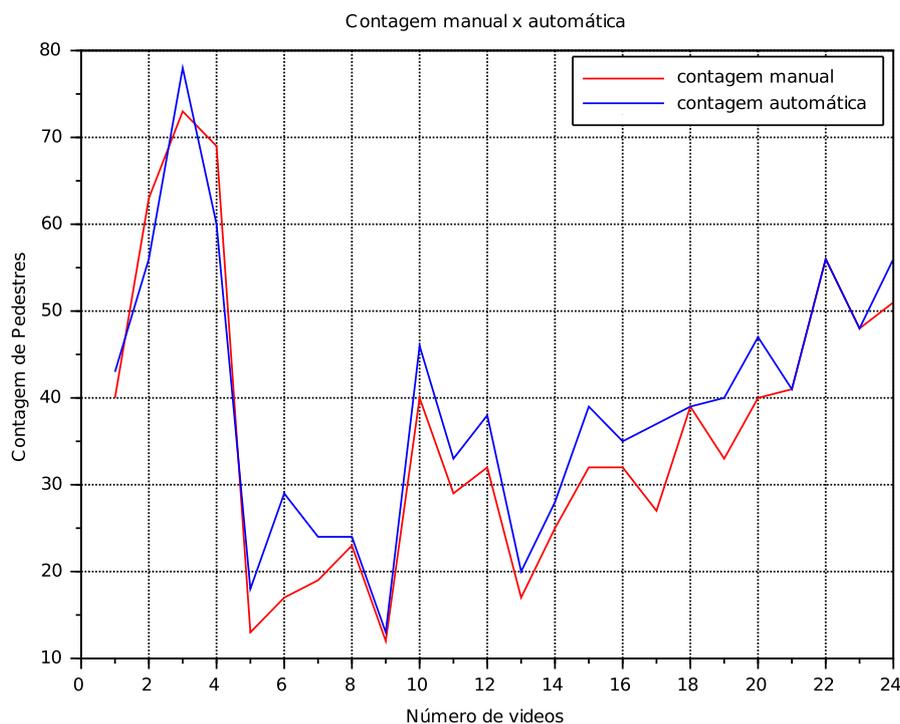


Figura 4.4: Comparação da contagem automática com a manual.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Um fator comprovado no sistema de contagem de pedestres através deste estudo de caso é que quando se aumenta a resolução dos vídeos e diminui a quantidade de quadros ignorados no *Tracking* o processo de identificação dos pedestres se torna mais lento. Este comportamento era esperado uma vez que esta configuração aumenta a quantidade de processamento a ser realizado na detecção e rastreamento de objetos, causado pelo aumento da quantidade de *pixels* e quadros a serem analisados. O tratamento destes casos adversos é tido como trabalho futuro.

Durante as execuções de teste, constatou-se também que quanto maior a área de abrangência escolhida, mais pessoas serão contadas, porém algumas podem ser contabilizadas de forma errônea por não estarem na suposta região em que as placas estarão instaladas. Por exemplo: ao ampliar a região de contagem, pessoas que estejam caminhando na rua próxima à calçada serão contabilizadas, quando na verdade não deveriam estar incluídas na contagem. Quando se delimita o espaço somente da calçada, pode-se observar que a contagem passa a ser mais precisa, pois elimina mais ruídos ou pessoas que estejam caminhando em outros locais adversos ao desejado. Por outro lado, ao se delimitar a dimensão de maneira muito precisa à largura da calçada alguns pedestres podem não ser contados. Isso é especialmente verdade nos casos em que a pessoa caminha muito próximo à lateral.

Durante as contagens manuais comparadas com as automáticas, pôde-se perceber que em vídeos onde há uma maior aglomeração de pessoas, os erros de detecção de pessoas aumentam. Esse elemento também pode ser usado para trabalhos futuros, na otimização do algoritmo.

4.2 Análise da viabilidade econômica

Para a análise de viabilidade econômica, o custo por referência do *kWh* usado no estudo de caso foi de R\$ 0,80 (NGSOLAR, 2021). Contudo, tal valor varia conforme a bandeira e o estado. A escolha deste valor se deu por ser o resultado do reajuste da tarifa comercial do ano 2020 para 2021 referente ao estado de Goiás (NGSOLAR, 2021).

A Tabela 4.2 mostra os componentes relacionados aos materiais piezoelétricos, onde os valores inseridos como custo são variáveis dependentes do mercado e do preço do Dólar. Nesse empreendimento, os valores inseridos são estimativas médias baseadas dos preços do ano de 2020.

Parâmetro (custo)	Valores	Referência
diodo	R\$ 0,15	(ELETROGATE, 2019)
PZT	R\$ 6,35	(ELETROGATE, 2019)
resistor	R\$ 0,05	(ELETROGATE, 2019)
capacitor	R\$ 0,05	(ELETROGATE, 2019)
conexão	R\$ 0,60	(ELETROGATE, 2019)
placa	R\$ 4,00	(ELETROGATE, 2019)
mão de obra técnica	R\$ 35,00	(CESAR, 2021)
gestor do projeto	R\$ 4.500,00	(CESAR, 2021)
cabos	R\$ 0,30	(ELETROGATE, 2019)
estrutura mecânica	R\$ 50,00	(ELETROGATE, 2019)

Tabela 4.2: Parâmetros piezoelétricos construtivos (custos)

Com relação à estimativa de geração de energia foi considerado que o gerador é alimentado por um período de 10 horas. Além disso, as perdas com geração ficam entre 8% e 12% segundo Neto (2012) utilizando a média entre eles que fica em torno de 10%. Já a perda em relação aos materiais neste tipo de projeto fica entre 5% e 17%, (QUEIROZ, 2010). Utilizando a Equação 3-3 em que é gerada a média de perdas de geração somadas à média de perdas materiais, obtém-se o valor de 21%.

Tem se, ainda, que a produção de energia depende de outros fatores diretamente ligados ao aspecto construtivo, como por exemplo a potência gerada na pressão de um PZT, aqui estabelecida como sendo a de um adulto que pese aproximadamente 70 kg. Com isso a corrente gerada por um sensor isoladamente também está ligada ao fator técnico descrito na folha de dados do fabricante. Essas informações técnicas estão contidas na Tabela 4.3.

Parâmetro (característica)	Valores	Referência
corrente (PZT)	0,03 mA	(FARIAS; SALLUM, 2013)
potência (PZT)	0,1 W	(SILVA, 2017)
sensores	35 mm	(FARIAS; SALLUM, 2013)
pé	10 (sensores atingidos)	(JOKURA, 2008)
Tempo instalação das placas	8 horas	Estimado pelo autor
Tempo instalação dos retificadores	8 horas	Estimado pelo autor
RMSE	5,55 pedestres	Equação 3-1
Perdas do material e geração	21%	(NETO, 2012) (QUEIROZ, 2010)

Tabela 4.3: *Parâmetros piezoelétricos construtivos (características)*

Os valores inseridos na Tabela 4.3 possuem relação com outros trabalhos já realizados e pesquisas científicas, além de análise de mercado, como mostrado no quadro. Entretanto, dois fatores constantes nesse quadro foram determinados de forma empírica, o tempo de instalação das placas e dos retificadores. Esses foram inferidos em um dia de serviço, pois devido à baixa complexidade de montagem dos circuitos eletrônicos do projeto não seria necessário mais do que 1 (um) dia de serviço de um técnico para executar tal atividade. Este valor foi estimado tendo como base um sistema de produção de energia solar, sendo necessário em média de 2 a 3 dias para a montagem das placas, inversores e dispositivos de proteção, conforme Energia (2020) estima na instalação de um sistema de energia solar para pequenas empresas.

Com os dados da contagem e os parâmetros constantes nos Quadros 4.2 e 4.3, já estabelecidos no sistema através do arquivo de configuração, o usuário deve fornecer como entrada os parâmetros do projeto.

Como discutido no capítulo anterior, a primeira entrada a ser fornecida pelo usuário na ferramenta computacional será a dimensão em m^2 da placa que irá captar energia mecânica e transformá-la em elétrica, através das células de PZT instaladas. Para o estudo de caso em questão foram feitas diversas simulações, porém para efeito de análise utilizamos placas com duas dimensões: 1,50m de comprimento e 1,00m de

largura (totalizando $1,50m^2$) e $2,3m$ de comprimento e $1,0m$ de largura (totalizando $2,3m^2$). Essas dimensões foram adotadas considerando as larguras das calçadas do estudo de caso.

A quantidade de placas por calçada é outro parâmetro inserido pelo usuário. No caso da análise no estudo de caso proposto foram considerados casos com 1 (uma) e 2 (duas) placas por calçada.

Outro parâmetro inserido externamente é a TMA, que é o índice que norteia o investimento realizado pelo financiador do projeto. No caso dessa análise foi feita uma simulação com a média em torno de $7,5\%$ ao ano, pois a taxa SELIC em 2020 ($2,74\%$) (BCB, 2020), ficou muito abaixo da sua média histórica.

Por último, o parâmetro do tempo do investimento foi inserido no sistema. Nela o usuário especifica em anos o tempo em que ele estima analisar o seu investimento inicial.

4.3 Resultado para os diferentes cenários do estudo de caso

Esta seção discute os resultados obtidos para os diferentes cenários do estudo de caso. Cada cenário corresponde a uma das câmeras usadas na coleta de dados, cuja localização foi apresentada na Seção 4.1. Consequentemente, a contagem média de pedestres por hora obtida com as imagens desta câmera é uma variável que caracteriza o cenário. Outro atributo considerado em cada cenário é a largura da calçada sobre a qual a câmera está posicionada. A Tabela 4.4 apresenta os atributos que descrevem cada cenário.

Tabela 4.4: Descrição dos cenários considerados

Cenário	Câmera	Contagem média de pedestres por hora	Dimensão
1	câmera_14	721	$1,50m$
2	câmera_17	764	$2,30m$
3	câmera_19	778	$2,30m$
4	câmera_23	715	$1,50m$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente foram investigados os resultados considerando como entrada um projeto com 1 (uma) placa, período de análise de 10 anos e taxa mínima de atratividade de $7,5\%$ a.a. Nesta análise foi adotado um tempo de investimento superior por ser mais aceitável para se fazer uma projeção de investimento desta magnitude.

Os resultados da análise econômica são apresentados na Tabela 4.5, onde verifica-se que a área da placa influencia significativamente na viabilidade do projeto. Outro elemento importante é a quantidade de pedestres caminhando sobre o possível local onde as placas seriam implantadas, pois quanto mais pessoas caminhando, maior será a produção de energia.

Tabela 4.5: Resultados da análise econômica com uma placa.

Cenário	1	2	3	4
Custo / (placa + retificador)	R\$ 2.230,90	R\$ 2.932,32	R\$ 2.932,32	R\$ 2.230,90
Custo Implantação	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00
Custo total	R\$ 8.340,90	R\$ 9.042,32	R\$ 9.042,32	R\$ 8.340,90
Manutenção em 10 anos	R\$ 13.260,06	R\$ 14.379,13	R\$ 14.379,13	R\$ 13.260,06
Energia gerada por hora	0,76 kWh	0,99 kWh	1.01 kWh	0.75 kWh
Valor em reais de energia por hora	R\$ 0,61	R\$ 0,79	R\$ 0,81	R\$ 0.60
TIR	-6.57% a.a.	3,49% a.a.	4,41% a.a.	-7.04% a.a.
VPL	R\$ -4.195,90	R\$ -1.137,60	R\$ 24.523,51	R\$ -4.308,61
Payback	Não houve	7 anos	7 anos	Não Houve
Taxa mais atrativa	TMA	TMA	TMA	TMA
Viabilidade do projeto	Inviável	Inviável	Inviável	Inviável

Fonte: Elaborado pelo autor.

O campo "**Taxa mais atrativa**" da Tabela 4.5 refere-se à análise entre a TMA e a TIR, onde está exposto qual dessas taxas é mais atrativa no investimento do projeto. Caso a TIR seja mais atrativa, indica que o investimento dará uma taxa de juros de retorno melhor do que a estimada como parâmetro inicialmente pelo usuário.

A variável que não influencia tanto no retorno financeiro do investimento, nos cenários em que sejam colocadas apenas 1 (uma) placa por calçada, seria o custo de implantação, o qual permaneceu constante conforme mostrado na Tabela 4.5.

As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram o fluxo de caixa gerado pela ferramenta para cada um dos cenários analisados. Os resultados consideram o tempo total do projeto desde a implantação da microusina, até o prazo final estipulado pelo usuário.

Em todos os cenários considerados, os projetos se tornariam inviáveis economicamente. Contudo, o retorno financeiro nos cenários 2 e 3 foram significativamente superiores aos dos cenários 1 e 4, principalmente em virtude da dimensão da placa visto que a diferença na quantidade de pessoas é pequena (inferior a 9% entre os cenários). Isso corrobora para a ideia de que a quantidade de sensores capturando trabalho físico² e convertendo-os em energia elétrica, influencia diretamente como um dos fatores viabilizantes economicamente num projeto.

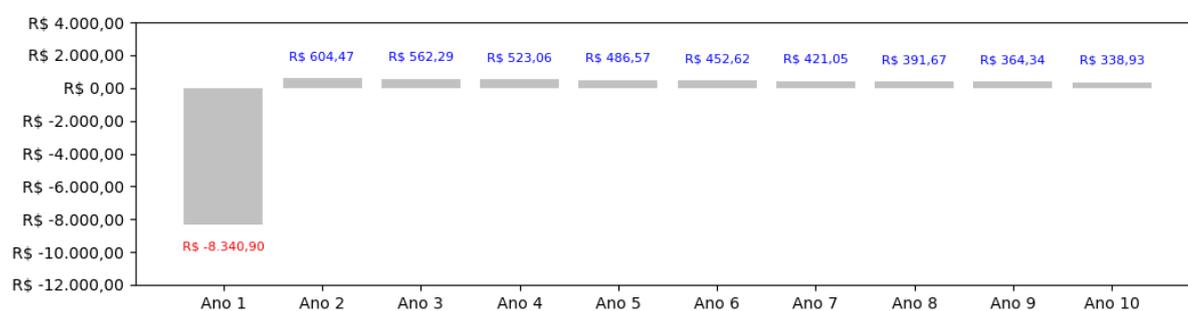


Figura 4.5: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 1, considerando uma placa.

Fonte: Elaborada pelo Autor

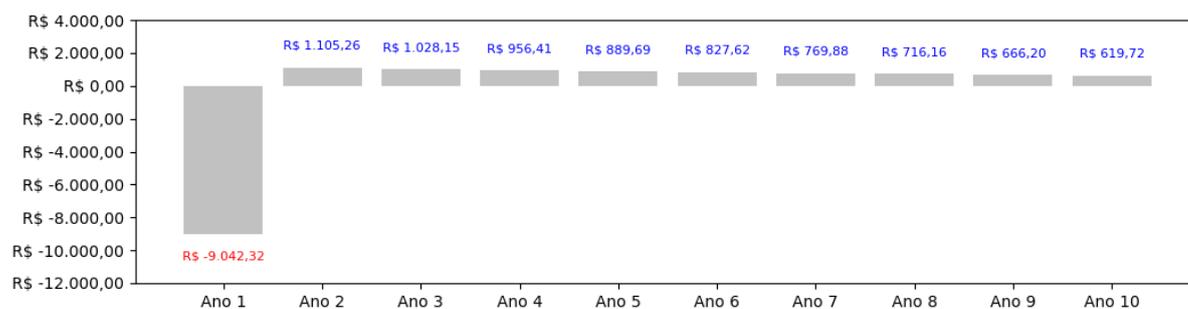


Figura 4.6: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 2, considerando uma placa.

Fonte: Elaborada pelo Autor

²Quanto maior a área da placa, mais sensores serão instalados nela. Vide Subseção 3.4.2.

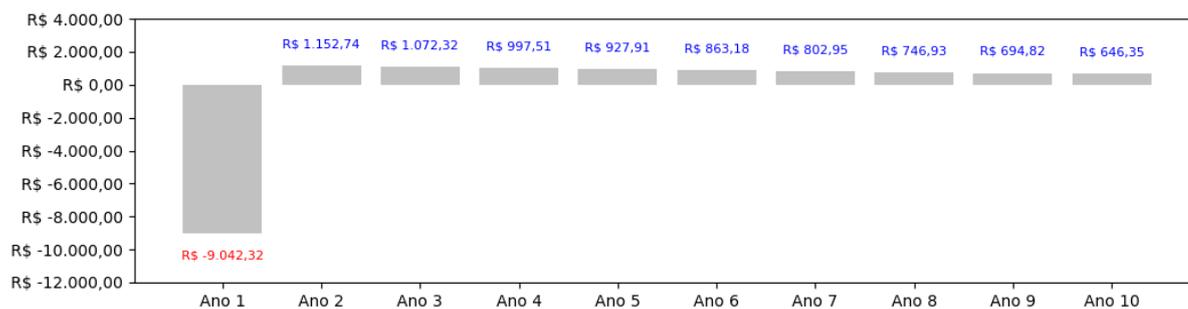


Figura 4.7: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 3, considerando uma placa.

Fonte: Elaborada pelo Autor

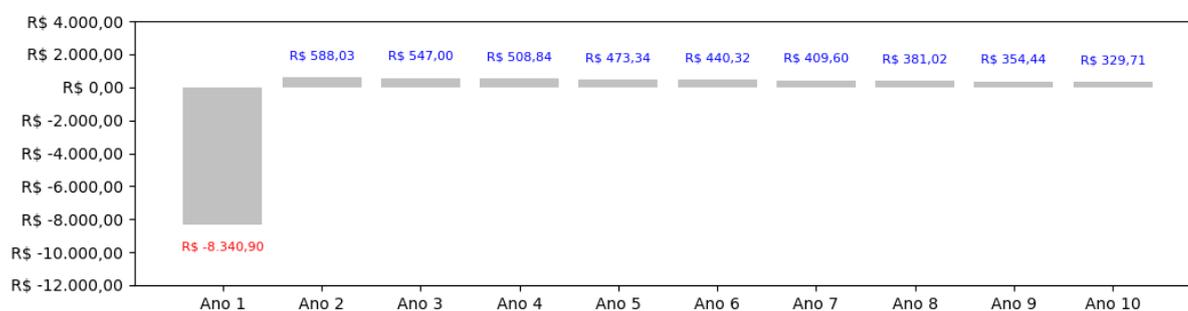


Figura 4.8: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 4, considerando uma placa.

Fonte: Elaborada pelo Autor

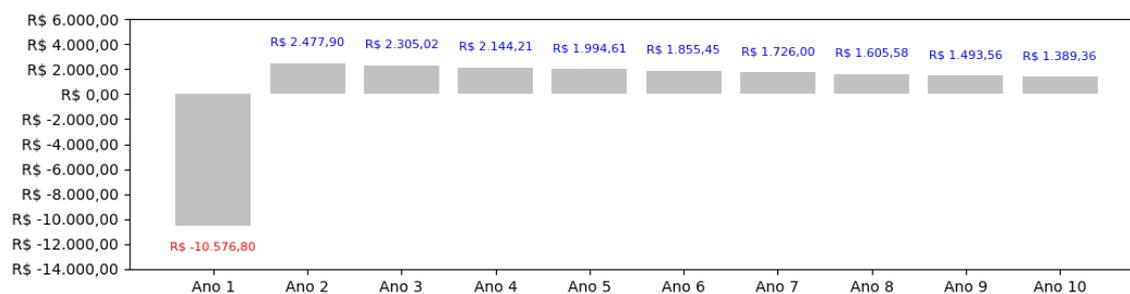
Visando analisar o impacto da quantidade de placas na viabilidade econômica do projeto, os cenários da Tabela 4.5 foram investigados com a colocação de 2 (duas) placas em vez de 1 (uma). O tempo total do projeto e a taxa anual de atratividade foram mantidas como 10 anos e 7,5% a.a., respectivamente.

A análise econômica do projeto com duas placas nas calçadas monitoradas pelas câmeras, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.6, indicam que foram viáveis nos quatro cenários. Essa afirmação é conclusiva devido o aumento da produção de energia em duas vezes. As Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 mostram o fluxo de caixa desses cenários, baseado nos dados contidos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados da análise econômica com duas placas.

Cenário	1	2	3	4
Custo / (placa + retificador)	R\$ 2.230,90	R\$ 2.932,32	R\$ 2.932,32	R\$ 2.230,90
Custo Implantação	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00	R\$ 6.110,00
Custo total	R\$ 10.576,81	R\$ 11.979,63	R\$ 11.979,63	R\$ 10.576,81
Manutenção em 10 anos	R\$ 14.242,86	R\$ 15.361,93	R\$ 15.361,93	R\$ 14.242,86
Energia gerada por hora	1,51 kWh	1,98 kWh	2,02 kWh	1,50 kWh
Valor em reais de energia por hora	R\$ 1,21	R\$ 1,58	R\$ 1,62	R\$ 1,20
TIR	20,47%	29,00%	29,99%	20,05%
VPL	R\$ 6.414,90	R\$ 12.673,40	R\$ 13.324,68	R\$ 6.189,47
Payback	3 anos	3 anos	3 anos	3 anos
Taxa mais atrativa	TIR	TIR	TIR	TIR
Viabilidade do projeto	Viável	Viável	Viável	Viável

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 4.9:** Fluxo de caixa relacionado ao cenário 1, considerando duas placas.

Fonte: Elaborada pelo Autor

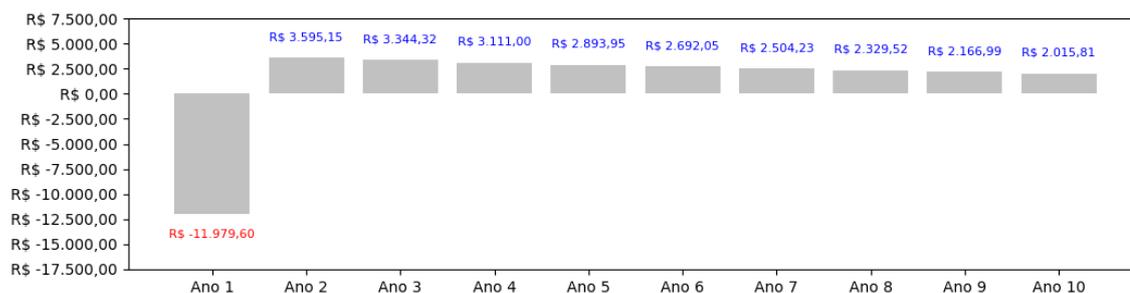


Figura 4.10: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 2, considerando duas placas.

Fonte: Elaborada pelo Autor

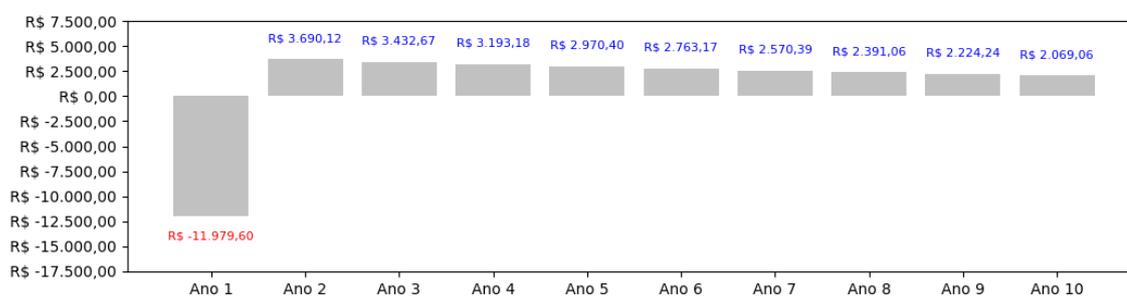


Figura 4.11: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 3, considerando duas placas.

Fonte: Elaborada pelo Autor

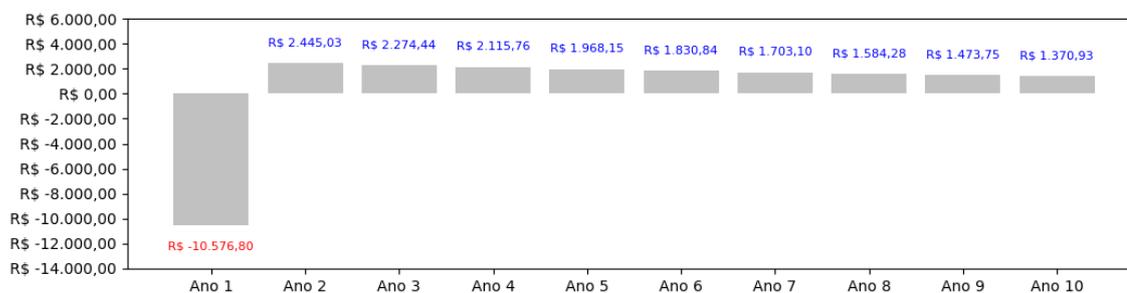


Figura 4.12: Fluxo de caixa relacionado ao cenário 4, considerando duas placas.

Fonte: Elaborada pelo Autor

A ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho pôde ser validada do ponto de vista do que foi proposto inicialmente. A resposta para a análise econômica no exemplo avaliado no estudo de caso foi satisfatória. Por conseguinte, em outros contextos, o arcabouço pode ser aplicado para análise semelhante.

A variação em apenas um dos parâmetros (quantidade de placas) impactou consideravelmente no resultado da viabilidade. Isso sugere a necessidade de realizar uma análise de sensibilidade. Essa foi realizada com o intuito de avaliar algumas variáveis de

entrada do sistema, de modo a quantificar o impacto de cada uma delas na viabilidade econômica do projeto.

4.3.1 Análise de sensibilidade

A última parte da análise econômica do estudo de caso é a análise de sensibilidade, onde o objetivo principal é entender o quanto as variáveis de entrada alteram o resultado de algum indicador. Neste, foi utilizada uma análise univariada de algumas variáveis de entrada de modo que se analise a resposta do VPL no sistema.

A escolha do VPL como variável a ser analisada na sensibilidade se deu pelo fato de que é um importante indicador nas análises econômicas. Este mostra ao longo do período o valor do capital baseado no fluxo de caixa. Portanto, as alterações nele são significativas para entender o retorno do investimento inicial, e para quais parâmetros o VPL é mais sensível.

Os parâmetros utilizados para essa análise são:

- **Dimensão da placa:** Esse parâmetro foi alterado de $0,7m^2$ até $2,60m^2$. Porém na análise das outras variáveis, utilizou-se o valor fixo de $1,50m^2$;
- **Quantidade de placas:** O valor fixo utilizado como base para esse parâmetro foi de 1 (uma) placa. Entretanto para a análise de sensibilidade utilizou-se o intervalo de 1 a 5 placas;
- **Quantidade de pedestres:** Esse parâmetro foi usado para o caso da câmera 14 às 10h do dia 04/05/2019, em que a média de pedestres calculada por hora foi de 860 pessoas. Para a análise de sensibilidade utilizou-se a faixa de 700 a 1200 pedestres;
- **Custo do kWh:** A variável financeira utilizada como parâmetro de entrada foi o valor do kWh, em que pese o padrão utilizado foi de 0,8 R\$/kWh. Para a avaliação do impacto desta no VPL alterou-se os valores de 0,5 R\$/kWh a 0,9 R\$/kWh. Esses valores foram escolhidos conforme os custos médios aplicados aos entes da federação.
- **Taxa Mínima de Atratividade:** Um parâmetro que influencia diretamente no VPL é a TMA, portanto essa foi escolhida como fator para a análise de sensibilidade. O padrão utilizado no estudo de caso foi uma TMA de 7,5% a.a., mas para a análise variou-se tal parâmetro de 5% até 12%. A escolha dessas taxas se deu com base em taxas aplicadas no mercado para escolha de investimento (Taxa Referencial (TR), Taxa de Juros de Longo Prazo (TJLP) e a SELIC) (CAMARGO, 2017), estas taxas podem variar conforme a expectativa de retorno do tipo de investidor e os valores usados aqui sujeitam a números semelhantes aplicados (BCB, 2020).

A escolha dos valores padrões e limites relativos à dimensões e quantidade de pedestres se deu pelas dimensões aferidas nas calçadas e também pelas contagens

realizadas com a obtenção dos dados obtidos das câmeras. Isso resulta numa análise mais precisa com foco do estudo de caso, para analisar a interferência de cada variável aplicada naquele cenário de estudo.

A Tabela 4.7 sintetiza os valores padrões utilizados na análise.

Tabela 4.7: *Parâmetros base para a análise de sensibilidade do VPL*

Parâmetro	Valor referência
Área da placa	1,50m ²
Quantidade de placas	1
Quantidade de pedestres	860
Valor da tarifa	R\$ 0,80 por kWh
Taxa Mínima de Atratividade	7,50%

Fonte: Elaborada pelo autor

A primeira análise foi realizada com a variável “Área da placa”. A Figura 4.13 mostra os valores alterados e as respostas do VPL após a variação deste parâmetro.

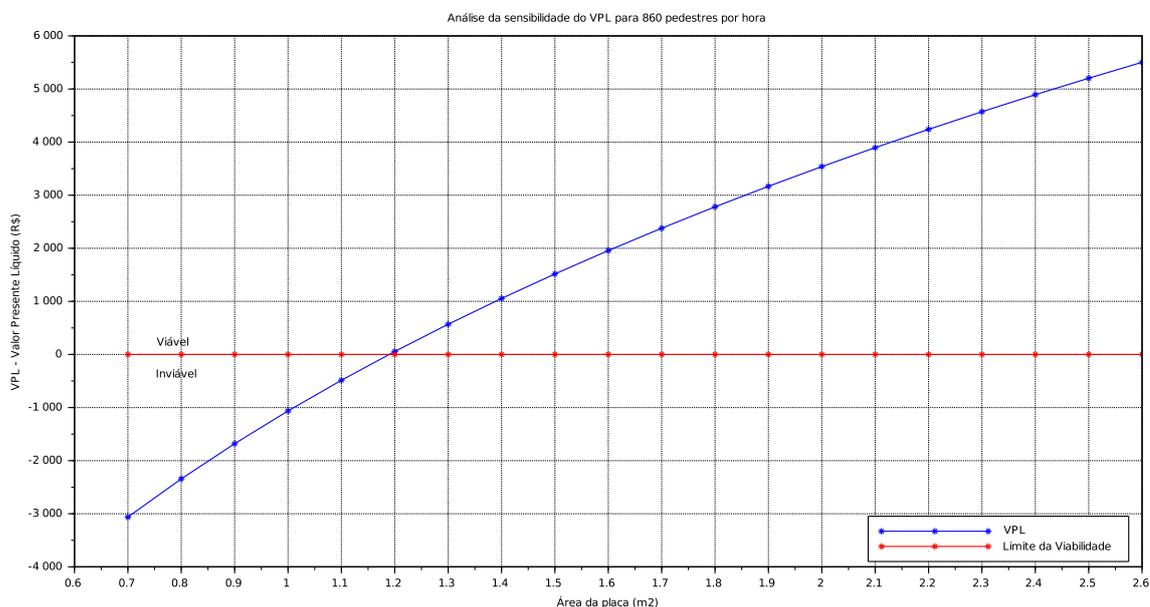


Figura 4.13: *Análise de sensibilidade variando a área da placa no cenário considerado.*

Fonte: Elaborada pelo autor

Nessa análise, ficou constatado que a dimensão das placas influencia diretamente no VPL. Esse fato se dá pelo aumento da quantidade de células piezoelétricas, de modo que quanto maior a área da placa geradora, maior a quantidade de sensores.

Conseqüentemente, apesar de aumentar o valor de implantação do sistema irá aumentar também a energia produzida.

Segundo a Figura 4.13 o mínimo necessário para que o projeto fosse viável analisando esse parâmetro, seria a partir de uma placa com $1,20m^2$, fixando os demais valores da Tabela 4.7.

A segunda análise varia a quantidade de placas, aumentando essas progressivamente, iniciando com 1 (uma) placa até a quantidade de 5 placas. A Figura 4.14 mostra as respostas do VPL para cada quantidade de placas.

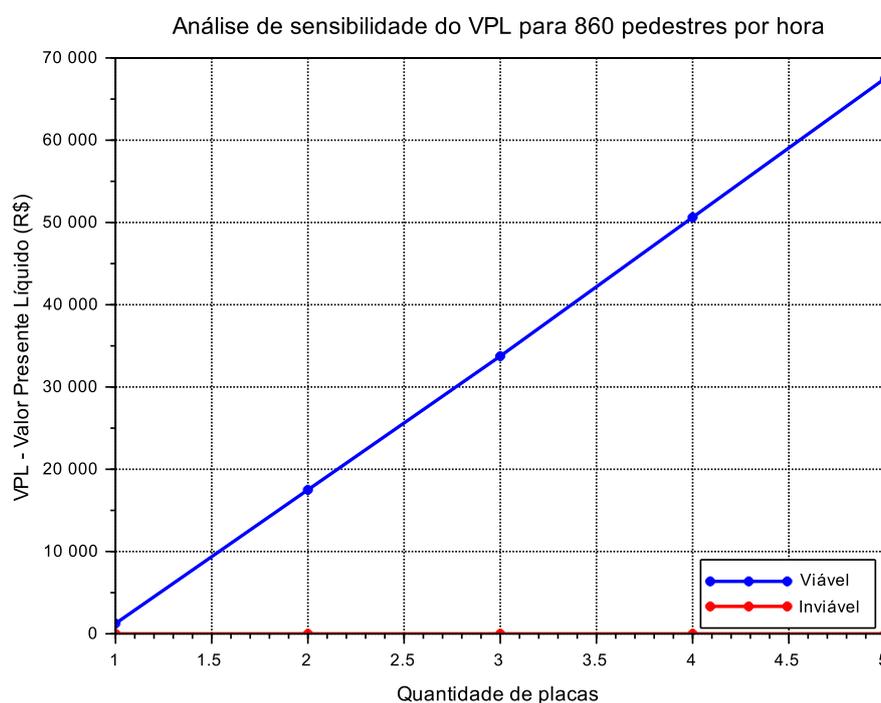


Figura 4.14: Análise de sensibilidade variando a quantidade de placas instaladas na calçada analisada no cenário considerado.

Fonte: Elaborada pelo Autor

Essa análise mostrou que para os valores padrões utilizados, a partir de 1 (uma) placa o projeto já seria viável. Mesmo com o aumento do custo de implantação diretamente proporcional à quantidade de placas, o aumento da produção de energia também aumenta de forma proporcional. Conforme pode ser visualizado na Figura 4.14, a quantidade de placas influi significativamente no fluxo de caixa e, conseqüentemente, no Valor Presente Líquido. Isso mostra o quão sensível é o resultado ao aumento de placas instaladas no cenário analisado.

A terceira análise de sensibilidade, analisou a variável relacionada à quantidade de pedestres que caminham por hora sobre a placa. A Figura 4.15 mostra o resultado.

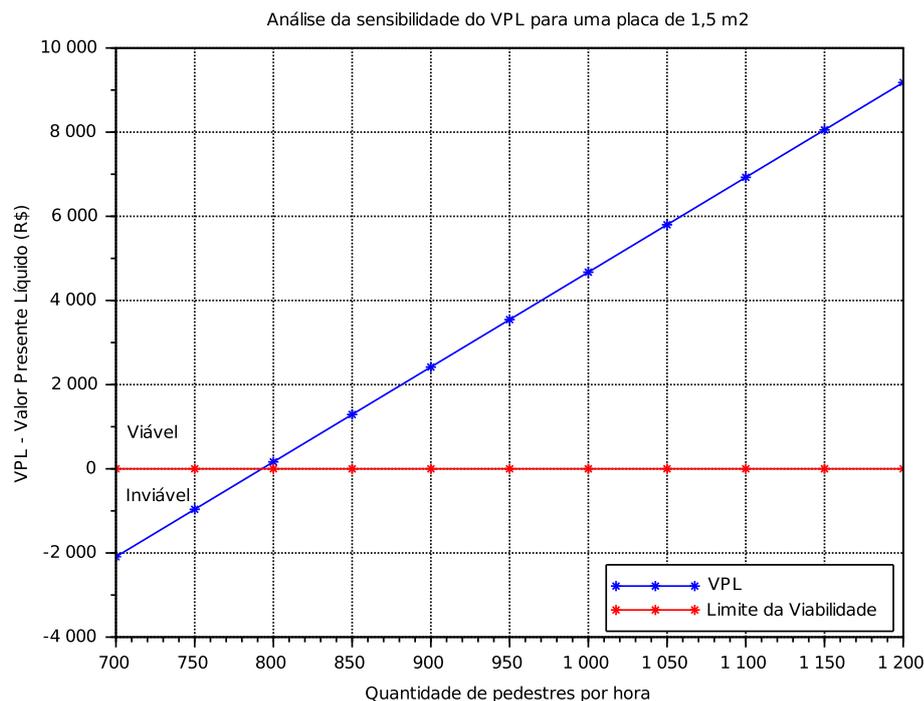


Figura 4.15: Análise de sensibilidade variando a quantidade de pedestres que caminham sobre a placa por hora no cenário considerado.

Fonte: Elaborada pelo autor

A quantidade de pedestres pressionando células piezoelétricas é um dos fatores determinantes na quantidade de energia gerada. O impacto disso é o aumento da receita, e com isso o VPL sofre alterações significativas, o que pode ser constatado na Figura 4.15. Essa análise pode ser comparada analogamente a um motor gerador de energia, que tem uma quantidade mínima na produção energética, que segundo a Figura 4.15 seria no mínimo 800 pedestres caminhando por hora.

A quarta análise de sensibilidade realizada foi a de avaliar as alterações do valor do kWh . Nessa, observou-se o impacto da variação de tal variável em relação ao VPL. Esse parâmetro é proporcional à receita, que atinge diretamente o Valor Presente Líquido.

A Figura 4.16 mostra a variação dos valores do kWh , influenciando diretamente no VPL. À medida que o valor do kWh aumenta, a receita baseada na potência gerada pela placa também eleva, mostrando que essas duas variáveis são diretamente proporcionais. Para os valores padrões colocados como referência na análise de sensibilidade em que se alterou o custo do kWh , o valor mínimo para que o projeto se torne viável seria a partir de 0,73R\$/ kWh . Portanto, para valores padrões descritos na Tabela 4.7, a partir do valor R\$0,73 por kWh o projeto se torna atrativo e gera um retorno mínimo satisfatório baseado na TMA, indicada inicialmente nesse projeto.

A última variável analisada para a sensibilidade, foi a Taxa Mínima de Atratividade. A escolha dessa mostra a capacidade que o projeto tem de dar um retorno em

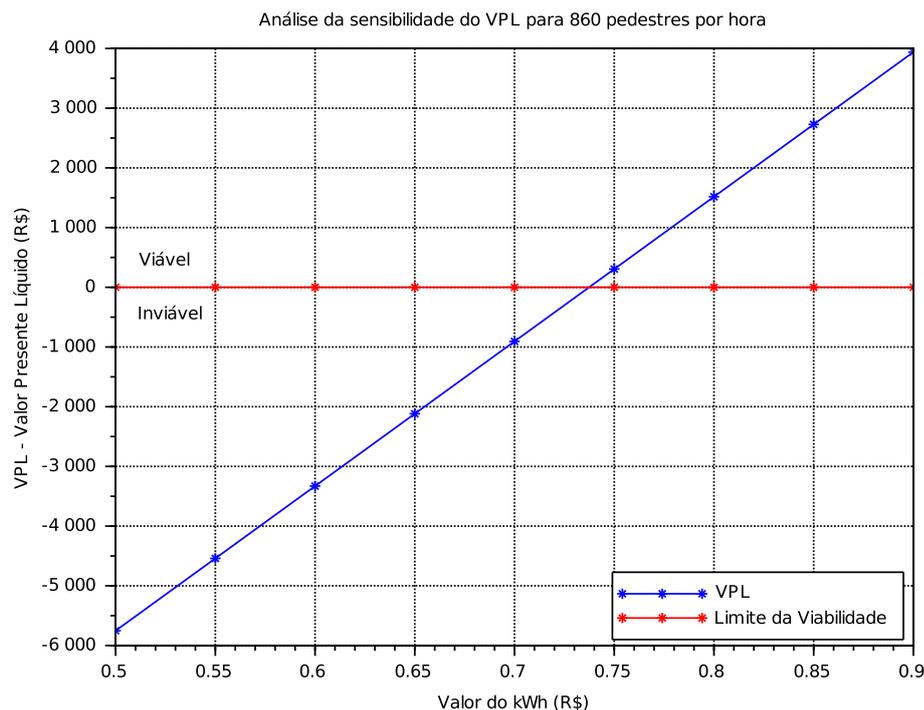


Figura 4.16: Análise de sensibilidade para avaliar o VPL variando o valor do kWh no cenário considerado.

Fonte: Elaborada pelo autor

relação a outras taxas aplicadas no mercado.

A variação dessa taxa demonstra que a mesma é inversamente proporcional ao VPL. Tal afirmação se dá pelo fato de que quanto maior a taxa de atratividade usada pelo investidor, comparada à taxa que o projeto possa fornecer, menor seria a capacidade de retorno. A Figura 4.17 mostra esse comportamento. Nessa análise, pode-se inferir que existe uma taxa mínima de atratividade que daria um retorno positivo ao final do projeto com os parâmetros indicados na Tabela 4.7. Analisando a Figura 4.17 conclui-se que para os valores indicados nessa Tabela, uma taxa menor do que 11,6% retornaria um VPL positivo ao projeto.

Diante do que foi exposto na análise de sensibilidade, ficou comprovado que a dimensão das placas (que afeta diretamente a quantidade de sensores), a quantidade de placas, o valor do kWh e a quantidade de pedestres alteram diretamente o VPL. De modo que o incremento dessas variáveis amplifica a magnitude deste indicador. Assim, uma análise prévia do local (avaliando essas variáveis) a ser implantado a microssina geradora, influencia diretamente na receita do projeto.

A taxa de atratividade escolhida pelo investidor pode mostrar a viabilidade do projeto, dependendo da taxa de retorno que este possa proporcionar relativamente à expectativa de ganho do investidor. Desta maneira, uma análise prévia do mercado pode indicar o quão viável seria o investimento neste setor, pois esse indicador mostra o que é mais viável, aplicar os recursos neste projeto em outro investimento que seja mais atrativo.

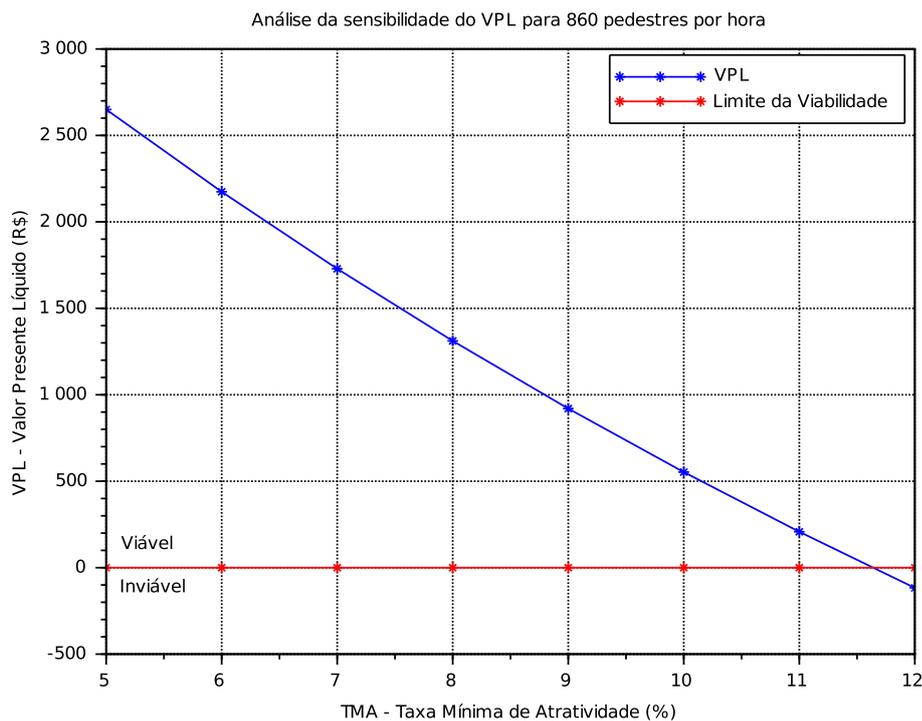


Figura 4.17: *Análise de sensibilidade para avaliar o VPL variando a taxa de atratividade no cenário considerado.*

Fonte: Elaborada pelo autor

O estudo de caso realizado nesse capítulo levou em consideração os aspectos técnicos e econômicos do projeto. Isso se deu pela execução do sistema proposto no trabalho. Os dados usados no sistema para avaliação do estudo de caso foram obtidos a partir de um local adequado ao escopo do projeto, descrevendo assim num possível cenário real a análise técnica e econômica da implantação de microusinas de energia, usando a piezoelectricidade como meio de geração. Baseado nisso, será possível discutir as considerações finais no Capítulo 5 que mostrará uma visão geral do trabalho realizado, bem como sugestões de trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento exponencial por consumo de energia, aliado à busca por alternativas energéticas menos poluentes, demanda diariamente à ciência e à tecnologia avanços em pesquisas nesta área. Diante disso, este trabalho definiu como escopo a proposta da criação de uma ferramenta computacional que realiza a análise técnica e econômica para a implantação de microusinas geradoras de energia elétrica.

A ideia dessa ferramenta envolveu diversas áreas do conhecimento, principalmente a Computação, a Matemática, a Física, a Engenharia Elétrica, a Engenharia Econômica e a Mobilidade Urbana. Esse conjunto de habilidades fez com que fosse possível criar uma metodologia para capturar vídeos e realizar a contagem de pessoas automaticamente, ao utilizar sistemas inteligentes baseados em visão computacional.

A prospecção da análise da produção de energia usando a piezoeletricidade só foi possível mediante o desenvolvimento de uma ferramenta que contabiliza estatisticamente o volume de pessoas caminhando em um determinado local. Por meio dessa contagem pode-se calcular a possibilidade de produção de energia em kWh, o que oferece insumos para o estudo de viabilidade econômica neste setor.

O embasamento teórico foi realizado por intermédio de pesquisas em trabalhos publicados em revistas científicas, além de dissertações e teses correlatas a esse. A base teórica mostra conceitos sobre materiais piezoelétricos e suas aplicações. Outro fator bastante explorado foi o de desenvolvimento de sistemas baseados em aprendizado de máquina para reconhecimento de padrões, além de conceitos bem definidos sobre indicadores da engenharia econômica aplicados à produção de energia limpa.

Esta pesquisa não objetiva desenvolver protótipos ou elementos físicos para a produção desta energia. Por outro lado, como já foi explanado, é um trabalho ligado ao planejamento da implantação destas pequenas unidades geradoras, mediante a ferramenta computacional proposta. Essa metodologia, ao usar processamento de dados previamente determinados, darão suporte às instituições públicas e privadas que tenham interesse em investir na produção de energia usando esta modalidade.

Foi avaliada como estudo de caso a região comercial de maior movimentação de pessoas na cidade de Goiânia-GO. Os dados obtidos auxiliaram na validação do sistema de contagem automatizado de pessoas. Além disso, como resultado a instalação de microusinas piezoelétricas no estudo de caso foi considerada economicamente viável em todos os cenários ao se adotar duas placas, ao passo que é inviável ao se considerar uma única placa.

Uma análise empírica foi realizada durante diversas execuções da ferramenta, e constatou-se que o sistema é sensível a alteração das variáveis:

- Quantidade de pedestres que caminham por hora no local analisado;
- Dimensão das placas geradoras, pois quanto maior as placas mais sensores para captarem energia mecânica que será convertida em energia elétrica;
- Local em que as placas foram instaladas no perímetro da calçada;
- Quantidade de placas instaladas no cenário escolhido;
- Taxa Mínima de Atratividade;
- Valor pago pelo *kWh* produzido pela microunidade geradora de energia piezoelétrica.

Baseado na análise de sensibilidade, realizada no Capítulo 4, ficou evidente que a quantidade de placas instaladas sequencialmente numa calçada, em um cenário típico, é o parâmetro mais impactante no aumento da produção de energia. Consequentemente, influenciando diretamente no aumento do VPL.

Essa conclusão se deu pelo fato de que nas simulações realizadas com dados coletados nas imagens obtidas nas câmeras de segurança do estudo de caso, e de dados estimados com limites opostos em que se tenha uma baixa movimentação de pedestres ou que se tenha um fluxo alto de pessoas caminhando. Isso levou a identificar que estes elementos citados influenciam diretamente na viabilidade do projeto.

A reabertura do comércio na região analisada no estudo de caso, seguindo diversos critérios de biossegurança e com a circulação limitada de pessoas, mostrou que o movimento de pedestres caiu cerca de 35%. Segundo Reis (2020), esse aspecto se deve ao fato de que muitas pessoas optaram por realizar compras virtualmente para a sua segurança e de sua família. Esses dados implicam numa diminuição do potencial de produção de energia piezoelétrica naquele local, que poderia em alguns cenários inviabilizar o projeto de implantação de microunidades geradoras de energia piezoelétricas, do aspecto econômico.

Apesar da redução no número de pedestres ter sido investigada na análise de sensibilidade, como próxima etapa pretende-se realizar uma análise mais profunda sobre a variação deste e de outros elementos. Além disso, pretende-se investigar como prováveis variações nos aspectos construtivos das placas geradoras influenciam na viabilidade econômica do projeto.

5.1 Trabalhos futuros

Esta pesquisa propiciou a análise econômica de sistemas geradores de energia usando células piezoelétricas. A estrutura proposta neste trabalho indicou alguns pontos que podem ser objetos de estudo em pesquisas futuras, a seguir:

- Desenvolvimento de um protótipo de um tapete piezoelétrico e sua validação baseada no estudo prévio exposto neste trabalho;
- Avaliar modelos de geração de energia piezoelétricos já existentes, usando a ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho;
- Otimização na parte da execução dos vídeos com resoluções melhores sem perda na precisão de contagem e com maior velocidade de processamento, além da melhoria dos parâmetros de entrada em relação à acurácia;
- Implementação de uma plataforma em sistemas distribuídos para melhoria do processamento dos dados;
- Realização de uma análise mais ampla, utilizando técnicas que considerem melhor a aleatoriedade dos dados como, por exemplo, as baseadas em processos estocásticos.

Portanto, esse estudo propiciou uma análise técnica e econômica da implantação de microusinas geradoras de energia, usando placas contendo células piezoelétricas, que produzem energia pela pressão mecânica exercida pelos pedestres que caminham sobre as calçadas de centros comerciais. Isso se deu pelo desenvolvimento de um sistema computacional, que analisa desde a contagem de pedestres em um cenário propício, para avaliar a potencialidade energética do local, até a expectativa de retorno financeiro, ao possível investidor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, Ivanilde Maria de Rezende. **Aplicação do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS) em Goiânia**. Dissertação (Mestrado) — PUC-GO, Goiânia-GO, 2013. 22

ALBIOL, A.; MORA, I.; NARANJO, V. Real-time high density people counter using morphological tools. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 2, n. 4, p. 204–218, 2001. 27, 29

ALMEIDA, C.; PADILHA, A.; ECKHARDT, A. Sistema de contagem eletrônica atualizada de pessoas em casas de festas. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 6, n. 2, 2020. 25, 28, 29

ALMEIDA, Renata Ribeiro Guedes de; BRITO, Núbia Silva Dantas; MEDEIROS, Marcus Vinícius Bezerra; SIMÕES, Melyna Candice Silva; OLIVEIRA, Selma Alves de. Proposição de uma metodologia para análise de viabilidade econômica de uma usina fotovoltaica. **Revista Principia**, João Pessoa-PB, n. 34, 2017. 23, 38

BATISTA, Carlos Eduardo; MUSSOLINI, Thiago Pouza; GAUDENCIO, Juliana Helena Daroz. Estudo da viabilidade econômica da implantação de geradores hidroelétricos para geração de energia elétrica na copasa-mg. **Coletânea Brasileira de Engenharia de Produção**, Stellata, n. 7, p. 67 – 89, 2019. 40

BCB, Banco Central Brasileiro. **fatores acumulados - SELIC**. 2020. Online; accessed 22-fev-2021. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicacumul.asp?frame=1>. 39, 79, 85

BODLA, Navaneeth; SINGH, Bharat; CHELLAPPA, Rama; DAVIS, Larry S. Soft-nms—improving object detection with one line of code. *In: Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 5561–5569. 31

BOLME, David S; BEVERIDGE, J Ross; DRAPER, Bruce A; LUI, Yui Man. Visual object tracking using adaptive correlation filters. *In: IEEE. 2010 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*. [S.l.], 2010. p. 2544–2550. 30

BRASIL. **LEI Nº 13.280, DE 3 DE MAIO DE 2016**. 2016. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13280.htm. 20

BRINSON, ME; JAHN, Stefan. Qucs: A GPL software package for circuit simulation, compact device modelling and circuit macromodelling from DC to RF and beyond. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, Wiley Online Library, v. 22, n. 4, p. 297–319, 2009. 46

CAMARA, Fernando Henrique de Oliveira. **Análise de uma Piezoestrutura (PZT) Multifrequência para Geração, Extração e Armazenamento de Energia**. Dissertação (Mestrado) — UNESP, Ilha Solteira-SP, 2012. 35

CAMARGO, Renata Freitas. **Entenda sobre a Taxa Mínima de Atratividade: o que é, quando usar e por que pensar em TMA na hora de investir**. 2017. Disponível em: <https://www.treasury.com.br/blog/taxa-minima-de-atratividade-tma/>. 85

CARTER, ROB; MATHEWS, Roger; BARNES, Mike Motola. **Piezo Materials and Properties**. [s.n.], 2020. Disponível em: <https://piezo.com/pages/piezo-material>. Acesso em: 28 out 2020. 48

CESAR, Silvio. **Técnico Eletrônico - Salário 2021 e Mercado de Trabalho**. 2021. Disponível em: <https://www.salario.com.br/profissao/tecnico-eletronico-cbo-313215/>. 77

CHEN, Bo; LI, Huimin; TIAN, Wei; ZHOU, Chonggang. Pzt based piezoelectric sensor for structural monitoring. **Journal of Electronic Materials**, v. 48, n. 5, 2019. 33, 34

CHO, Sung In; KANG, Suk-Ju. Real-time people counting system for customer movement analysis. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 55264–55272, 2018. 27

CNPQ. **CAFe e acesso remoto ao Portal de Periódicos CAPES**. 2019. Disponível em: <http://mailer.periodicos.capes.gov.br/?m=138&p=view&pi=ViewBrowserPlugin&uid=2f8fa7c8723efa19b1958db739494389>. 24

COELHO, Marcos Antonio Jeremias. **Avaliação e Análise de um sistema de Micro Geração de Energia baseado no efeito Piezoelétrico**. Dissertação (Mestrado) — UFRGS, Porto Alegre-RS, 2015. 35

CORDEIRO, Alexssandro Ferreira; FILHO, Pedro L. P.; OJEDA, Cristian A. U.; VALIATI, Gustavo R. Rastreamento e contagem de pedestre em tempo real por meio de imagens digitais. **CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS (LATINOWARE)**, Porto Alegre-RS, p. 146 – 149, 2019. 28

COSTA, Gabriel Nunes de Figueiredo; LIMA, Janine Diniz. **Análise da viabilidade econômica da inserção de veículos elétrico na rede elétrica com o uso da tecnologia**

VEHICLE-TO-GRID (V2G) em âmbito residencial no Brasil. Dissertação (TCC) — IFG, Goiânia-GO, 2020. 41

DAGDEVIREN canan. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, North Carolina at Chapel Hill, v. 111, n. 5, p. 1927 – 1932, 2014. 21

DANTAS, Maria Pereira. Simulação de um controle de semáforos utilizando planilhas eletrônicas: Uma proposta para fins didáticos. **Gepros, Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 14, n. 3, p. 29, 2019. 27

DIAS priscila marques. **Sistema de Contagem de Pessoas.** Dissertação (Mestrado) — PUC-RJ, Rio de Janeiro-RJ, 2005. 27, 29

ELETROGATE. **Componentes eletrônicos.** 2019. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/componentes>. 77

ELIAS, Juliana. 48% da energia do país virá de fontes limpas e renováveis até 2040, diz bp. **Economia UOL**, 2018. 20

EMAP-SOLAR. **Como fazer o armazenamento de energia solar fotovoltaica.** [s.n.], 2019. Disponível em: <https://emapsolar.com.br/como-fazer-o-armazenamento-de-energia-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 27 dec 2020. 38

ENERGIA, Solen. **Energia solar para pequenas empresas: qual o tempo para começar a funcionar?** 2020. Disponível em: <https://www.solenenergia.com.br/blog/energia-solar-para-pequenas-empresas-funcionar/>. 65, 78

ENNAWAOU, C.; HAJJAJI, A.; AZIM, A.; BOUGHALEB, Y. Theoretical modeling of power harvested by piezo-cellular polymers. **Molecular Crystals and Liquid Crystals**, n. 628, p. 49–54, 2016. 22

ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. **Piezoelectric energy harvesting.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 21

FARIAS, Guilherme; SALLUM, Alexandre. Projeto de geradores piezelétricos para iluminação no restaurante universitário da UNICAMP. **Revista Ciências do Ambiente ON-line**, v. 09, n. 02, 2013. 23, 45, 46, 47, 52, 78

FELIX, Raquel; RIONDET-COSTA, Daniela; PALMA-LIMA, Josiane. Modelo de avaliação de áreas urbanas para receber projetos integrados de revitalização e mobilidade

sustentável. **EURE, Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos Regionales**, v. 45, n. 134, p. 77–98, 2019. 27

FERREIRA, Lara Cristina Gomes. Uma reflexão sobre a expansão e a mobilidade urbana: uma análise do plano diretor de goiânia-go. **Revista Eletrônica de Geografia**, v. 5, n. 15, p. 62–86, 2013. 27

FERREIRA, Paulo; GUARDA, Emeli; LEÃO, Marlon; SANCHES, João Machado; SHIGEHARUOHIRA, Luís. Índice de mobilidade urbana sustentável (imus) para o domínio planejamento integrado em sinop-mt. **E&S Engineering and Science**, v. 7, 06 2018. 22

FILHO, Roberio Paredes Moreira. **Análise e Caracterização da Potência Elétrica Gerada com Elemento Piezolétrico**. Dissertação (Mestrado) — UFPB, João Pessoa-PB, 2014. 32, 33, 34

FREEMAN, William T.; ROTH, Michal. Orientation histograms for hand gesture recognition. **Mitsubishi Electric Research Laboratories**, Cambridge, Massachusetts-USA, 1995. 29

FREITAS, Carlos. **Região da Rua 44 em Goiânia: um raio-X do 2º maior polo atacadista do País**. 2017. Disponível em: https://diaonline.ig.com.br/aproveite/cidades/regiao-da-rua-44-em-goiania-um-raio-x-do-2o-maior-polo-atacadista-do-pais/?utm_source=Carlos+Freitas&utm_campaign=diaonline-author. Acesso em: 25 mar. 2021. 72

GARCIA, J.; GARDEL, A.; BRAVO, I.; LAZARO, J.; MARTINEZ, M.; RODRIGUEZ, D. Directional people counter based on head tracking. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 9, p. 3991–4000, 2013. 27, 29

GITMAN, Lawrence J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. 39

GOMES, Viviane Margarida. **Complexidade natural de sistemas com base em análise de sensibilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computação) — Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020. 41, 42

GOOGLE. **Google Acadêmico**. 2019. Disponível em: <https://scholar.google.com/>. 24

GUILLÉN-PÉREZ, Antonio; BAÑOS, María Dolores Cano. A wifi-based method to count and locate pedestrians in urban traffic scenarios. *In: IEEE. 2018 14th International*

Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). [S.l.], 2018. p. 123–130. 24

HOWARD, Andrew G; ZHU, Menglong; CHEN, Bo; KALENICHENKO, Dmitry; WANG, Weijun; WEYAND, Tobias; ANDREETTO, Marco; ADAM, Hartwig. Mobile-nets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. **arXiv preprint arXiv:1704.04861**, 2017. 30

HWANG, Sung Joo; JUNG, Hyun Jun; KIM, Jeong Hun; AHN, Jung Hwan; SONG, Daniel; SONG, Yewon; LEE, Hee Lak; MOON, Sung Pil; PARK, Hyeonsu; SUNG, Tae Hyun. Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps. **Current Applied Physics**, v. 15, n. 6, p. 669–674, 2015. 22, 23

HYNDMAN, Rob J.; KOEHLER, Anne B. Another look at measures of forecast accuracy. **International journal of forecasting**, n. 22, p. 679–688, 2006. 44

IBGE. **População no último censo**. 2020. [Online; accessed 07-Abr-2021]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/goiania/panorama>. 21

_____. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html?utm_source=portal&utm_medium=popclock&utm_campaign=novo_popclock. 65

JEON, Y.B.; SOOD, R.; JEONG, J. h.; KIM, S.-G. Mems power generator with transverse mode thin film pzt. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 122, n. 1, p. 16–22, 2005. ISSN 0924-4247. SSSAMW 04. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424705000683>. 23

JETBRAINS. **PyCharm - The Python IDE for Professional Developers**. [S.l.: s.n.], 2021. 53

JIA, Yangqing; SHELHAMER, Evan; DONAHUE, Jeff; KARAYEV, Sergey; LONG, Jonathan; GIRSHICK, Ross; GUADARRAMA, Sergio; DARRELL, Trevor. Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding. *In: Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 675–678. 53

JINGDEZHEN. **Jingdezhen Mיעar Eletronics Co**. [s.n.], 2020. Disponível em: <https://detail.en.china.cn/provide/pic136522745.html>. Acesso em: 17 jun 2020. 49

JOKURA, Thiago. Como surgiu a numeração dos sapatos. **Revista Super Interessante**, 2008. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-surgiu-a-numeracao-dos-sapatos/>. 51, 65, 66, 78

KAFRUNI, Simoni. Energia limpa ganha espaço sem comprometer o futuro do planeta. *In: .* [s.n.], 2019. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2019/03/05/internas_economia,741110/energia-limpa-ganha-espaco-sem-comprometer-o-futuro-do-planeta.shtml. 20

KALAL, Zdenek; MIKOLAJCZYK, Krystian; MATAS, Jiri. Tracking-learning-detection. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, IEEE, v. 34, n. 7, p. 1409–1422, 2011. 30

KUHN, Gustavo Gomes. **Caracterização de um sistema piezelétrico para geração de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — UTFPR, Pato Branco-RS, 2014. 21, 32, 37

LANZA, Alexandre Costa. **Reciclagem do Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT) pelo método coprecitado**. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. 32

LEHTOLA, Ville; HUTTUNEN, Heikki; CHRISTOPHE, Francois; MIKKONEN, Tommi. Evaluation of visual tracking algorithms for embedded devices. image analysis. **Lecture Notes in Computer Science. SCIA**, Springer, n. 10269, 2017. 30

LI, Yiting; HUANG, Haisong; XIE, Qingsheng; YAO, Ligu; CHEN, Qipeng. Research on a surface defect detection algorithm based on mobilenet-ssd. **Applied Sciences**, n. 1678, 2018. 31

LIMA, Arthur R. de A. **Complemento de um simulador geral de circuitos (Qucs) com um modelo e método de extração unificados (UMEM)**. Monografia (TCC) — UNB, Brasília, 2015. 46

LIU, Wei; ANGUELOV, Dragomir; ERHAN, Dumitru; SZEGEDY, Christian; REED, Scott; FU, Cheng-Yang; BERG, Alexander C. Ssd: Single shot multibox detector. *In: SPRINGER. European conference on computer vision*. [S.l.], 2016. p. 21–37. 30

LIU, Xiaoming; TU, Peter Henry; RITTSCHER, Jens; PERERA, Amitha; KRAHNSTOEVER, Nils. Detecting and counting people in surveillance applications. *In: IEEE. IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, 2005*. [S.l.], 2005. p. 306–311. 27

LUSTOSA, Alexandre George. **Introdução ao mercado financeiro com Python!** 2019. Disponível em: <https://medium.com/@alegeorgelustosa/introdu%C3%A7%C3%A3o-ao-mercado-financeiro-com-python-3383ebecddf7>. 69

MALMONGE, J. A.; MALMONGE, L. F.; JR., G. C. Fuzari; MALMONGE, S. M.; SAKAMOTO, W. K. Piezo and dielectric properties of phb–pzt composite. **Polymer Composites**, Wiley Digital Archives, v. 30, p. 1333–1337, 2009. 35, 48

MAPS, Google. **Imagem de satélite da região da Rodoviária de Goiânia e adjacências**. 2021. [Online; accessed 13-fev-2021]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-16.6573317,-49.2648854,2876m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>. 72

_____. **Imagem de satélite do hotel localizado no shopping Mega Moda**. 2021. [Online; accessed 01-mar-2021]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/place/Mega+Moda+Hotel/@-16.6599916,-49.2556986,3a,75y,90t/data=!3m1!1e2!3m6!1sAF1QipOdh9jTPFKExvpJyForc9J9vbpwUjgodPLqs4hs!2e10!3e12!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipOdh9jTPFKExvpJyForc9J9vbpwUjgodPLqs4hs%3Dw152-h86-k-no!7i4000!8i2250!4m8!3m7!1s0x935ef3c5c0d8e075:0xd6bacc70b43f555f!5m2!4m1!1i2!8m2!3d-16.6603053!4d-49.2551984>. 71

MARQUI, Fabricio; OKI, Nobuo. Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando transdutor piezelétrico na forma pulsada. *In*: 10º Congresso Brasileiro sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural (Ed.). **Anais..** São Paulo: USP, 2015. 33, 36, 37, 52

MARZANO, Franciele. **Além do sertanejo, Goiânia concentra o maior polo de moda do País**. 2018. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/turismo/2018/07/08/interna_turismo,692863/compras-em-goiania.shtml. Acesso em: 25 mar. 2021. 72

MITCHESON, Paul D. Energy harvesting for human wearable and implantable biosensors. *In*: IEEE. **2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology**. [S.l.], 2010. p. 3432–3436. 21

MURATA. **Piezoelectric Sound Components. Murata Manufacturing Co., Ltd.** [s.n.], 2020. Disponível em: <https://www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf>. Acesso em: 21 may 2020. 52

NAGEL, Laurence William. SPICE - Simulation program with integrated circuit emphasis. **Memo No.. ERL-M382, Electronics Research Laboratory, University of California, Berkeley**, 1973. 46

NAJINI, Hiba; MUTHUKUMARASWAMY, S. A. Piezoelectric energy generation from vehicle traffic with techno-economic analysis. **Jornal of Renewable Energy**, Dubai-UAE, 2016. 23, 32

NETO, Daywes Pinheiro; DOMINGUES, Elder Geraldo; CALIXTO, Wesley Pacheco; ALVES, Aylton José. Methodology of investment risk analysis for wind power plants in the brazilian free market. **Electric Power Components and Systems**, v. 46, n. 3, p. 316–330, 2018. 23

NETO, Lauro Paulo da Silva. **Caracterização de Dielétricos para sistemas armazenamento de alta energia e de geração de RF em aplicações aeroespaciais**. Dissertação (Mestrado) — INPE, São José dos Campos-SP, 2012. 51, 77, 78

NEYMAN, Jerzy. Outline of a theory of statistical estimation based on the classical theory of probability. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 236, n. 767, p. 333–380, 1937. 60

NGSOLAR. **Preço da energia elétrica CPFL 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl>. Acesso em: 25 mar. 2021. 77

OBAMA, Barack. The irrevsible momentum of clean energy. **Science**, EUA, v. 355, n. 6321, p. 126–129, 2017. 20

OPENCV. **About OpenCV**. [S.l.: s.n.], 2021. 30, 53

PINTO, Luane Schiochet; NETO, Daywes Pinheiro; FILHO, Anésio de Leles Ferreira; DOMINGUES, Elder Geraldo. An alternative methodology for analyzing the risk and sensitivity of the economic viability for generating electrical energy with biogas from the anaerobic bio-digestion of vinasse. **Renewable energy**, v. 48, p. 1401–1410, 2020. 23

PROCOPIUCK, Mario. Public space: Physical reconfigurations and user perceptions in long term perspectives. **Arquiteturarevista**, v. 15, p. 117–137, 2019. 27

QI, Yi; KIM, Jihoon; NGUYEN, Thanh D.; LISKO, Bozhena; PUROHIT, Prashant K.; MCALPINE, Michael C. Enhanced piezoelectricity and stretchability in energy harvesting devices fabricated from buckled pzt ribbons. **Nano Letters**, v. 11, n. 3, p. 1331–1336, 2011. 21

QUEIROZ, Leonardo Mendonça Oliveira de. **Estimação e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — UNICAMP, 2010. 51, 77, 78

RABUSKE, Rodrigo; FRIEDRICH, Laercio Rogerio; FONTOURA, Fernando Batista Bandeira. Análise da viabilidade para implantação de energia fotovoltaica com utilização para sombreamento de estacionamento. **Revista CEPE**, n. 47, p. 36–48, 2018. 23, 39, 40, 69

RANGEL, Renato Franklin. **Caracterização de Uma célula Tubular Piezelétrica para Geração de Energia Elerica**. Dissertação (Mestrado) — UFPB, João Pessoa-PB, 2014. 34, 35

RAY, Sunil. Understanding support vector machine (svm) algorithm from examples (along with code). **Analytics Vidhya**, 2017. Disponível em: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2017/09/understanding-support-vector-machine-example-code/>. 30

REDMON, Joseph; DIVVALA, Santosh Kumar; GIRSHICK, Ross B.; FARHADI, Ali. You only look once: Unified, real-time object detection. **CoRR**, abs/1506.02640, 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1506.02640>. 30

REIS, Jessica Santos. Movimento nas lojas da região da 44 deve ser 35% menor neste fim de ano. **Mais Goiás**, 2020. Disponível em: <https://www.instagram.com/p/CJHBUvNj8T2/?igshid=v7tg4nb87oew>. 92

RODRIGUES, Vitor Borba. **Conhecendo a visão do computador: Redes Neurais Convolucionais**. 2019. Disponível em: <https://vitorborbarodrigues.medium.com/conhecendo-a-vis%C3%A3o-do-computador-redes-neurais-convolucionais-e1c2b14bf426>. 31

ROSENBROCK, Adrian. **Open CV People Counter**. [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.pyimagesearch.com/2018/08/13/opencv-people-counter/>. Acesso em: 03 jul 2019. 29, 30, 53, 54, 55

SAIFAN, Ramzi; ALI, Layan; SHREIKH, Areej; ALNABELSI, Sharhabeel. Smart walk: Case studies on hybrid power generation system of piezoelectricity and solar power. *In: .* [S.l.: s.n.], 2019. 23

SEIKO. **Seiko Watch Corporation**. 2021. Online; accessed 11-Jun-2021. Disponível em: <https://www.seiko.com.br/v1/>. 21

SILVA, Luiz Fernando Suzarte. **Sistema de geração de energia via sensores piezoelétricos**. Monografia (TCC) — Uniceub, Brasília-DF, 2017. 45, 78

SILVA, Thaynara; MARTINS, Felipe N.; COSTA, Wagner T. Criação de tutoriais e relatos de experiências sobre a utilização de softwares livres no ensino de engenharia. **XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, Belém-PA, 2012. 47

SIMAS, Moana; PACCA, Sergio. geração de empregos e desenvolvimento sustentável. **Estudo Avançados**, USP, São Paulo-SP, v. 27, n. 77, 2013. 20

SOUSA, Layson Carneiro de; COSTA, Mariele Ferreira. Estudo sobre o potencial de geração de energia elétrica para semáforos a partir de placas piezoelétricas na ma 006. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga-SP, v. 03, n. 03, 2016. 23, 32, 36, 38

STUDENSKI, Stephanie; PERERA, Subashan; PATEL, Kushang; ROSANO, Caterina; FAULKNER, Kimberly; INZITARI, Marco; BRACH, Jennifer; CHANDLER, Julie; CAWTHON, Peggy; CONNOR, Elizabeth Barrett; NEVITT, Michael; VISSER, Marjolein; KRITCHEVSKY, Stephen; BADINELLI, Stefania; HARRIS, Tamara; NEWMAN, Anne B.; CAULEY, Jane; FERRUCCI, Luigi; GURALNIK, Jack. Gait Speed and Survival in Older Adults. **JAMA**, v. 305, n. 1, p. 50–58, 01 2011. ISSN 0098-7484. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jama.2010.1923>. 67

SUN, Chenglin; SHI, Jian; WANG, Xudong. Fundamental study of mechanical energy harvesting using piezoelectric nanostructures. **Journal of applied physics**, Wisconsin-USA, n. 108, 2010. 23

SZELISKI, Richard. **Computer vision: algorithms and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. 29

TAVARES. **Caderno de Laboratório**. [s.n.], 2017. Disponível em: <https://cadernodelaboratorio.com.br/2017/08/30/conhecendo-os-diodos-retificador-de-onda-completa/>. Acesso em: 16 jun 2020. 37

TOUHTOUH, S.; RGUITI, M.; COURTOIS, C.; BELHORA, F.; ARBAOUI, A.; DASTORG, S.; RACHEK, A.; HAJJAJI, A. Pu/pzt composites for vibratory energy harvesting. **Optical and Quantum Electronics**, v. 48, n. 4, p. 01–12, 2016. 35

URROZ-MONTOYA, Denis O.; ALVERTO-SUAZO, Jeffrey R.; GARCÍA-CABRERA, Julio R.; ORTEGA-JIMÉNEZ, Cesar H. Piezoelectricity: a literature review for power generation support. **MATEC Web of Conferences**, n. 293, 2019. 22

VANZ, Elena; KARAKIEWICZ, Justyna. Pedestrian as generator: Implementing a stand-alone piezo power generating device in the urban context. In: **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 154–171. 24

VARGAS, M.; GRAMANI, L.; KAVINSKI, E.; BALBO, A. Modelagem do fluxo de pedes-tres pela teoria macroscópica. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, Brasil, v. 34, n. 04, 2012. 28

WANG, Angtian; SUN, Yihong; KORTYLEWSKI, Adam; YUILLE, Alan L. Robust object detection under occlusion with context-aware compositionalnets. In: **Proceedings**

of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S.l.: s.n.], 2020. p. 12645–12654. 32

WANG, Xinqing; HUA, Xia; XIAO, Feng; LI, Yuyang; HU, Xiaodong; SUN, Pengyu. Multi-object detection in traffic scenes based on improved ssd. **Electronics**, n. 302, 2018. 31, 32

YAML. **The Official YAML Website**. [S.l.: s.n.], 2021. 63

ZHANG, Fukai; LI, Ce; YANG, Feng. Vehicle detection in urban traffic surveillance images based on convolutional neural networks with feature concatenation. **Sensors**, n. 394, 2019. 32

ZHANG, Yan; BAO, Yinxiang; ZHANG, Dou; BOWEN, Chris R. Porous pzt ceramics with aligned pore channels for energy harvesting applications. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 98, n. 10, p. 2980–2983, 2015. 35, 53

ZHAO, Qijie; SHENG, Tao; WANG, Yongtao; NI, Feng; CAI, Ling. Cfenet: An accurate and efficient single-shot object detector for autonomous driving. **arXiv preprint arXiv:1806.09790**, 2018. 32